

Wpływ zastosowania stopów wysokoprzewodzących na proces wtryskiwania tworzyw sztucznych

Effect of high heat conductive alloys on injection molding process

PRZEMYSŁAW POSZWA
MAREK SZOSTAK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.8-9.115>

Prezentowano wpływ wkładek wykonanych z materiałów o dużej przewodności cieplnej na proces wtryskiwania tworzyw sztucznych. Skoncentrowano się na dwóch kluczowych wielkościach: deformacji oraz czasie cyklu. Przeprowadzone analizy wykazały korzystny wpływ zastosowania stopów wysokoprzewodzących na deformację oraz czas chłodzenia, jednak wielkość tego wpływu jest ściśle związana z geometrią produkowanej wypraski.

SŁOWA KLUCZOWE: tworzywa sztuczne, wtryskiwanie, stopy wysokoprzewodzące, chłodzenie, deformacje

Presented in this work is the effect of using the inserts made from materials of high thermal conductivity on molding process of plastics. Authors focused on two key process parameters i.e. deformation and cycle time. Performed analyses have shown beneficial effects of the use of high conductivity alloys on deformation and cooling time, but the extend of these effects is closely related to the geometry of the produced mold.

KEYWORDS: plastics, injection molding, high conductivity alloys, cooling, deformation

Konstrukcja formy wtryskowej ma bardzo duży wpływ na realizację procesu wtryskiwania. Podstawowym czynnikiem decydującym o długości fazy chłodzenia jest geometria układu chłodzącego. Istotne jest odpowiednie dobranie średnicy kanałów chłodzących D , odległości między kanałami D_{sp} oraz odległości kanałów od powierzchni gniazda form D_h (tabl. I).

TABLICA I. Parametry geometryczne układów chłodzenia (najczęściej stosowane średnice kanałów chłodzących zaznaczono kolorem czerwonym) [1]

D , mm	6	8	10	12	14	16	18	20
D_h , mm	7	10	13	18	22	28	34	40
D_{sp} , mm	10	14	17	20	24	27	30	34

W literaturze oraz materiałach przygotowywanych przez producentów tworzyw spotyka się dane ułatwiające konstruktorom form prawidłowe zaprojektowanie układu chłodzenia [1–3]. Z drugiej strony tego typu informacje są przydatne głównie w przypadku prostych geometrii o równomiernej grubości ściany wypraski. Niestety, w dzisiejszych czasach coraz więcej elementów z tworzyw sztucznych cechuje się bardzo grubymi ściankami – dotyczy to zwłaszcza części dla branży motoryzacyjnej. Skomplikowane kształty oraz grube ścianki utrudniają prawidłową realizację odbioru ciepła. Grube ścianki powodują również wydłużenie fazy chłodzenia.

Drugą równie istotną wielkością są deformacje wyprasek, powodujące problemy z zachowaniem założonych tolerancji wymiarowych. W trakcie zestalania wypraski

dochodzi do skurczu tworzywa, lecz jego braki są uzupełniane w trakcie fazy docisku, dzięki czemu skurcz jest minimalizowany. Niestety, finalny wyrób i tak ulega pomniejszeniu, co kompensuje się odpowiednim przeskalowaniem gniazda. Kłopot polega jednak na tym, że z powodu niejednorodnej grubości i skomplikowanego kształtu wypraski dobranie odpowiedniej kompensacji bez narzędzi symulacyjnych jest praktycznie niemożliwe, a poza tym nie zawsze prowadzi do całkowitego rozwiązania problemu deformacji. Pomimo dobrze dobranej kompensacji skurczu wypraska może ulec deformacji ze względu na jej konstrukcję lub problemy z równomiernym odbiorem ciepła.

Zakładając, że przeznaczenie detalu wymaga ściśle określonej konstrukcji wypraski i nie ma możliwości jej modyfikacji, pozostaje wykorzystanie układu chłodzenia do redukcji deformacji. Jest to możliwe poprzez zwiększenie szybkości odbioru ciepła [4]. Również zwiększenie jednorodności odbioru ciepła pozwala na zmniejszenie deformacji powstających na skutek różnej szybkości chłodzenia poszczególnych fragmentów wypraski [5]. Kolejnym sposobem jest skuteczne schłodzenie niewralgicznych miejsc, w których występujący skurcz tworzywa powoduje deformację.

Sprawny odbiór ciepła, pozwalający na redukcję czasu chłodzenia, a także ograniczenie deformacji wyprasek zapewnia się przez zastosowanie stopów o wysokiej przewodności cieplnej, takich jak AMPCO czy Moldmax [6]. Cechują się one przewodnością cieplną 2÷6 razy większą od przewodności typowej stali narzędziowej. Odwrotnością przewodności jest opór cieplny. Materiały wysokoprzewodzące stawiają 2÷6 razy mniejszy opór na drodze transportu ciepła. Odpowiada to sytuacji, gdy kanały chłodzące znajdowałyby się 2÷6 razy bliżej powierzchni niż w przypadku zastosowania stali narzędziowej [7–9].

Symulacje transportu ciepła oraz deformacji wypraski

W celu porównania procesu chłodzenia różnych rozwiązań wykorzystano oprogramowanie Autodesk Moldflow Insight Standard 2017, które umożliwia przeprowadzenie uśrednionej w czasie analizy chłodzenia formy wtryskowej. Analiza uśredniona w czasie przedstawia rozkład średniej temperatury w formie wtryskowej i jest bardzo wygodna przy porównywaniu różnych rozwiązań.

Do określenia wielkości deformacji wypraski również wykorzystano wspomniane oprogramowanie. Po przeprowadzeniu pełnej analizy chłodzenia, wypełniania gniazda oraz fazy docisku pozwala ono przewidzieć deformację wypraski.

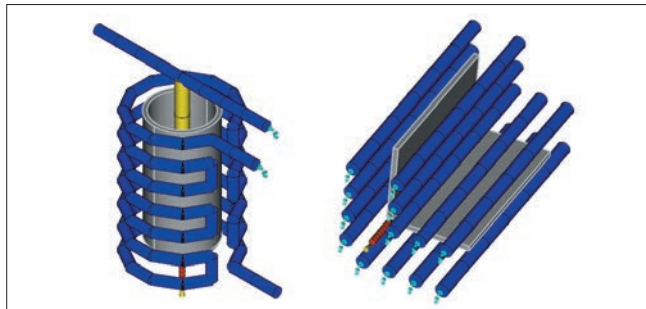
W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki symulacji chłodzenia oraz deformacji dla trzech różnych geometrii wyprasek, tj. dla:

- płaskiej płyty o wymiarach 100×100 mm i grubości 3 mm (punkt wtrysku na środku cienkiej ścianki) – przykład P1 bardzo prostej geometrii;

* Mgr inż. Przemysław Poszwa (przemyslaw.b.poszwa@doctorate.put.poznan.pl), dr hab. inż. Marek Szostak (marek.szostak@put.poznan.pl) – Instytut Technologii Materiałów Politechniki Poznańskiej

- tuby zamkniętej z jednej strony, o średnicy zewnętrznej 50 mm, wysokości 100 mm i grubości 3 mm z trzema różnymi zaokrągleniami krawędzi między dnem a ścianą boczną (punkt wtrysku centralnie w środek dna) – przykład P2 geometrii z utrudnionym odbiorem ciepła (rys. 1);
- kątownika o boku 50 mm i długości 100 mm (punkt wtrysku na cienkiej ścianie w obszarze krawędzi) – przykład geometrii P3 z dużymi deformacjami (rys. 1).

W każdym przypadku wykorzystano gorącokanałowy układ dolotowy o średnicy 4 mm, przewężce stożkowej o długości 3 mm o średnicy końcowej 1,5 mm.



Rys. 1. Geometrie wyprasek P2 (z lewej) oraz P3 (z prawej) wraz z układami chłodzącymi i dolotowymi

Obliczenia przeprowadzono dla polipropylenu Moplen HP500N. Warunki przetwórstwa tego materiału (temperaturę tworzywa T_{melt} , temperaturę cieczy chłodzącej T_c , czas wtrysku t_{inj} , czas docisku t_p , czas otwarcia formy t_o , względne ciśnienie docisku p_p – względem ciśnienia maksymalnego w formie) wraz z parametrami geometrii układów chłodzących zebrano w tabl. II. W przypadku P2 podano promienie zewnętrzne R_{ext} i wewnętrzne R_{int} zaokrąglenia wypraski. Dla tej wypraski średnica przegrody wyniosła 10 mm oraz była oddalona od dna o D_h . W przypadku analiz deformacji symulacje zostały przeprowadzone dla sytuacji, gdzie czas chłodzenia był równy czasowi potrzebnemu do wyjęcia wypraski z formy.

TABLICA II. Parametry wykorzystane w symulacji

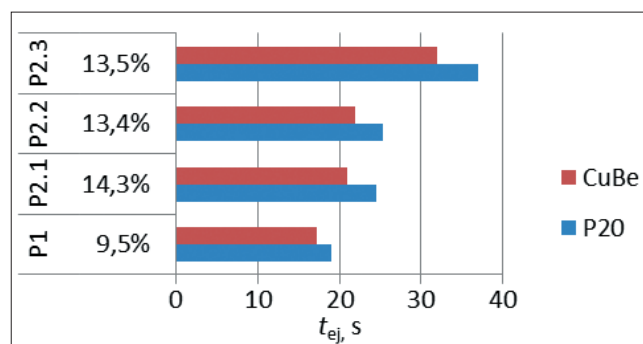
Parametry procesu					
$T_{melt}, ^\circ C$	$T_c, ^\circ C$	t_{inj}, s	t_p, s	t_o, s	$p_p, \%$
235	25	1,2/2,2/2 (P1/P2/P3)	10	1	80
Geometria układu chłodzenia			Promienie P2.1/2.2/2.3		
D, mm	D_h, mm	D_{sp}, mm	R_{int}, mm	R_{ext}, mm	
8	12	18	1,5/1,5/4,5	6/4,5/4,5	
Kryteria usuwania wypraski z formy					
$P_s, \%$	$T_p, ^\circ C$	$T_{mold}, ^\circ C$			
100	107	35			

W tabl. II zawarto również kryteria wyjęcia wypraski z formy, tj. procent zestalonego tworzywa P_s , temperaturę wyjęcia wypraski z formy T_p oraz temperaturę formy T_{mold} . W symulacjach założono, że minimalna prędkość przepływu cieczy chłodzącej w kanałach będzie na tyle duża, że zostanie osiągnięta liczba Reynoldsa równa 10 000. W celu określenia wpływu wysokiej przewodności formy przeprowadzono symulacje, w których przyjęto, że materiałem formy jest nie stal narzędziowa P20 (40CrMnMo9), lecz brąz berylowy (CuBe). W rzeczywistym procesie zostanie użyta forma, której tylko tzw. wkładki formujące będą wykonane ze stopu wysokoprzewodzącego, ponieważ zastosowanie tego materiału na fragmentach formy daleko położonych od powierzchni gniazda formującego nie wpłynie na proces chłodzenia, a jedynie podniesie koszty produkcji.

Wyniki symulacji

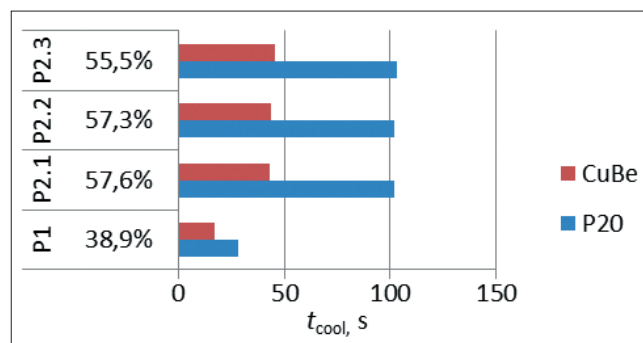
W opracowanych wynikach (rys. 2–6) oprócz nazwy wariantu podano również informację o procentowej zmianie danej wielkości pod wpływem zastosowania stopu o wysokiej przewodności cieplnej.

Pierwszą analizowaną wielkością był czas potrzebny do zestalenia wypraski (rys. 2). Był to minimalny czas, po którym cała wypraska uległa zestaleniu. Na tej podstawie widać, że dla prostej geometrii skrócenie czasu cyklu jest mniejsze niż w przypadku geometrii bardziej złożonych. Ze względu na różną geometrię krawędzi (i tym samym wyraźne różnice grubości w tym trudno dostępnym obszarze) zaobserwowano bardzo duże różnice czasu chłodzenia. Jest to spowodowane tym, że tworzywa sztuczne są izolatorami cieplnymi i bardzo trudno oddają ciepło. Niewielka zmiana grubości wywołuje zatem dużą zmianę czasu chłodzenia.



Rys. 2. Minimalny czas potrzebny do wyjęcia wypraski z formy (t_{ej})

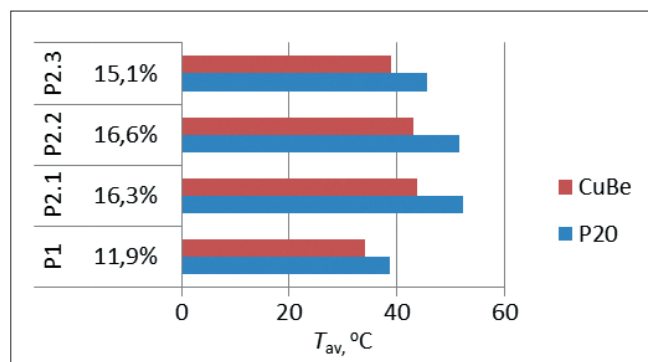
Wyznaczone skrócenie czasu cyklu jest mniejsze niż podawane w literaturze [10]. Wynika to z faktu, że we wspomnianej publikacji autorzy skupili się jedynie na temperaturze formy, a nie na temperaturze wypraski. Oczywiście minimalny czas chłodzenia nie gwarantuje odpowiedniej temperatury formy – z tego powodu przeanalizowano również wariant, w którym forma osiągnęła temperaturę T_{mold} (rys. 3). W tej sytuacji zaobserwowano, że zastosowanie stopu o wysokiej przewodności cieplnej drastycznie skróciło czas cyklu – w przypadku bardziej skomplikowanych wyprasek nawet o ponad 55%.



Rys. 3. Czas chłodzenia wyznaczony z uwzględnieniem założonej temperatury formy wtryskowej (t_{cool})

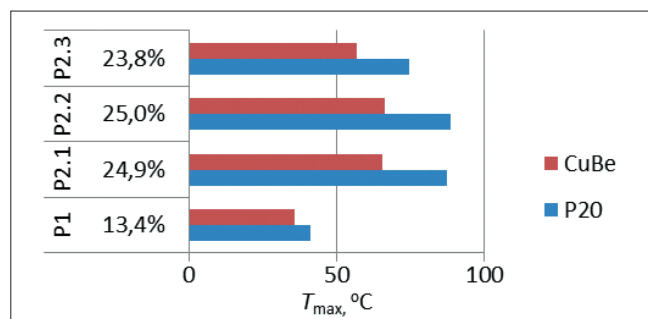
Kolejnymi analizowanymi wielkościami były średnia oraz maksymalna temperatura na powierzchni gniazda formującego dla czasu chłodzenia równego minimalnemu czasowi potrzebnemu do wyjęcia wypraski z formy (rys. 4 i 5). Należy pamiętać, że są to wielkości uśrednione w trakcie całego cyklu. Na podstawie symulacji widać, że w przypadku prostej geometrii P1 obniżenie jednej i drugiej temperatury jest zdecydowanie mniejsze niż w przypadku P2. Warto

zwrócić uwagę, że w obrębie geometrii P2 różnice między poszczególnymi przypadkami są nieznaczne, co jest efektem trudności z odbiorem ciepła z obszaru krawędzi.



Rys. 4. Średnia temperatura na powierzchni gniazda (T_{av})

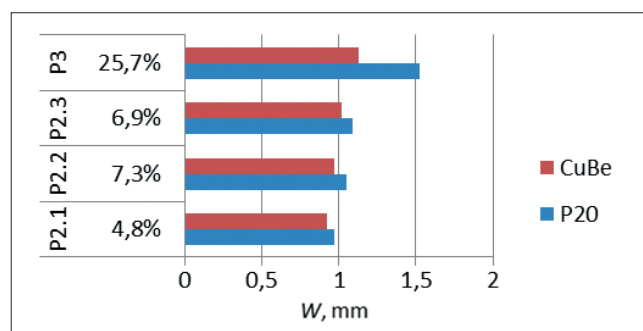
Należy również zauważyć, że zastosowanie CuBe nie tylko przyczyniło się do obniżenia obu temperatur, lecz także wyraźnie zmniejszyło różnicę między średnią i maksymalną temperaturą, a więc spowodowało ujednorodnienie rozkładu temperatury na powierzchni gniazda formującego. Ujednorodnienie rozkładu temperatury jest ważne w przypadku złożonych wyprasek, gdyż wpływa zarówno na naprężenia własne, jak i wielkość deformacji. Ze względu na prostotę geometrii P1 omawiany efekt jest niezauważalny, ponieważ w tym przypadku nie dochodzi do gromadzenia się ciepła. Zastosowanie CuBe spowodowało, że czas potrzebny do wychłodzenia formy wyniósł zaledwie 5 s, lecz z drugiej strony ograniczające było kryterium zestalenia wypraski w 100%, przez co wyznaczony czas chłodzenia był dużo dłuższy.



Rys. 5. Maksymalna temperatura na powierzchni gniazda (T_{max})

Ostatnią analizowaną wielkością była deformacja wyprasek. Ze względu na prostotę kształtu P1 nie poddano go analizie.

W badanych wariantach wypraski P2 zaobserwowano niewielkie zmiany deformacji mierzonej jako skrócenie wymiaru w kierunku osi symetrii. Wynika to z dużej sztywności tej geometrii. Aby lepiej zwizualizować wpływ CuBe na deformację, wykorzystano geometrię P3, która naturalnie ma tendencję do deformowania się tak, że kąt między ścianami będzie mniejszy niż 90°. Przeanalizowano maksymalne przemieszczenie ściany w kierunku prostopadłym do niej. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że nieskompensowane przemieszczenie wynosi aż 1,5 mm, a w przypadku zastosowania CuBe deformacja ulega zmniejszeniu do ok. 1,15 mm. Źródłem tej zmiany jest szybszy odbiór ciepła oraz mniejszy skurcz w obszarze krawędzi powodującej deformację. Oznacza to, że zastosowanie stopu wysokoprzewodzącego pozwala na bardzo znaczące zmniejszenie deformacji w przypadku geometrii mających tendencję do paczienia.



Rys. 6. Deformacje wyprasek (W)

Podsumowanie

Zastosowanie wkładek ze stopów wysokoprzewodzących istotnie wpływa na proces formowania wtryskowego wyrobów z tworzyw sztucznych. Stopy te umożliwiają zredukowanie czasu cyklu wtryskiwania – zarówno czasu potrzebnego do wyjęcia wypraski z formy, jak i czasu wymaganego do zachowania odpowiedniej temperatury formy. Zastosowanie tych stopów pozwala również na obniżenie średniej temperatury na powierzchni gniazda z jednoczesnym zwiększeniem jej jednorodności, co ma duży wpływ na deformacje wynikające z niejednorodności chłodzenia.

Bardzo duży wpływ na wielkość omawianych zmian ma geometria wypraski. W przypadku prostych geometrii korzyści płynące z zastosowania stopów o wysokiej przewodności cieplnej są zdecydowanie mniejsze.

Przeprowadzone analizy pokazały ponadto, że w przypadku nadmiernego pogrubienia ścian zastosowanie CuBe nie przyczynia się do znaczącego ograniczenia chłodzenia.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że stopy wysokoprzewodzące wpływają również na deformacje wyprasek, a wielkość tego wpływu zależy od geometrii wypraski. W przypadku sztywnych wyprasek, bez miejsc powodujących znaczące deformacje, wpływ CuBe będzie niewielki. Z drugiej strony w przypadku wyprasek łatwo ulegających deformacjom zastosowanie CuBe pozwala wyraźnie ograniczyć wielkość deformacji.

LITERATURA

1. Zawistowski H., Frenkler D. „Konstrukcja form wtryskowych do tworzyw termoplastycznych”. Warszawa: WNT, 1984.
2. *Part and Mold Design – A Design Guide*. Pittsburgh: Bayer Corporation, 2000.
3. *Eastman Polymers – Processing and mold design guidelines*. Kingport: Eastman Chemical Company, 2011.
4. Marques S., Souza A.F., Miranda J., Ydroitsau I. “Design of conformal cooling for plastic injection moulding by heat transfer simulation”. *Polímeros*. 25, 6 (2015): s. 564–574, <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.2047>.
5. Bula K., Kucharski D. „Analiza odkształceń wyprasek wtryskowych wytwarzanych w warunkach asymetrii temperatury formy”. *Przetwórstwo Tworzyw*. 3 (2013): s. 155–161.
6. “11 factors for efficient mold cooling – Balancing speed and quality to reduce cycle time”. Autodesk Inc., 2016.
7. Bohler-Uddeholm P20 Modified (technical datasheet). Elgin: Ohler-Uddeholm Corporation, 2013.
8. AMPCOLOY® 940 (technical datasheet). AMPCO METAL.
9. MOLDMAX XL® (technical datasheet). Uddeholm, 2004.
10. Kelly A.L., Mulvaney-Johnson L., Coates P.D. “Effect of copper alloy mold tooling on cycle time and product quality”. *67th Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers 2009*. Brookfield, Conn: Society of Plastics Engineers, 2009.