

# Wybrane metody chłodzenia form wtryskowych

## Selected methods of injection molds cooling

PAWEŁ MUSZYŃSKI  
KRZYSZTOF MROZEK  
PRZEMYSŁAW POSZWA\*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.8-9.332

Omówiono wybrane metody chłodzenia form wtryskowych oraz tendencje w rozwoju konstrukcji tych układów w aspekcie podniesienia ich efektywności. Ponadto zaprezentowano zasady budowy układów chłodzenia pozwalających na uzyskanie efektywnego, dynamicznego i równomiernego odbioru ciepła z wypraski.

**SŁOWA KLUCZOWE:** tworzywa sztuczne, wtryskiwanie, formy wtryskowe, chłodzenie

*Selected methods of injection mold cooling and the development trends in the design of these systems in terms of improving the efficiency of their operation were discussed. Also the rules for construction of cooling systems allowing to obtain an efficient, dynamic and uniform heat transfer from polymer were presented.*

**KEYWORDS:** plastics, injection, injection molds, cooling phase

Technologia formowania wtryskowego jest obecnie jedną z najprężniej rozwijających się metod wytwarzania elementów z tworzyw termoplastycznych. Wykorzystuje się ją w wielu gałęziach przemysłu, począwszy od produkcji zabawek, artykułów gospodarstwa domowego, sprzętu elektronicznego i medycznego, a skończywszy na branży samochodowej, lotniczej i chemicznej. Technologia polega na wtryskiwaniu uplastycznionego tworzywa sztucznego do gniazda formy wtryskowej [6]. W ten sposób powstaje wypraska odwzorowująca kształt gniazda o specyficznych właściwościach fizycznych, zależnych od przebiegu procesu technologicznego [1].

Konwencjonalna metoda wtryskiwania opiera się na utrzymaniu stałej temperatury powierzchni formującej formy oraz stałego przepływu podawanego na nią medium. Czynniki te zależą od rodzaju wtryskiwanego tworzywa. Powierzchnię formującą nagrzewa się do temperatury niższej niż temperatura wtrysku (w przypadku tworzyw termoplastycznych) lub do temperatury umożliwiającej proces sieciowania (w przypadku tworzyw termoutwardzalnych). Chłodzenie wyprasek i formy następuje w trakcie procesu produkcyjnego – po każdym cyklu wtrysku. Głównym zadaniem układu chłodzenia formy wtryskowej jest odebranie jak największej ilości ciepła od wypraski, aby możliwe było jej bezpieczne usunięcie z gniazda formującego. Jednocześnie odbiór ciepła powinien być równomierny i dynamiczny.

W klasycznej metodzie wtryskiwania etap chłodzenia stanowi zazwyczaj dwie trzecie długości cyklu [7]. Dlatego dąży się do skrócenia czasu chłodzenia poprzez obniżanie temperatury formy. Taki zabieg pozwoliłby na znaczne przyspieszenie produkcji [7]. W praktyce jednak zbyt niska temperatura powierzchni formującej jest główną przyczyną powstawania wad w wypraskach, do których zalicza się: niedolewy, smugi, deformacje, widoczne linie łączenia, naprężenia wewnętrzne i inne. W przypadku wytwarzania wyprasek cienkościennych wady te występują notorycznie. Z tego względu podczas produkcji takich elementów temperaturę powierzchni formującej podnosi się w niewrażliwych miejscach nawet powyżej 100 °C poprzez zwiększanie temperatury cieczy w układzie chłodzenia [8]. Zabieg ten pozwala na uniknięcie opisanych problemów, jednak wydłuża cykl i sprawia, że produkcja staje się nieekonomiczna.

Dynamika chłodzenia musi być odpowiednio dopasowana do rodzaju przetwarzanego tworzywa, ponieważ zbyt wolne obniżanie temperatury wypraski powoduje spadek jej naprężeń własnych i powstawanie dużego skurczu pierwotnego. Z kolei zbyt szybkie chłodzenie (tzw. zamrażanie wyprasek) może powodować duże naprężenia, brak skurczu pierwotnego i powstawanie skurczu wtórnego [2]. Skutkami skurczu wtórnego są m.in. deformacje, pękanie wyprasek oraz pojawianie się linii naprężeniowych po pewnym czasie od wyjęcia części z formy wtryskowej.

W dzisiejszych czasach wyrobom z tworzyw sztucznych stawiane są coraz wyższe wymagania, dlatego koniecznością staje się ciągle doskonalenie technologii wtryskiwania. Nowoczesne tendencje rozwojowe wynikają z dążenia do poprawy jakości produkowanych wyrobów przy równoczesnym ograniczeniu kosztów i czasu produkcji. Dlatego tak ważnymi aspektami stają się wybór metody chłodzenia oraz zaprojektowanie układu chłodzenia – aby zapewnić skuteczną wymianę ciepła w formie wtryskowej.

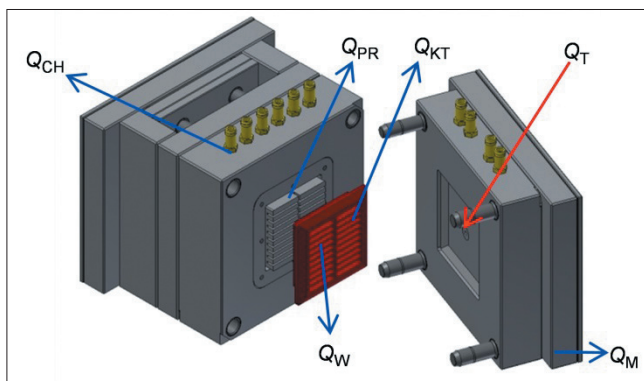
### Bilans cieplny formy wtryskowej

Strumień ciepła  $Q_T$  doprowadzany jest do formy wtryskowej wraz z wtrysniętym tworzywem. Odprowadzanie ciepła z układu odbywa się na drodze przewodzenia, konwekcji oraz promieniowania termicznego do sąsiednich ośrodków o niższej temperaturze, m.in. do chłodziwa znajdującego się w zamkniętym układzie chłodzenia, stołu wtryskarki oraz otoczenia. Na rys. 1 przedstawiono bilans cieplny konwencjonalnej formy wtryskowej, a zapis matematyczny tego zjawiska [3] jest następujący:

\* Mgr inż. Paweł Muszyński (pawel.h.muszynski@doctorate.put.poznan.pl), dr inż. Krzysztof Mrozek (krzysztof.mrozek@put.poznan.pl) – Instytut Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej; mgr inż. Przemysław Poszwa (przemyslaw.b.poszwa@doctorate.put.poznan.pl) – Instytut Technologii Materiałów Politechniki Poznańskiej

$$Q_T = Q_{KT} + Q_{PR} + Q_{CH} + Q_W + Q_M$$

gdzie:  $Q_T$  – strumień ciepła doprowadzany do formy od wtryskiwanego tworzywa,  $Q_{KT}$  – straty/zyski ciepła (konwekcja termiczna),  $Q_{PR}$  – straty/zyski ciepła (promienowanie cieplne),  $Q_{CH}$  – strumień ciepła odprowadzany przez układ chłodzący,  $Q_W$  – ciepło uwolnionej wypraski,  $Q_M$  – straty/zyski ciepła (przewodzenie do elementów wtryskarki).

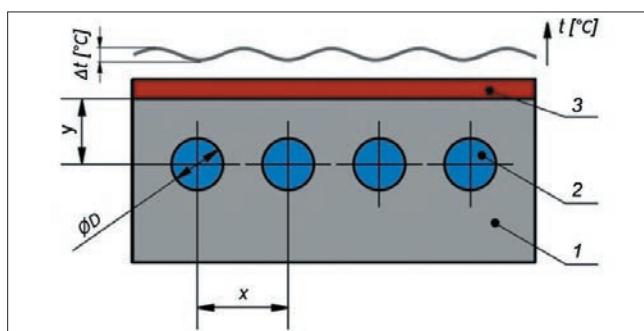


Rys. 1. Bilans cieplny formy wtryskowej [3]

### Zasady budowy układu chłodzenia

Kształt kanału chłodzącego oraz jego odległość od powierzchni gniazda formującego mają bardzo duży wpływ na skuteczność wyrównywania temperatury w formie. Średnice otworów chłodzących (przekroje poprzeczne kanałów) powinny być możliwie jak największe. Zaleca się, aby średnice kanałów nie były mniejsze niż 6 mm, ponieważ przy mniejszych wartościach następuje tłumienie przepływu medium chłodzącego, co w znacznym stopniu utrudnia chłodzenie formy [4]. Z kolei górna granica wynosi ok. 20 mm. Powyżej tej wartości średnicy kanału intensywność chłodzenia nie wzrasta, a zwiększa się tylko wydatek chłodziwa, co jest zjawiskiem niepożądanym [4].

Na rys. 2 przedstawiono zalecane rozmieszczenie kanałów chłodzących, które gwarantuje bardzo wysoką skuteczność chłodzenia [10]. W tabelicy zestawiono wartości wymiarów odnoszące się do rys. 2. Czerwonym kolorem zaznaczono wartości wybierane w pierwszej kolejności.

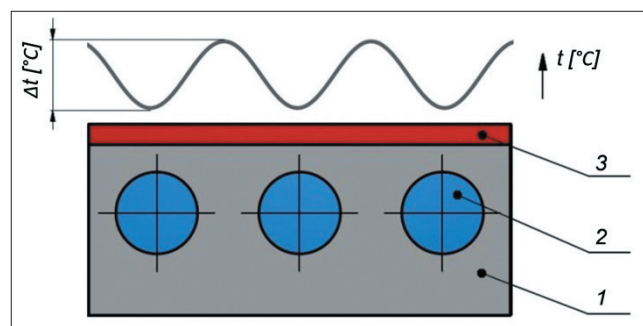


Rys. 2. Prawidłowe rozmieszczenie kanałów chłodzących: 1 – wkład formujący, 2 – kanał chłodzący, 3 – wypraska [10]

**TABLICA. Zalecane wymiary i rozstawienie kanałów chłodzących [10]**

Średnica $D$ , mm	6	8	10	12	14	16	18	20
Odległość od powierzchni formującej $y$ , mm	7	10	13	18	22	28	34	40
Rozstaw $x \approx 1,7 D$ , mm	10	14	17	20	24	27	30	34

Rozmieszczenie kanałów musi zapewniać równomierny rozkład temperatury na powierzchni gniazda formującego. Nieprawidłowo zaprojektowany układ chłodzenia może wywoływać zbyt duży gradient temperatury na powierzchni chłodzonej. Zaleca się, aby chłodzenie zmniejszało się w kierunku drogi płynięcia tworzywa [4]. Na rys. 3 przedstawiono nieodpowiednie ulokowanie kanałów chłodzących i widoczny wzrost gradientu temperatury powierzchni.



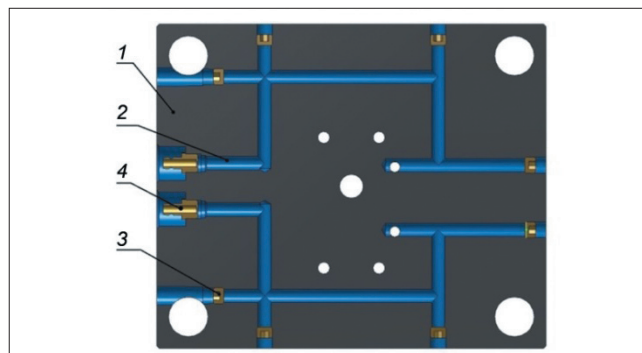
Rys. 3. Nieprawidłowe rozmieszczenie kanałów chłodzących: 1 – wkład formujący, 2 – kanał chłodzący, 3 – wypraska [10]

Przy projektowaniu układu chłodzenia należy mieć również na uwadze długość drogi przepływu medium chłodzącego przez formę wtryskową. Całkowita długość kanałów powinna być możliwie najkrótsza, aby zapewnić minimalną różnicę temperatury chłodziwa na wejściu i wyjściu, nie większą niż  $2 \div 3$  °C [10]. Niewielka różnica zapewnia równomierne odbieranie ciepła od wypraski we wszystkich strefach gniazda formującego.

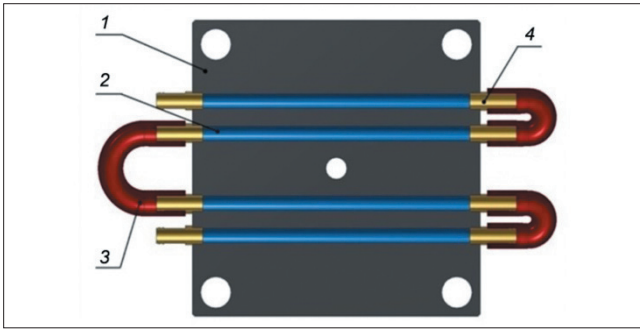
### Sposoby chłodzenia form wtryskowych

Konwencjonalne układy chłodzenia form opierają się na prostych otworach wierconych w elementach formy (wkładach formujących, stemplach oraz płytach stemplowych i matrycowych). Stosowanie takich rozwiązań narzuca ograniczenia geometryczne w kształcie i przebiegu kanałów chłodzących, a tym samym w przepływie medium i odbiorze ciepła [5]. Dążenie do ulepszania oraz zwiększania wydajności technologii wtryskiwania skutkuje opracowywaniem nowoczesnych systemów chłodzenia form wtryskowych. Należą do nich m.in. układy kanałów konformalnych, chłodzenie konturowe oraz technologia BFMOLD® (Ball Filled MOLD) [11].

■ **Konwencjonalne układy chłodzenia.** Konwencjonalne układy chłodzenia opierają się na otworach wierconych w elementach form wtryskowych. To najczęściej stosowane rozwiązanie ze względu na łatwość wykonania



Rys. 4. Kanały chłodzące w płycie matrycowej – łączenie kanałów za pomocą korków zaślepiających: 1 – płyta matrycowa, 2 – kanał, 3 – korek zaślepiający, 4 – końcówka złącza



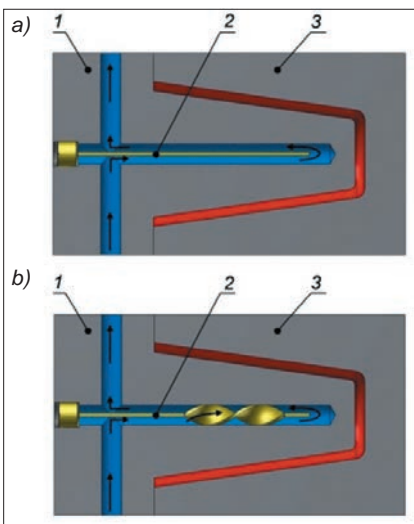
Rys. 5. Kanały chłodzące wykonane w płycie matrycowej – łączenie kanałów za pomocą elastycznych węży: 1 – płyta matrycowa, 2 – kanał, 3 – elastyczny węzeł, 4 – końcówka złącza

oraz stosunkowo niski koszt. Na rys. 4 i 5 przedstawiono typowe układy wykonane w płytach matrycowych. Łączenie otworów wywierconych w jednym kierunku odbywa się poprzez wykonanie otworów poprzecznych (rys. 4) lub też przez umieszczenie na zewnątrz formy elastycznych węży (rys. 5).

Wykonanie wielu kanałów chłodzących wiąże się z koniecznością zaślepienia części z nich, ponieważ każdy układ (każda strefa) ma zazwyczaj jedno wejście i jedno wyjście. W takich przypadkach stosuje się korki zamykające, wykonane najczęściej z miedzi oraz jej stopów. Wadą tego sposobu jest możliwość występowania przecieków, które mogą zakłócić prawidłowe funkcjonowanie systemu chłodzenia.

Największy problem związany z utrzymaniem odpowiedniej temperatury występuje przy formach z ruchomymi rdzeniami oraz długimi częściami stemplowymi, ponieważ bardzo trudno zapewnić w tych elementach skuteczny przepływ cieczy. W połączeniu z małą pojemnością cieplną powoduje to szybkie nagrzewanie się powierzchni do temperatury uniemożliwiającej często poprawne wykonanie wypraski [5]. W takich przypadkach konieczne staje się stosowanie wielu dodatkowych elementów, w które należy wyposażyć układ chłodzący.

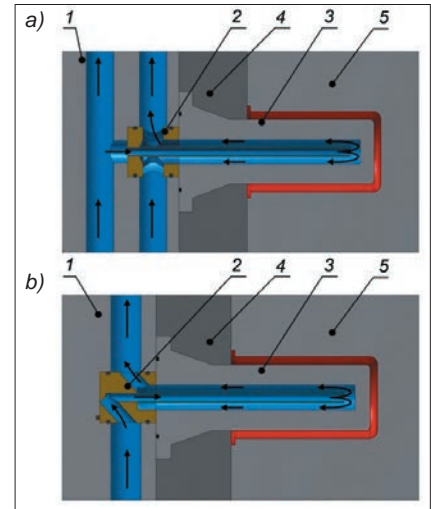
Na rys. 6 przedstawiono sposób chłodzenia stempla z wykorzystaniem przegrody prostej oraz spiralnej (strzałkami oznaczono kierunek obiegu cieczy). Konstrukcja takiego układu polega na wykonaniu nieprzelotowych otworów w stemplu i umieszczeniu w nich przegród wyznaczających kierunek przepływu chłodziwa. Wadą układu z przegrodą prostą jest różnica temperatury występująca po obu jej stronach – niższa temperatury po stronie wlotu, wyższa po stronie wylotu. Tę niedogodność można zniwe-



Rys. 6. Chłodzenie stempla z wykorzystaniem przegród: a) przegroda prosta, b) przegroda spiralna; 1 – płyta stemplowa, 2 – przegroda, 3 – matryca

lować poprzez zastosowanie przegród spiralnych. W przypadku wyprasek cienkościennych (grubość ścianki poniżej 0,8 mm) taka różnica temperatury może powodować niedolewy, a tym samym wadliwe wykonanie elementów [4].

Innym sposobem chłodzenia długich stempli jest wykorzystanie dysz chłodzących. Dysze mogą występować w układzie szeregowym bądź równoległym. Na rys. 7 zaprezentowano przykładowe wykorzystanie tych elementów w konstrukcji form wtryskowych.



Rys. 7. Chłodzenie stempli z wykorzystaniem dysz chłodzących: a) dysza równoległa, b) dysza szeregowo; 1 – płyta stemplowa, 2 – dysza chłodząca, 3 – stempel, 4 – oprawa stempla, 5 – matryca

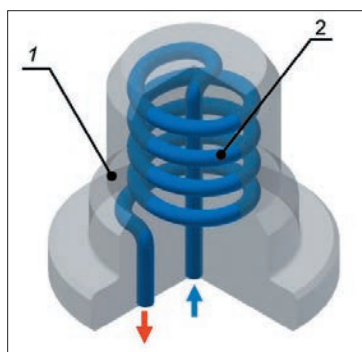
Stosowanie dysz w układach chłodzenia niesie szereg korzyści. Można do nich zaliczyć:

- możliwość pracy w dowolnej orientacji,
- prostą instalację,
- możliwość stosowania dysz o różnej długości,
- niskie ciśnienie zwrotne układu (niski spadek ciśnienia).

W przypadku użycia dysz szeregowych w płycie stemplowej wykonuje się jeden otwór, którego oś jest prostopadła do osi dyszy. Wykorzystanie dysz równoległych oznacza konieczność wykonania dwóch równoległych otworów. Przy chłodzeniu szeregowym medium dostarczane jest jedną drogą dopływu do kolejnych stempli – zwiększenie drogi chłodzenia powoduje wzrost różnicy temperatury pomiędzy poszczególnymi gniazdami. Dysze równoległe zapewniają jednakową temperaturę wszystkich gniazd – środek chłodzący doprowadzany jest jednocześnie do wszystkich stempli z jednego kanału zbiorczego. Ten zabieg pozwala uzyskać równomierną dynamikę chłodzenia. Wadą chłodzenia w układzie równoległym jest konieczność wykonania większej liczby kanałów, co oznacza wzrost skomplikowania konstrukcji formy wtryskowej.

■ **Chłodzenie konformalne.** Wraz z rozwojem technik przyrostowych w produkcji narzędzi (*rapid tooling*) rozwijają się układy chłodzenia oparte na kanałach konformalnych [9]. Chłodzenie konformalne pozwala na prowadzenie kanałów blisko powierzchni formujących, dostosowanych do kształtu formowanego wyrobu. Przekrój poprzeczny kanałów przyjmuje różne, właściwie nieograniczone kształty, co pozwala na efektywniejszy odbiór ciepła z wypraski.

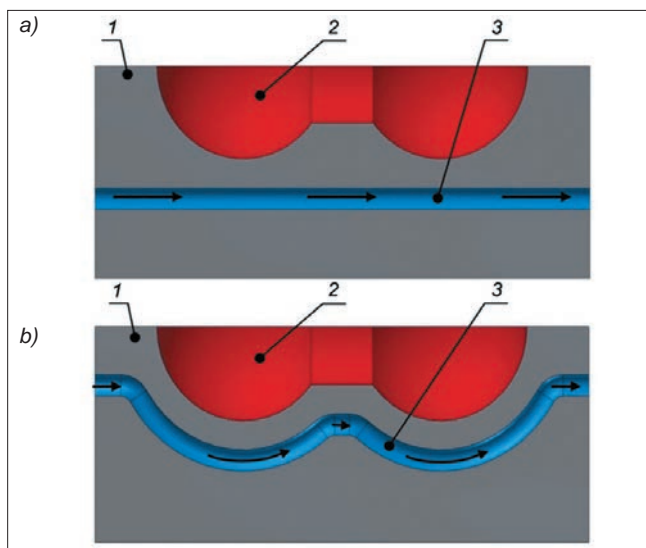
Na rys. 8 zaprezentowano przykładowe kształty kanałów konformalnych. Dowolną geometrię układu chłodzenia można zrealizować z wykorzystaniem metod przyrostowych, np. technologii laserowego przetapiania proszków metali (DMLS – *direct metal laser sintering* lub SLM – *selective laser melting*). Metody te pozwalają na wykonanie skomplikowanego układu chłodzenia w trudno dostępnych miejscach, co byłoby nieosiągalne tradycyjnymi metodami ubytkowymi [9].



Rys. 8. Przykład stempla z kanałem konformalnym: 1 – stempel, 2 – kanał konformalny

W metodzie DMLS wkładka formująca jest budowana warstwa po warstwie, a promień lasera topi tylko te obszary, które mają zostać połączone z wcześniej nałożoną warstwą. Taka technika umożliwia dowolne prowadzenie kanałów chłodzących, które mogą przebiegać w równej odległości od powierzchni formującej, co pozwala na osiągnięcie równomiernej temperatury na powierzchni gniazda formującego.

Na rys. 9a pokazano przekrój wkładki formującej, w której zastosowano tradycyjny kanał chłodzący w postaci wierconego otworu. Obieg chłodziwa w takim kanale ma z reguły charakter turbulentny, co powoduje powstawanie dużych oporów przepływu i pojawianie się poważnych spadków ciśnienia chłodziwa.



Rys. 9. Zestawienie układów chłodzenia: a) kanał konwencjonalny, b) kanał konformalny; 1 – wkładka formująca, 2 – gniazdo formujące, 3 – kanał chłodzący

Kolejną charakterystyczną cechą konwencjonalnego układu termostatowania jest to, że odległość kanału chłodzącego od powierzchni formującej jest inna w każdym miejscu formy, dlatego odbiór ciepła z poszczególnych stref gniazda jest nierównomierny. Przyczynia się to do zróżnicowanego rozkładu temperatury na powierzchni formującej.

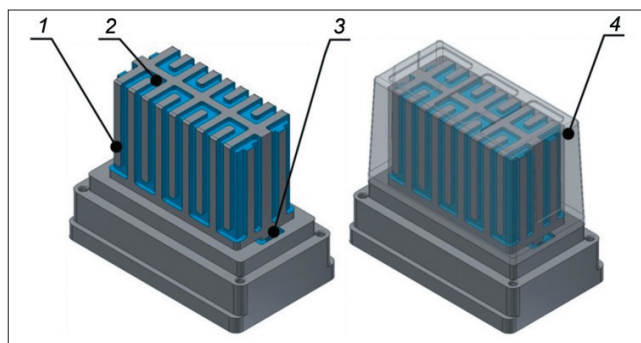
Układ chłodzenia konformalnego (rys. 9b) nie ma tych wad. Kształt kanału odzwierciedla kształt gniazda, co zapewnia zachowanie stałej odległości pomiędzy kanałem a powierzchnią formującą. Zastosowanie tej technologii, oprócz zasadniczego skrócenia czasu cyklu wtryskiwania i możliwości intensywniejszego chłodzenia, daje cały szereg innych korzyści [5]:

- selektywny odbiór strumienia ciepła z poszczególnych obszarów wypraski, a tym samym możliwość wytworzenia gradientu struktury,

- zmniejszenie deformacji wyprasek poprzez dynamiczny i równomierny odbiór ciepła,
- chłodzenie stempli, trzpieni oraz rdzeni z zastosowaniem jednego lub kilku kanałów,
- wyższą precyzję kontroli temperatury formy wtryskowej.

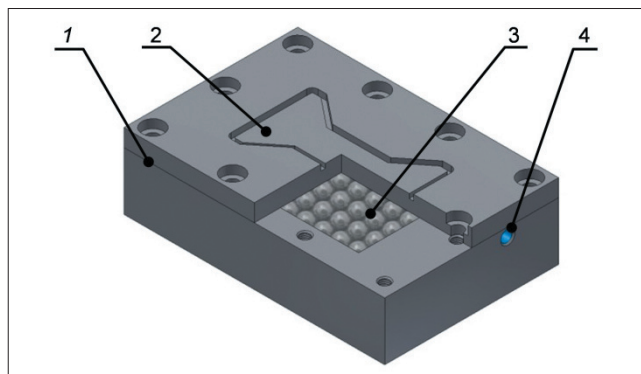
■ **Chłodzenie konturowe.** Chłodzenie konturowe polega na wykonaniu frezowanych kanałów chłodzących na rdzeniu stempla, na który nakłada się oprawkę. Poprowadzenie kanałów chłodzących blisko powierzchni umożliwia dobre odwzorowanie kształtu wypraski, a zatem wzrost wydajności odbioru ciepła z tworzywa sztucznego (rys. 10).

Do zalet układu chłodzenia konturowego należy intensywny odbiór ciepła z wypraski ze względu na dużą objętość przepływu medium chłodzącego oraz równomierny rozkład temperatury na powierzchni formującej. Minusami chłodzenia konturowego są konieczność zapewnienia szczelności połączenia rdzenia stempla z oprawką oraz ograniczone stosowanie – w przypadku chłodzenia płyt stemplowych /matrycowych o małej grubości frezowane kanały mogą znacznie zredukować ich właściwości wytrzymałościowe.



Rys. 10. Przykład stempla z układem chłodzenia konturowego: a) stempel, b) złożenie stempla z oprawką; 1 – stempel, 2 – frezowane kanały chłodzące, 3 – kanał doprowadzający, 4 – oprawka stempla

■ **Chłodzenie w technologii BFMOLD®.** Technologia BFMOLD® jest opatentowaną przez brytyjski koncern Witmann Group metodą dynamicznej regulacji temperatury formy wtryskowej. Kontrola temperatury polega na stosowaniu dwóch obiegów cieczy. Jeden obieg wykorzystywany jest do podstawowej regulacji temperatury formy, natomiast drugi, zlokalizowany w okolicach gniazda formującego, służy do podniesienia jego temperatury. Innowacją jest wykonanie kieszeni wewnątrz wkładu formującego i wypełnienie kulkami. Wsyp kulkowy zapewnia odpowiednią sztywność formy oraz równomierny rozkład temperatury na powierzchni formującej [11]. Na rys. 11



Rys. 11. Wkładka formująca BFMOLD®: 1 – dwuczęściowa wkładka formująca, 2 – gniazdo formujące, 3 – kieszeń z wypełnieniem kulkowym, 4 – wlot cieczy chłodzącej

zaprezentowano wkład formujący wykonany w technologii BFMOLD®.

W momencie ogrzewania/chłodzenia obieg wody przepuszczany jest przez wnękę z kulkami, co zapewnia efektywną regulację temperatury powierzchni formującej. Do zalet tej metody zalicza się [11]:

- zwiększenie wydajności produkcji poprzez skrócenie czasu cyklu,
- dynamiczną regulację temperatury poprzez zwiększenie powierzchni czynnej wymiany ciepłej,
- zminimalizowanie zniekształceń wyprasek oraz poprawę jakości ich powierzchni,
- uniknięcie wad wyprasek, takich jak: widoczne punkty wtrysku i widoczne linie łączenia.

### Podsumowanie – kierunki rozwoju

Analizując cykl wtryskiwania pod względem jakości uzyskiwanych wyrobów oraz powtarzalności produkcji, można stwierdzić, że najważniejszy jest proces termostatowania formy wtryskowej, związane z nim urządzenia oraz system kanałów chłodzących. Efektywne, dynamiczne i równomierne chłodzenie tworzywa w formie wpływa na właściwości fizyczne, jakość i estetykę wyprasek oraz pozwala skrócić czas cyklu. To z kolei wiąże się z wy ceną produktu finalnego i opłacalnością produkcji.

Poszukiwanie innowacyjnych systemów chłodzenia form wtryskowych, zapewniających równomierny i dynamiczny odbiór ciepła, staje się wyzwaniem, z którym powinna się zmierzyć współczesna inżynieria. W Instytucie Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej prowadzone są badania, których przedmiotem jest opracowanie systemów chłodzenia form wtryskowych opartych na

zwiększeniu czynnej wymiany ciepłej pomiędzy wkładką formującą a cieczą chłodzącą poprzez wykorzystanie odpowiednio ukształtowanych wkładów. Badane rozwiązania zakładają zastosowanie elementów porowatych oraz kanałów uźebrowanych o różnej geometrii.

**Praca została wykonana w ramach projektu LIDER/006/143/L-5/13/NCBR/2014 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.**

### LITERATURA

1. Beamont J.P. "Runner and gating design handbook – tool for successful injection molding – 2<sup>nd</sup> ed.". Ohio, USA: Hanser Gardner Publications, 2007.
2. Fisher J.M. "Handbook of molded part shrinkage and warpage". Norwich, USA: Plastic Design Library, William Andrew Inc. 2003.
3. Sikora R. „Przetwórstwo tworzyw wielocząsteczkowych”. Warszawa: Wydawnictwo Edukacyjne Zofii Dobkowskiej, 1993.
4. Zawistowski H., Frenkler D. „Konstrukcja form wtryskowych do tworzyw termoplastycznych”. Warszawa: WNT, 1984.
5. Postawa P. „Chłodzenie konformalne form wtryskowych”. *Teka Kom. Bud. Eksp. Masz. Elektrotech. Bud. T. II* (2008): s. 129÷132.
6. Berger G.R., Gruber D.P., Friesenbichler W., Teichert C., Burgsteiner M. "Replication of stochastic and geometric structures: aspects of visual appearance". *International Polymer Processing*. Vol. 226, No. 3 (2011): pp. 313÷322.
7. Chen S.C., Jong W.R., Chang J.A. "Dynamic mold surface temperature control using induction heating and its effects on the surface appearance of weld line". *Journal of Applied Polymer Science*. Vol. 101, No. 2 (2006): pp. 1174÷1180.
8. Dawkins E., Engelmann P., Horton K. "Color and gloss – the connection to process conditions". *Journal of Injection Molding Technology*. Vol. 2, No. 1 (1998): pp. 1÷7.
9. Grünberg T., Domröse R. "Direct Metal Laser Sintering: Identification of process phenomena by optical in-process monitoring". *Laser Technik Journal*. Vol. 12, No. 1 (2015): pp. 45÷48.
10. *Moldflow Design Guide*. First edition. Materiały techniczne firmy Moldflow, 2006.
11. www.wittmann-group.com (dostęp: 20.04.2016).