

Roman HUMIENNY*, Przemysław POSTAWA**, Tomasz STACHOWIAK**

*Plast-Zem Sp. z o.o. , ul. Poznańska 29; 66-200 Świebodzin, Zakład produkcyjny w Głogowie, ul. Transportowa 5, 67-200 Głogów

**Zakład Przetwórstwa Polimerów, Politechnika Częstochowska, ul. Armii Krajowej 19c, 42-201 Częstochowa, e-mail: postawa@ipp.pcz.pl

Optymalizacja kształtu wypraski poprzez analizę rozkładu temperatury na powierzchni wypraski z wykorzystaniem pomiarów termowizyjnych

Streszczenie: *Poprawnie zaprojektowany układ termostowania jest jednym z głównych czynników efektywnego ochładzania wyprasek wtryskowych w gnieździe formy a tym samym efektywności całości procesu wtryskiwania. Ponadto równomierne ochładzanie poszczególnych obszarów wypraski w formie powoduje ograniczenie do minimum naprężeń własnych i deformacji wypraski po jej wyjęciu z formy. Ze względu na funkcje wypraski nie zawsze możliwe jest zapewnienie jej równomiernej grubości ścianki co ułatwia uzyskanie równomiernego ochładzania w procesie wtryskiwania. Wypraski od których oczekiwana jest duża sztywność bardzo często są mocno uźebrowane, co pozwala oszczędzić materiał i uzyskać równomierną grubość ścianki, jednak powoduje dużą kumulację ciepła a tym samym konieczność większej intensywności jego odbioru z formy.*

Słowa kluczowe: *Deformacje postaciowe, naprężenia własne, analiza termowizyjna, wtryskiwanie*

MOLDING SHAPE OPTIMALIZATION BY ANALYSIS OF TEMPERATURE DISTRIBUTION ON THE MOLDING SURFACE USING THERMAL IMAGING CAMERAS

Abstract: *Properly designed system of temperature control is one of the guarantors of effective cooling of injection moldings in the mold cavity and thus the efficiency of the whole injection molding process. Furthermore uniform cooling of specific areas in the compact form reduces to a minimum the stresses and deformation of the molding after removal from the mold. Due to the function of the compact it is not always possible to ensure the uniform wall thickness which facilitates the uniform cooling in the injection molding process. Moldings of which is expected to be high rigidity are often ribbed, thus saving material and achieve a uniform wall thickness, however, results in a large accumulation of heat and needs more effective mold cooling systems.*

Keywords: *deformations, residua stresses, thermovision analysis, injection molding*

WSTĘP

Temperatura formy obok właściwości reologicznych i charakterystyki przepływu tworzywa w formie oraz wielu pozostałych parametrów procesu wtryskiwania stanowi jeden z najważniejszych czynników, kształtujących strukturę oraz późniejsze właściwości fizyczne otrzymanych wyprasek [1–3]. W szczególności dotyczy to tworzyw częściowo krystalicznych o małej

kinetyce procesu tworzenia się fazy krystalicznej. Ważna nie tylko jest wartość temperatury narzędzia, ale również jej równomierny rozkład. Temperatura oraz jej rozkład na powierzchni formy powinien zapewnić równomierne ochładzanie się wypraski w całej objętości. Z oczywistych względów (mała przewodność cieplna tworzyw polimerowych na poziomie 0,15–0,3 W/mK oraz zmiana współczynnika przewodnictwa ciepła wraz ze zmianą temperatury tworzywa pod-

czas jego zestalania) bardzo trudno jest zapewnić równomierne ochładzanie wypraski [4–8].

Powoduje to występowanie różnic w czasie ochładzania poszczególnych warstw i obszarów wypraski względem siebie co powoduje powstawanie naprężeń własnych, które z kolei powodują deformacje i paczanie się wyprasek. Analizując publikacje traktujące o tej tematyce [1, 5, 9–12] można stwierdzić, że równomierne pole temperatury formy powinno stosować się w przypadku wyprasek o równomiernym rozkładzie grubości ścianek, natomiast w przypadku wyprasek dla których grubość ścianki jest mocno zróżnicowana należy stosować mocno zróżnicowaną temperaturę formy. W miejscach o znacznej grubości należy intensywniej odbierać ciepło poprzez zagęszczenie kanałów chłodzących oraz stosowanie niższych wartości medium termostatującego. Należy jednak mieć na uwadze tworzącą się strukturę oraz zapewnienie innych właściwości i cech formowanych wyprasek.

CEL I ZAKRES BADAŃ

W części badawczej przedstawiono analizę termowizyjną wypraski o dużej sztywności z dużą ilością elementów uźebrowanych tuż po wyciągnięciu z formy wtryskowej. Zlokalizowano miejsca nagromadzenia ciepła w poszczególnych obszarach wypraski co pozwoliło określić wymagania dotyczące zmian w konstrukcji układu termostatowania narzędzia. Dalszym etapem będzie określenie właściwości strukturalnych uzyskanych w takich warunkach wyprasek wtryskowych.

ZASTOSOWANY MATERIAŁ, KSZTAŁT WYPRASKI I WARUNKI PROCESU WTRYSKIWANIA

Do badań wykorzystano wypraskę wtryskową techniczną o bardzo dużej sztywności. Sztywność wypraski osiągnięto poprzez zastosowanie bardzo skomplikowanego uźebrowania w obszarach o największej kumulacji

naprężeń podczas eksploatacji. Badana wypraska jest częścią systemu napędowego i przeniesienia ruchu poszczególnych podzespołów, zautomatyzowanych łóżek szpitalnych i została udostępniona przez firmę OCTO Actuators GmbH. Od elementów stosowanych w sprzęcie rehabilitacyjnym wymagana jest bardzo duża sztywność odporność na ścieranie i wytrzymałość kilka razy większa niż w rzeczywistości może wystąpić. Wynika to z faktu intensywnego użytkowania i częstego przemieszczania w warunkach operacyjnych. Zdjęcie analizowanej wypraski przed optymalizacją kształtu przedstawiono na rysunku 1.

Wypraski będące przedmiotem badań były wytwarzane z częściowo krystalicznego PA6 z 30% zawartością włókna szklanego, z wykorzystaniem formy dwugniazdowej zamontowanej na wtryskarce firmy Krauss Maffei KM-350CX o sile zwarcia 3500kN (350 ton). Forma wyposażona była w tradycyjny układ termostatowania wodnego. Wypraski wtryskiwano przy zastosowaniu następujących warunków przetwórstwa:

- ciśnienie wtrysku: 1400bar,
- czas wtrysku: 4s,
- ciśnienie docisku: 850bar/1s, 800bar/6s,
- czas docisku: 7s,
- temperatura wtrysku: 280°C,
- czas chłodzenia: 70s.

Wynikowy czas cyklu wynosił 100s, co dawało wydajność 36+36szt/h (razem 72szt/h).

Głównym problemem zdiagnozowanym podczas prób były deformacja i bark możliwości uzyskania płaskości produkowanych elementów (rys. 1), co w konsekwencji utrudniało późniejszy montaż i poprawną pracę z pozostałymi komponentami mechanizmu łóżka. Jak ustalono podczas wstępnych badań przyczyną tego stanu rzeczy było najprawdopodobniej niepoprawny kształt zaprojektowanej wypraski, który powodował kumulację ciepła i tym samym utrudnione ochładzanie obszarów odpowiedzialnych za późniejsze deformacje wypraski. W celu zgłębienia tego problemu posłużono się badaniami termowizyjnymi.

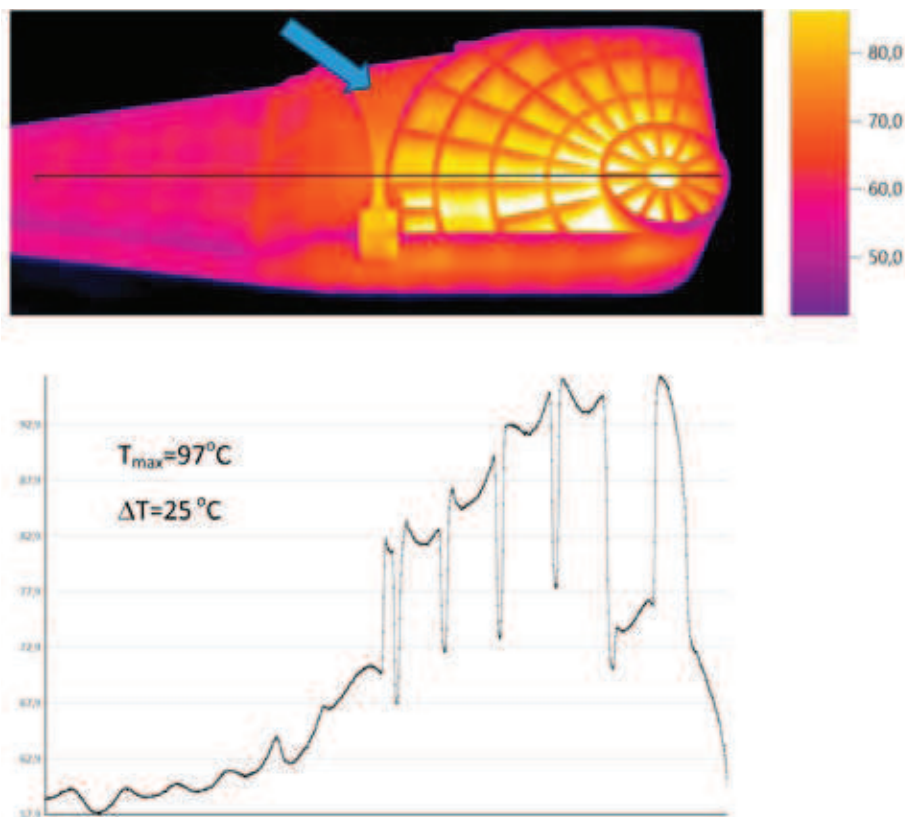


Rys. 1. Zdjęcia wypraski przed optymalizacją kształtu – widoczna deformacja przystających do siebie dwóch wyprasek
 Fig. 1. View of moldings before shape optimization – visible deformation of moldings

Dolna część wypraski jest płaska i mocno uźebrowana w celu wzmocnienia, natomiast w połowie wypraski na jej powierzchni widoczne jest „przełamanie”, które w konsekwencji może powodować odginanie się wypraski podczas ochładzania poza formą wtryskową. W celu analizy rozkładu temperatury wypraski po procesie wtryskiwania posłużono się analizą termowizyjną.

WYNIKI BADAŃ TERMOWIZYJNYCH

Obserwacje termowizyjne wykonano na wypraskach tuż po wyciągnięciu ich z formy wtryskowej. Badania wykonano z wykorzystaniem kamery termowizyjnej TESTO 890 o rozdzielczości przetwornika 640x480 pikseli w technologii „super resolution” i dokładności 30mK. Uzyskane wyniki poddano analizie w oprogramowaniu IRSoft 3.7.



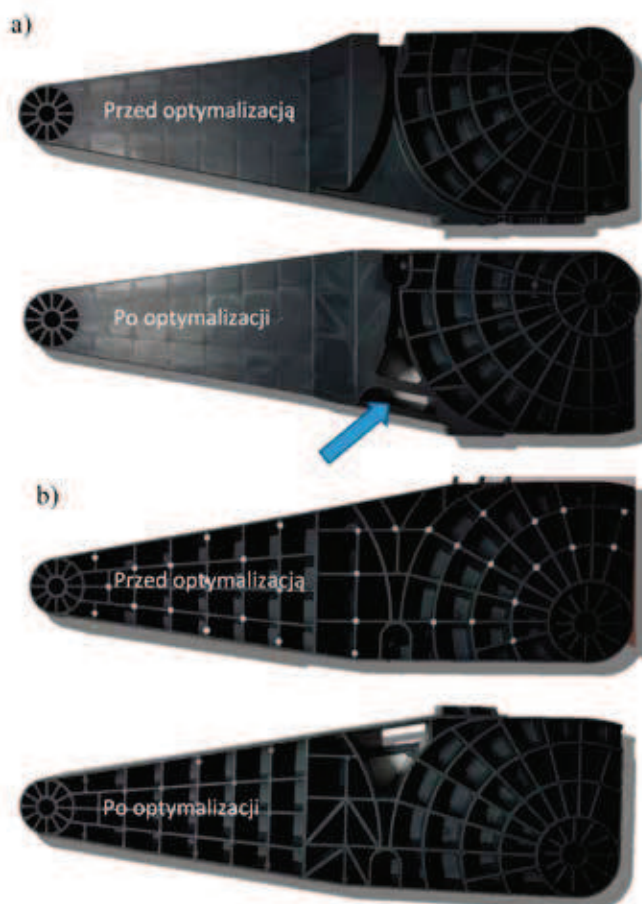
Rys. 2. Termogram oraz profil zmian temperatury wzdłuż całej wypraski
 Fig. 2. The infrared image and profile of temperature changes along the molding

Na rysunku 2 przedstawiono termogram wypraski przed optymalizacją oraz profil temperatury wzdłuż całej wypraski. Zarejestrowana różnica temperatury pomiędzy najgorętszym i najchłodniejszym miejscem na wyprasce wynosi 40K. To dużo jak na wypraskę, której grubość ścianek poszczególnych części jest bardzo zbliżona. Tak duża różnica może świadczyć o nierównomiernym ochłodzeniu wypraski spowodowanym niepoprawnie zaprojektowanym układem chłodzenia formy. Powodem tego jest nierównomierne chłodzenie i deformacje spowodowane naprężeniami termicznymi. Nie bez znaczenia jest uskok na wyprasce (zaznaczony strzałką na rysunku 2), w którym montowana jest linka. Rozgrzana górna część powoduje wydłużony czas studzenia tej części wypraski i odginanie jej ku górze.

Analiza otrzymanych wyników pozwoliła na podjęcie decyzji o przekonstruowaniu formy a tym samym wypraski. Została zachowana jej funkcjonalność kosztem usztywnienia oraz zmniejszeniu deformacji po procesie wytwarzania.

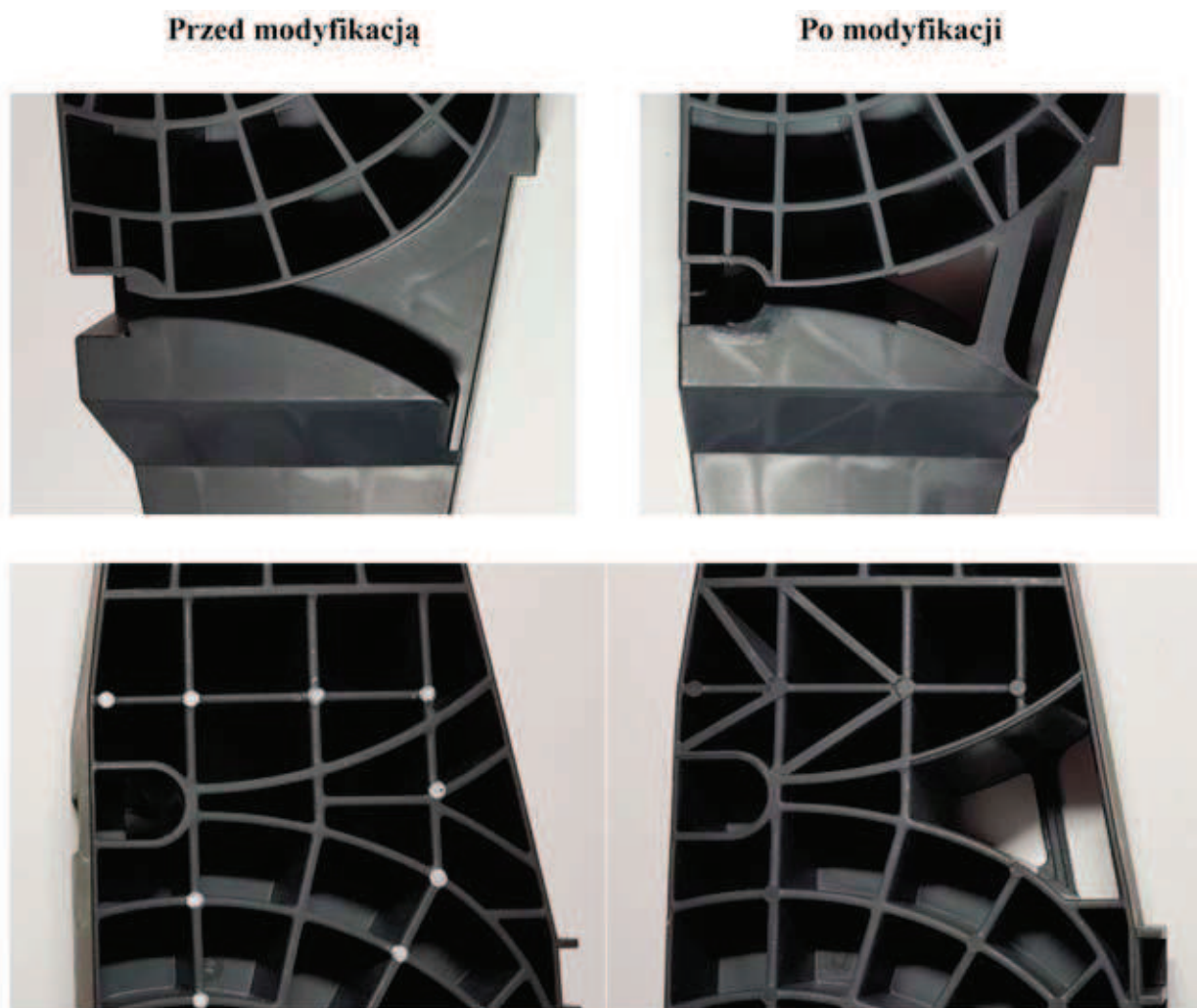
ZMIANY ZASTOSOWANE W KSZTAŁCIE WYPRASKI PO ANALIZIE TERMOWIZYJNEJ

Główną zmianą wprowadzoną w konstrukcji wypraski było „odchudzenie” wypraski w centralnej jej części oraz dodanie żebra wzmacniającego i niepozwalającego na tak swobodną deformację, jak miało to miejsce w pierwotnym kształcie wypraski. Dla porównania oba kształty wypraski przed i po optymalizacji pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Kształt wyprasek przed i po optymalizacji: a) strona górna wypraski, b) spód wypraski

Fig. 3. Shape of moldings before and after optimization process: a) top of molding, b) bottom of molding



Rys 4. Szczegółowe porównanie modyfikowanych obszarów wyprasek

Fig. 4. A detailed comparison of the modified areas of moldings

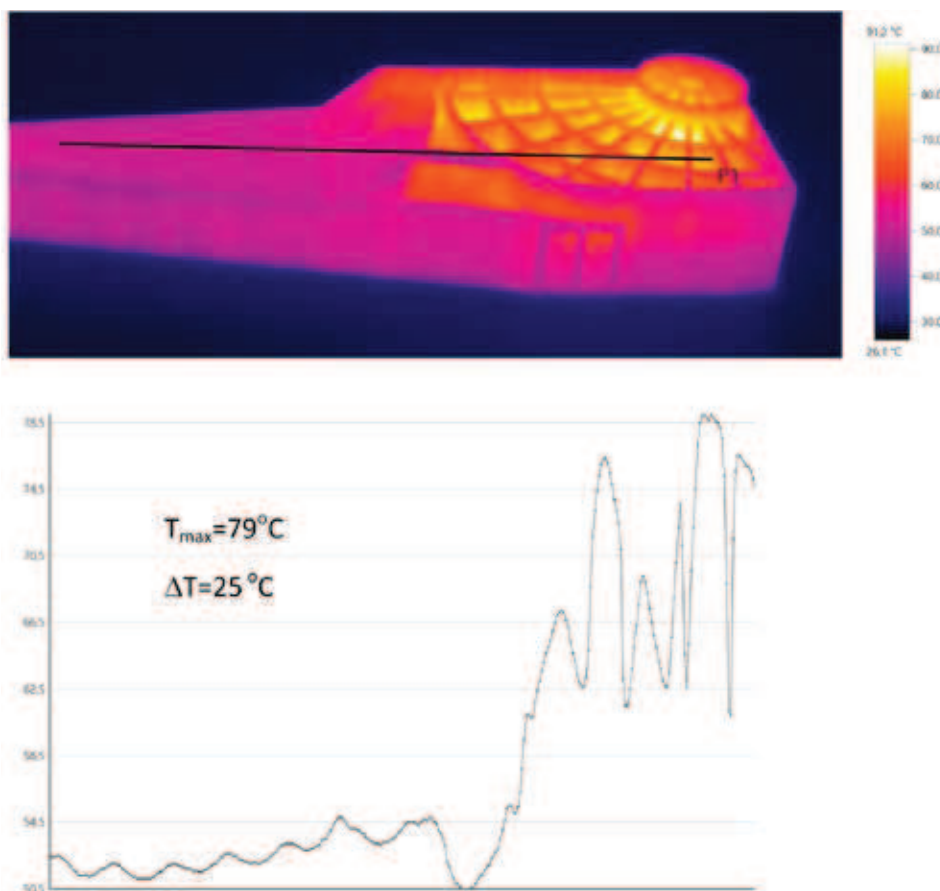
Szczegółowe porównanie zmodyfikowanych obszarów przedstawiono na rysunku 4.

Jak widać na rysunku 3 i 4 główną modyfikacją było usunięcie części uźebrowania, które na skutek dużej koncentracji tworzywa, a tym samym ciepła, ochładzało się dłużej wywołując deformację wypraski. Dodano wzmocnienie ograniczające deformacje zaznaczone strzałką na rysunku 3a. Wykonana modyfikacja spowodowała bardzo niewielką zmianę masy wypraski o około 2g, jednak ograniczenie masy nie było głównym celem tej modyfikacji. Zmianie uległa również konfiguracja kanałów chłodzenia formy wtryskowej. Z jednego długiego obiegu wykonano dwa oddzielne, pozwoliły one na precyzyjną kontrolę temperatury lewej i prawej strony

każdej z wyprasek (ze względu na brak zgody właściciela formy nie mogła być ona przedstawiona w publikacji).

Kolejnym etapem prac była powtórna analiza termowizyjna i określenie koncentracji ciepła w wypraskach poddanych modyfikacji kształtu i wykonanych w zmodyfikowanym narzędziu (formie wtryskowej). Wyniki badań termowizyjnych przedstawiono na rysunku 5.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że różnica temperatury pomiędzy najzimniejszym i najgorętszym miejscem na wyprasce jest taka sama jak przed modyfikacją i wynosi 25°C. Zanotowano jednak różnicę w wartości maksymalnej temperatury. Dla pierwotnej wypraski wynosi ona 97°C, a dla wypraski po modyfikacji 79°C.



Rys. 5. Termogram oraz profil zmian temperatury wzdłuż całej wypraski po zastosowanych zmianach
 Fig. 5. The infrared image and profile of temperature changes along the molding after modification

Ta różnica spowodowała, osiągnięcie znacznie mniejszej deformacji produkowanych wyprasek. Udało się też skrócić czas chłodzenia z 70s do 62s, czas docisku z 7s do 6s, a wynikowy czas cyklu wyniósł 91s, co dawało wydajność na poziomie 37+37szt/h (razem 74szt/h), czyli 2 sztuki więcej na godzinę. Przy produkcji wielkoseryjnej skrócenie czasu cyklu o 9% powoduje w skali roku znaczne oszczędności ekonomiczne a optymalizacja kształtu daje mniejsze deformacje i tym samym mniej reklamacji produkowanych elementów wtryskowych.

PODSUMOWANIE

W wypraskach wtryskowych o dużej liczbie uźebrowania bardzo często dochodzi do deformacji postaciowych kształtu. Przyczyną tego jest stosowanie długich żeber, w których pod-

czas przepływu dochodzi do znacznej orientacji makrocząsteczek. Ponadto nagromadzenie tworzywa w pewnych obszarach wypraski powoduje znaczne wydłużenie potrzebnego czasu ochładzania. Zmniejszenie ilości tworzywa w obszarach kondensacji ciepła oraz zmiana uźebrowania powoduje zmianę rozkładu naprężeń własnych oraz cieplnych, które mogą powodować deformacje. Analiza termowizyjna pozwala na określenie węzłów, w których dochodzi do kumulacji ciepła i taką zmianę konstrukcji formy w celu zmniejszenia objętości cieplnej tworzywa w tych miejscach.

Częstym błędem podczas konstruowania wyprasek technicznych jest dążenie do uzyskania dużej sztywności poprzez dodanie objętości tworzywa, zamiast zoptymalizowanie jej przez zastosowanie odpowiedniego uźebrowania. Ważnym czynnikiem oprócz samej konstrukcji

wypraski jest odpowiednie zaprojektowanie systemu chłodzącego w formie wtryskowej. Powinien on zagwarantować przede wszystkim uzyskanie równomiernego rozkładu temperatury na powierzchni wypraski a nie na powierzchni narzędzia (formy wtryskowej). Przy niektórych wypraskach o zróżnicowanej pojemności cieplnej w poszczególnych obszarach wypraski (co jest jednoznaczne z ilością tworzywa w tych częściach wypraski) istnieje konieczność rozdzielania układów termostowania i celowego zróżnicowania temperatury formy w każdym z obiegów.

Przeprowadzone badania przyczyniły się do optymalizacji kształtu produkowanej wypraski czego powodem były znaczne mniejsze deformacje postaciowe produkowanych wyprasek oraz skrócenie cyklu wtryskiwania.

PODZIĘKOWANIA

Podziękowania dla firmy OCTO Actuators GmbH – Niemcy za możliwość przeprowadzenia analizy i przygotowania publikacji w oparciu o formę wtryskową i wypraski firmy.

ACKNOWLEDGEMENTS

Special thanks to the company OCTO Actuators GmbH – Germany for the opportunity to study and prepare publications on the basis of company injection mold and moldings

LITERATURA

1. Postawa P.: Metody termostowania form wtryskowych. *Przetwórstwo Tworzyw* 4 (136), 2010, s.181–187.
2. Nabiałek J.: Modelowanie zjawisk w procesie wtryskiwania tworzyw. *Tworzywa Sztuczne w Przemysle*, 8, 1/2012, s. 54 – 56.
3. Postawa P.: Chłodzenie konformalne form wtryskowych. *Chłodzenie Procesów Przemysłowych*. Dodatek nr 1, marzec/kwiecień 2012, XV-XX, w: *Tworzywa Sztuczne w Przemysle*, 9, 2/2012.
4. Bociąga E., Jaruga T.: Powstawanie obszarów łączenia strumieni tworzywa w wypraskach z wielogniazdowej formy wtryskowej. *Polimery* 2009, 54, nr 9, s. 654–660.
5. Postawa P., Kwiatkowski D.: Residual stress distribution in injection molded parts. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* vol. 18., Gliwice 2006, str.171–174.
6. Hamdy H., Regnier N., Lebot C., Pujos C., Defaye G., *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 1786–179
7. Yan C., Nakao C., Go T., Matsumoto K., Hatamura Y., *Microsystem Technologies* 9 (2003) 188–191, Springer-Verlag 2003
8. Ivascu N., Fetecau C., Cusco W., Hill R., *The Annals "Dunarea de Jos" of Galati Fascicle V, Technologies in machine building*, ISSN 1221–4566, 2010
9. Zhaoa G., Wanga G., Guana Y., Lia H., *Polym. Adv. Technol.* 2011, 22 476–482
10. Qiao H., *International Journal of Mechanical Sciences* 48 (2006) 430–439
11. Griffith B., Türler D., Goudey H., Lawrence Berkeley Nat. Lab., Berkeley CA, 2001
12. Masse H., Arquis E., Delaunay D, Quilliet S., Le Bot P., *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47 (2004) 2015–2027

Data przyjęcia publikacji do druku: 11–07–16