

Mateusz SOŁTYSIK¹

Opiekun naukowy: Aleksander MOCZAŁA²

TENDENCJE W SPOSOBACH CHŁODZENIA FORM WTRYSKOWYCH

Streszczenie: W pracy przedstawiono doskonalenie procesu wtryskiwania, zaprezentowano innowacyjność technologiczną w postaci układu chłodzenia z wykorzystaniem kanałów konformalnych, która uzyskiwana na drodze metody przyrostowej pozwala na poprawę jakości i czasu cyklu wtrysku. Efektami płynącymi z przeprowadzonej analizy, będą efekty jakościowe i wydajnościowe, a także zwrócona zostanie uwaga na aspekty ekonomiczne.

Słowa kluczowe: wtryskiwanie tworzyw sztucznych, konformalny układ chłodzenia, wytwarzanie metodą przyrostową.

TRENDS IN WAYS OF COOLING INJECTION MOLDS

Summary: This work presents the improvement of the injection process, technological innovation in the form of a cooling system using conformal ducts, which is obtained by means of the additive method allows to improve the quality and time of the injection cycle. The effects of the analysis will be qualitative and performance effects as so attention will be paid to economic aspects.

Keywords: plastic injection, conformal cooling system, production by the additive method.

1. Wprowadzenie

W dobie znacznego rozwoju technik wytwarzania i znaczącej roli przetwórstwa tworzyw sztucznych, koniecznym jest spojrzenie na możliwości rozwoju tej dziedziny. Przedsiębiorstwa chcąc zachować konkurencyjność, a tym samym wyjść naprzeciw tendencji ciągłego doskonalenia zobowiązane są do szerszego spojrzenia na ten problem. Jako dziedzina wytwarzania, przetwórstwo tworzyw sztucznych, charakteryzuje się wysoką wydajnością, możliwością otrzymywania wyrobów o niemal dowolnych kształtach, a gdy proces ten jest właściwie sterowany wypraski

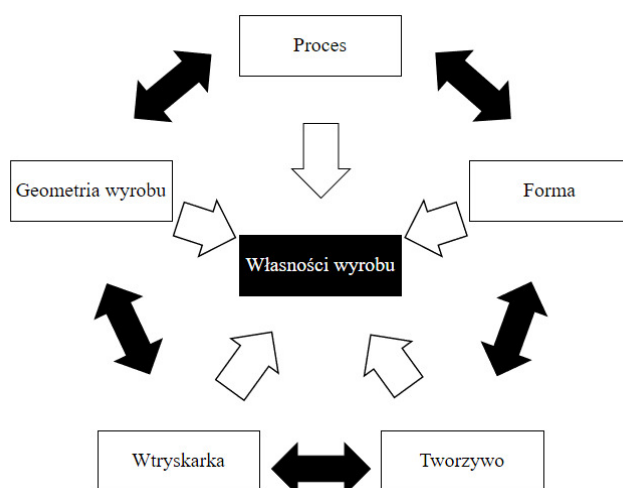
¹ inż., Akademia Techniczno Humanistyczna w Bielsku Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Kierunek: Zarządzanie i Inżynieria Produkcji

² dr inż., Akademia Techniczno Humanistyczna w Bielsku Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Katedra Inżynierii Produkcji amoczala@ath.bielsko.pl

mogą odznaczać się wysoką jakością wykonania – określenie to dotyczy wielu różnych cech jak właściwości mechaniczne, cieplne, optyczne obejmując tak samo charakterystykę strukturalną. Wykorzystywana jest na praktycznie każdej gałęzi przemysłu począwszy od artykułów gospodarstwa domowego, branży automotive, a kończąc na zaopatrzeniu sprzętu medycznego.

2. Elementy składowe procesu wtryskiwania

Proces wtryskiwania w ujęciu ogólnym charakteryzuje się równowagą, przy czym wszystkie jego składowe są współzależne. Jeżeli jeden z czynników składowych ulegnie zmianie wówczas powoduje to powstanie nowych warunków wytwarzania. Regulacja oraz sposób organizacji procesu wtryskiwania polega na uzyskaniu i utrzymaniu stabilnego układu, w którym czynniki przedstawione na rysunku 1 poniżej, spowodują, że wytwarzane wypraski odznaczają się umowną, wymaganą jakością. Stabilność całego procesu ma przyczyniać się do zachowania powtarzalności, co również w dużym stopniu przekłada się na właściwości wyrobów.[2]



Rysunek 1. Składowe procesu oraz zależności pomiędzy nimi. Opracowanie własne na podstawie [2]

W zależności od potrzeb użytkownika firmy oferujące urządzenia dostosowują je, tworząc konfiguracje różniące się rozwiązaniami konstrukcyjnymi, co z kolei przekłada się na odmienne systemy sterowania oraz rodzaje wykorzystanego napędu. Niezależnie od przeznaczenia i wymagań postawionych co do konstrukcji, wykonania, istnieją pewne zespoły funkcjonalne, które występują w każdej wtryskarce.

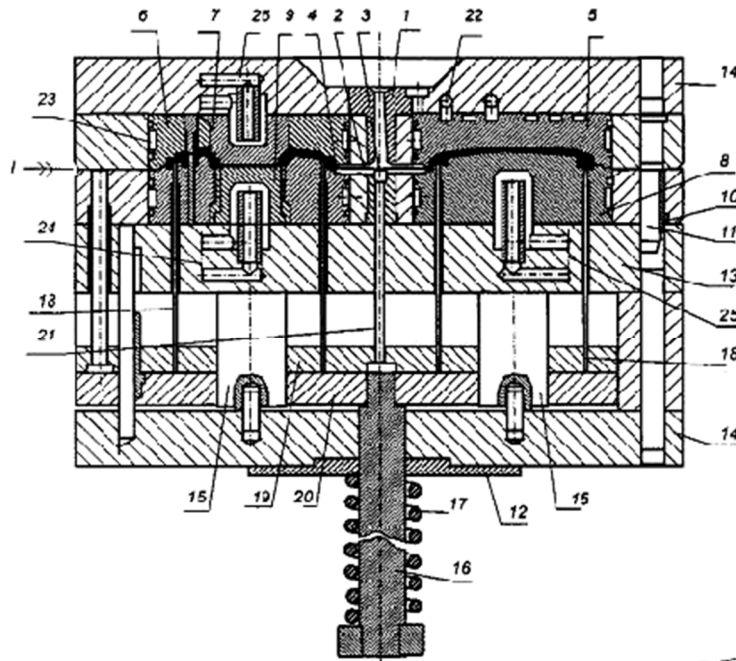
Obecne wtryskarki wyposażone są w system mikroprocesorowego sterowania elektronicznego co pozwala na: [2]

- cyfrowe nastawy i zapis parametrów procesu, sterowane bezpośrednio z poziomu monitora;

- możliwość zmian parametrów maszyny w funkcji czasu, miejsca oraz drogi;
- badanie oraz rejestrację odchyłek pomiędzy wartościami zadanymi, a rzeczywistymi;
- adaptację poprzez dobór temperatury do zmian w funkcji czasu – w przypadku przerwy w pracy;
- optymalizację parametrów wejścia przez stosowanie nowych systemów komputerowych.

3. Forma wtryskowa

Wszystkie funkcje oraz zadane parametry wtryskarki są przyporządkowywane działaniu formy wtryskowej. Jej zadaniem jest ukształtowanie geometrii wyrobu, ale również zapewnienie właściwej wewnętrznej budowy. Badania [5] wykazały, że próg 75% błędów związanych z wyrobem, kształtowany jest poprzez błędy popełnione w fazie projektowania wyrobu lub formy. Dokładność wykonania formy odpowiadająca 0,3 – 0,1 tolerancji wyrobu klasyfikuje formy wtryskowe jako narzędzia precyzyjne. [2].



Rysunek 2. Podstawowe elementy konstrukcyjne formy wtryskowej [8]

Na rysunku 2. oznaczono: 1- tuleja wlewowa, 2- kanał wlewowy, 3- zaczepek wlewka, 4- przewężka, 5, 6, 7- wstawki formujące matrycy, 8, 9- wstawki formujące stempla, 10- tuleja prowadząca, 11- kołek prowadzący, 12- pierścień centrujący formę, 13- płyta podpierająca, 14- płyta mocująca, 15- tuleje podpierające, 16- zderzak,

17- sprężyna powrotna zderzaka, 18- wypychacze, 19- płyta wypychaczy, 20- płyta podpierająca wypychacze, 21- wypychacz wlewka, 22 - 26- kanały chłodzące.

Każda pojedyncza forma wtryskowa jest traktowana jako prototyp wymagający przeprowadzenia prób oraz badań przed odbiorem. Koszt formy jako części wykonanej w sposób uwarunkowany od założeń klienta, może niejednokrotnie przekraczać koszt zakupu wtryskarki. Należy zwrócić uwagę na konieczność przystosowania budowy wtryskarki do budowy formy lub rodzaju produkcji. Budowę formy przedstawiono na Rys.3. Niezależnie od założeń konstrukcyjnych wyrobu oraz jego budowy, każda formę charakteryzują dwa układy funkcjonalne. Mechaniczny warunkujący zdolność pracy formy jako narzędzia oraz technologiczny odpowiadający w sposób bezpośredni za kształtowanie wyrobu. [2]

Zespoły mechaniczne formy: [2]

- korpus – obudowa mająca za zadanie odbiór wszystkich obciążeń zewnętrznych jak i wewnętrznych, przy jednoczesnym zachowaniu współosiowości stempli i matryc;
- zespoły wypychaczy – jako ogół mechanizmów biorących udział w uwolnieniu wypraski z gniazda formującego. Stosowane jako wysuwane lub wykręcane;
- napędy – wyróżnia się silniki, siłowniki niezależne od ruchów maszyny oraz cięgna, zaczepy, zderzaki jako zależne od ruchów maszyny.

4. Bilans cieplny formy

Forma wtryskowa stanowi układ zamknięty w którym ciepło jest dostarczane do wewnątrz przez temperaturę tworzywa i odprowadzane na zewnątrz przez układ chłodzenia. Całość odbywa się w następującej kolejności: [1], [6]

- ciepło przepływa do ścian wypraski z całej objętości,
- ciepło przepływa ze ścian wypraski na powierzchnię gniazda, proces zachodzi poprzez szczelinę powstałą w wyniku skurczu tworzywa,
- ciepło przepływa w głąb formy,
- ciepło przepływa z formy do ośrodka chłodzącego i równocześnie przepływa do zewnętrznej powierzchni formy,
- ciepło zostaje odprowadzone na zewnątrz z chłodziwem.

Bilans cieplny formy można przedstawić posługując się wzorem (1):

$$\sum Q = Q_{pl} + Q_w + Q_T + Q_s = 0 \quad (1)$$

gdzie:

Q_{pl} – ciepło dostarczone przez stopione tworzywo,

Q_w – ciepło pozostałe w wyprasce,

Q_T – ciepło doprowadzone jak i odprowadzone przez układ chłodzenia,

Q_s – ciepło doprowadzone jak i odprowadzone przez otoczenie.

Na podstawie powyższej analizy powstaje wniosek w postaci zależności co do roli układu chłodzenia i charakterystyki wymiany ciepła. w przypadku gdy:

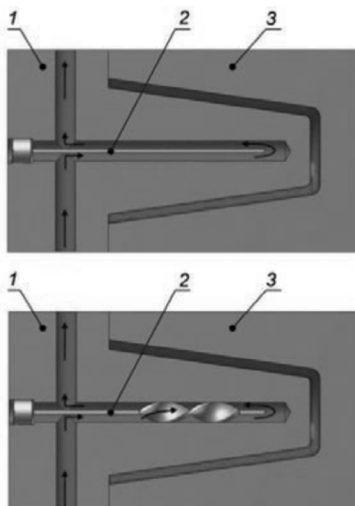
- chłodzenie formy odbywa się poprzez chłodziwo to $Q_T < 0$,
- forma jest podgrzewana przez medium grzewcze to $Q_T > 0$,

- gdy forma oddaje ciepło do otoczenia to $Q_s < 0$,
- gdy forma pobiera ciepło z otoczenia to $Q_s > 0$.

5. Konwencjonalne metody chłodzenia form wtryskowych

Ze względu na łatwość wykonania najczęściej stosowanymi metodami chłodzenia płyt jest zastosowanie kanałów, które są wykonane na drodze wiercenia. Układ tych kanałów może być kierunkowy – poprowadzony tylko w jedną stronę, bądź w układzie poprzecznym. Takie rozwiązanie wymaga zastosowania korków, które mają za zadanie zaślepić wywiercone odcinki, nie potrzebne dla układu. Wykorzystanie zaślepienia często powoduje nieuszczelnienie w układzie co pogarsza warunki chłodzenia, następują spadki ciśnienia oraz przepływ chłodziwa przez kanały nie jest wtedy kontrolowany – mogą zdarzać się przecieki. Najmniej opłacalnym i stosowanym w ostateczności rozwiązaniem jest wykorzystanie chłodzenia zewnętrznego przez płytę spychającą [1].

W odniesieniu do zagadnienia chłodzenia matryc, chłodzenie stempli okazuje się być trudniejsze. Fakt ten wynika z tego, że strumień ciepła przekazywany z wypraski do stempla jest większy, z racji tego, że kurczące tworzywo obciska się na stemple co powoduje bezpośrednie przeniesienie ciepła. Z kolei ciepło to może być odprowadzane tylko w jednym kierunku obsady stempla czyli mniejszym przekrojem, niż w przypadku matrycy. Zachowanie skuteczności oraz stabilności układu chłodzenia stempli jest kluczowe dla optymalizacji czasu cyklu, ponieważ nagły wzrost temperatury może przyczynić się do znacznego zniekształcenia wyrobu. Problem optymalnego chłodzenia stempli niejednokrotnie wymaga zastosowania dodatkowych elementów wyposażenia układu chłodzenia. Na rysunku 3 przedstawiono możliwe rozwiązanie stosując przegrodę spiralną, przyczynia się to do uzyskania równomiernego chłodzenia i częściowego zniwelowania różnic temperatur na wlocie i wylocie przegrody prostej [1], [6].



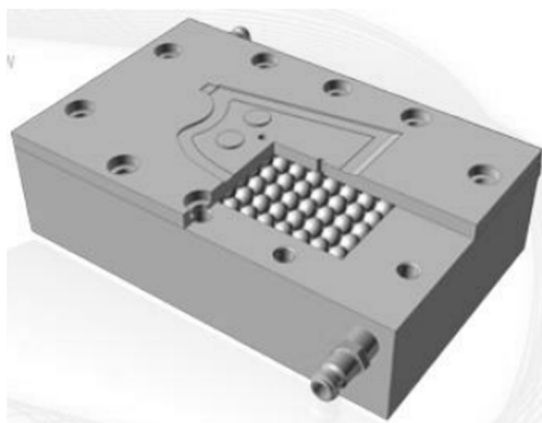
Rysunek 3. Chłodzenie stempli z wykorzystaniem przegrody prostej i spiralnej [6]

Na rysunku 3. oznaczono: 1 – płyta stemplowa, 2 – przegroda oraz 3 – matryca.

6. Tendencje w metodach chłodzenia form wtryskowych

6.1. Chłodzenie w technologii BFMOLD®

Technologia ta została opatentowana przez brytyjski koncern Witmann Grup i jest metodą dynamicznej regulacji temperatury formy. Kontrola temperatury jest możliwa poprzez wykorzystanie dwóch obiegów cieczy. Pierwszy z nich jest wykorzystywany do podstawowej regulacji temperatury, natomiast drugi położony w okolicach gniazda formującego odpowiada za podnoszenie jego temperatury. Innowacją jest wysp kulkowy umieszczony w kieszeni wewnątrz układu formującego, który zapewnia konstrukcji wymaganą sztywność oraz równomierny rozkład temperatury na powierzchni formującej. Przykładową konstrukcję z wykorzystaniem tej technologii przedstawiono na rysunku 4. [6]

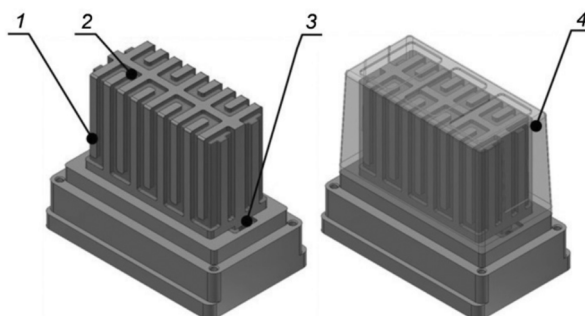


Rysunek 4. Układ formy z wkładką formującą [8]

Zasada działania opiera się na podgrzewaniu oraz chłodzeniu przez medium przepuszczone przez wnękę między kulkami, co ma się przełożyć na zwiększenie wydajności chłodzenia oraz zapewnieniu mniejszego odkształcenia wyprasek.

6.2. Chłodzenie konturowe

Innym rodzajem chłodzenia jest chłodzenie konturowe, którego wykonanie polega na poprowadzeniu wyfrezowanych kanałów chłodzących na rdzeniu stempla, na który później nakładana jest oprawka. Przykład został zaprezentowany na rysunku 5 [6]. Duża objętość przepływu medium chłodzącego ze względu na swoją budowę niewątpliwie wpływa na intensywny pobór ciepła oraz równomierny rozkład temperatury na powierzchni formującej. Problemem może być zapewnienie szczelności układu oprawa – stempel oraz możliwość wykorzystania tej technologii tylko w pewnych przypadkach, mianowicie – chłodzenie płyt stemplowych oraz matrycowych o małej grubości wyfrezowanych kanałów może powodować obniżenie właściwości wytrzymałościowych.



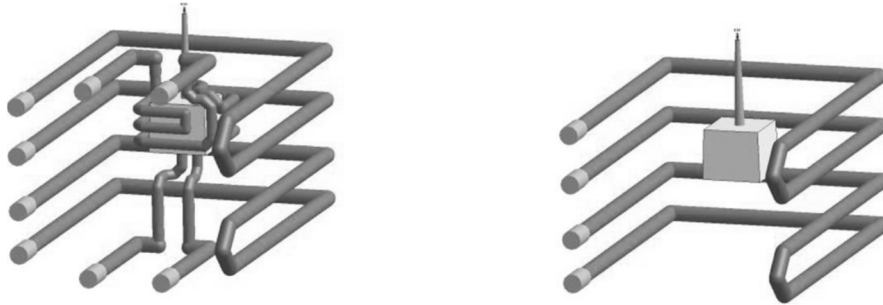
Rysunek 5. Chłodzenie konturowe.[6]

Na rysunku 5. oznaczono: 1 – stempel, 2 – kanały chłodzące, 3 – kanał doprowadzający, 4 – oprawa stempla.

6.3. Chłodzenie konformalne

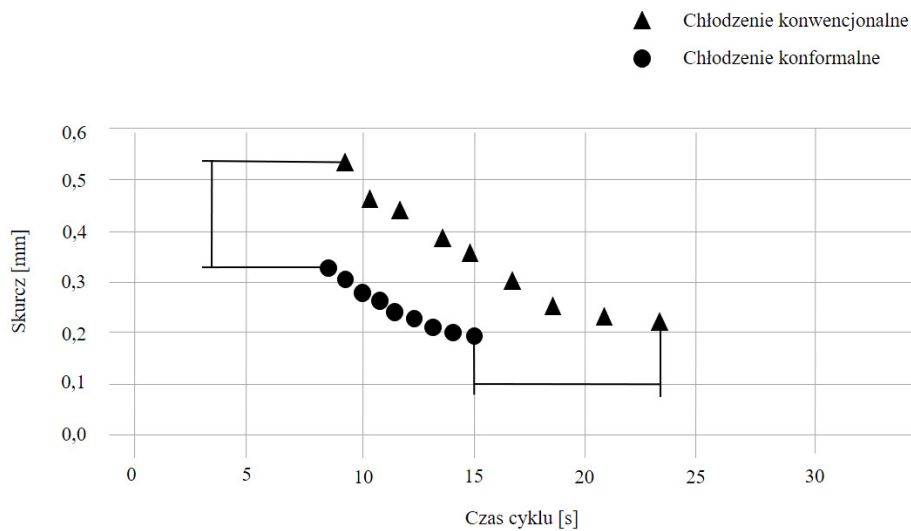
Opisane wcześniej metody chłodzenia form wtryskowych zaliczane są do tradycyjnych – konwencjonalnych metod, jednakże w dobie rozwoju technologii co raz większy rozgłos zyskuje zagadnienie chłodzenia konformalnego. Możliwości technologii addytywnej spowodowały częstsze powstawanie układów chłodzenia opartych na kanałach konformalnych. Wykorzystanie technologii przyrostowej pozwala na poprowadzenie kanałów blisko powierzchni formujących, będących jednocześnie dostosowanym do kształtu wypraski. Kolejnym aspektem jest możliwość zastosowania dowolnego kształtu takiego kanału, gdzie przekrój poprzeczny może przyjmować dowolne kształty, przyczyniające się do sprawniejszego odbioru ciepła wypraski. W obliczu rozrostu przetwórstwa tworzyw sztucznych coraz częściej zastosowanie znajdują formy, które mają zagwarantować równomierne chłodzenie. Dowolną geometrię kanałów konformalnych można zrealizować wykorzystując technologię napawania, gdzie wiązka lasera poprowadzona po metalicznym proszku powoduje jego stopienie. W metodzie DMLS (ang. Direct Metal Laser Sintering) wkładka formująca jest budowana warstwowo, a promień lasera jest skupiany tylko na tych miejscach, które mają zostać połączone z wcześniejszą warstwą. Zastosowanie chłodzenia konformalnego przyczynia się do znacznego skrócenia czasu cyklu przez intensyfikację chłodzenia w całej objętości wypraski. Dodatkowo pozwala na zmniejszenie deformacji wyprasek przez dynamiczny i równomierny odbiór ciepła, a tym samym pozwala na wyższą precyzję w kontroli temperatury formy. Przykład konformalnego układu chłodzenia został przedstawiony na rysunek 6 [4], [6] oraz na rysunku 7.

Konformalny układ chłodzenia zakłada poprowadzenie kanałów układu chłodzenia w stałej odległości, tak aby zapewniał równomierność chłodzenia. Warto zaznaczyć również, iż przeprowadzona symulacja jest przewidziana dla ponad 20 sekundowego czasu cyklu.



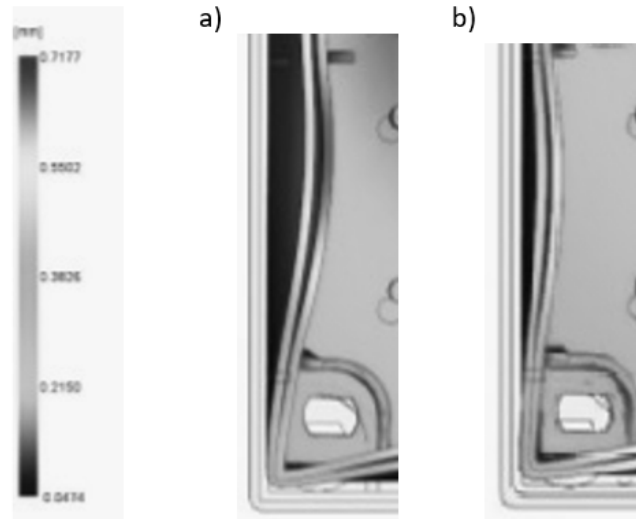
Rysunek 6. Konformalny układ chłodzenia w odniesieniu do konwencjonalnego.[4]

Kluczem do zachowania powtarzalności wymiarowej jest zachowanie powtarzalności skurczu co wykazane zostało w pracy J. Gabor, J. Kovac [7]



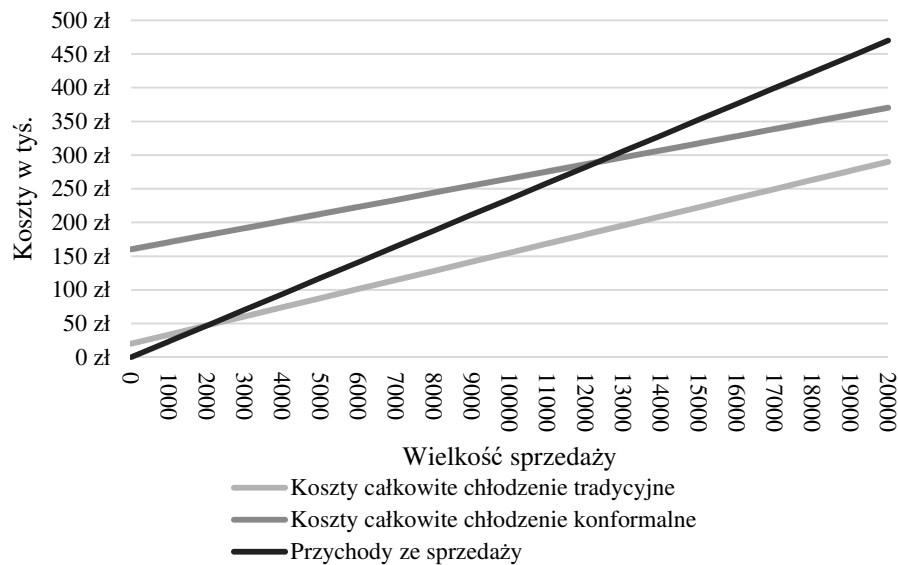
Rysunek 7. Wykres skurczu dla chłodzenia konwencjonalnego i konformalnego..

Przedstawione dane na wykresie pozwalają na zaobserwowanie mniejszego zamrożenia naprężeń, co faktycznie powinno przekładać się na wartość skurczu, a tym samym na stopień deformacji wypraski. Aby mogła zostać przeprowadzona analiza porównawcza punkty pomiarów w obu przypadkach były takie same. Opierając się na badaniach J. Zhang, J Wang, J. Lin Q. Guo, K. Chen L. Ma [4], wykazano współzależność temperatury oraz skurczu wypraski. Skurcz jako rodzaj naprężeń powstający podczas spadku temperatury, w określonych warunkach produkcyjnych może być kontrolowany, a jego ukierunkowanie może przełożyć się na polepszoną jakość wypraski co przedłożono w pracy S. Kitayama, H. Miyakawa, M. Takano oraz S. Aiba [7]. Poniżej zestawiono analizowaną mapę odkształceń wypraski przed zastosowaniem układu z chłodzeniem konformalnym oraz po implementacji.



Rysunek 8. Zestawienie map odkształceń wyprasek dla chłodzenia: a) tradycyjnego, b) konformalnego.

Wykonanie chłodzenia tradycyjnego jest tańsze i nie wymaga stosowania zaawansowanej technologii przyrostowej. Poniżej przedstawiono wykres porównawczy obrazujący opłacalność danego wariantu w odniesieniu do obliczonego progu rentowności na analizowanym wybranym przykładzie.



Rysunek 9. Wykres zależności progu rentowności od kosztów rozpatrywanych wariantów.

Dodatkowo poza niższymi kosztami wytworzenia obniża się również czas wykonania takiej formy w przeciwieństwie do innowacyjnego wariantu z chłodzeniem

konformalnym gdzie koszty stałe obarczone są dużą sumą związaną z wykonawstwem i zastosowaniem chłodzenia konformalnego. Opłacalność przedsięwzięcia jest ściśle zależna od planu produkcyjnego oraz ilości zleceń, które z kolei mogą zostać zrealizowane szybciej.

Podsumowanie

W dobie rozwoju technik wytwarzania oraz coraz bardziej znaczącej roli metod produkcji przyrostowej skutkiem tego jest inwestycja w nowoczesne metody optymalizacji procesów wytwórczych, które mają zapewnić nie tylko lepsze parametry użytkowe, ale mają także przyczynić się do skrócenia czasu wytworzenia i redukcji kosztów wyrobów. Przeprowadzona analiza pozwoliła na przedstawienie tendencji rozwoju techniki chłodzenia form wtryskowych. Implementacja techniki przyrostowej, co zostało wykazane, może mieć pozytywny wpływ na polepszenie jakości wypraski. Biorąc pod uwagę genezę powstawania deformacji, chcąc zmniejszyć negatywne działanie skurczu koniecznym jest aby zbadać o kontrolę nad rozkładem naprężeń w taki sposób aby analizowany rozkład był równomierny. Efekty te są możliwe właśnie poprzez optymalizację procesu chłodzenia wypraski, na co pozwala zastosowanie m.in. chłodzenia konformalnego. Poza zachowaniem walorów jakościowych produktów, efektywne chłodzenie wpływa na kluczowy parametr wydajności procesu – czas cyklu. Analizowany przypadek wykorzystania innowacyjnego chłodzenia pozwolił na skrócenie czasu cyklu o około 51 %.

LITERATURA

1. ZAWISTOWSKI H., FRENKLER D.: Konstrukcja form wtryskowych do tworzyw termoplastycznych, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa 1984
2. ZAWISTOWSKI H., ZIĘBA S.: Ustawianie Procesu Wtrysku, Wydawnictwo PLASTECH, Warszawa 2015.
3. GABOR J., KOVAC J.: Analyzing the warpage in the injection molding using SLS tool inserts,
4. ZHANG J., WANG J., LIN J., GUO Q., CHEN K., MA L.: Multiobjective optimization of injection molding process parameters based on Opt LHD, EBFNN, and MOPSO, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2016) 85:2857–2872
5. KOMPf M.: Durch Qualitet und Technologie zum Mehrwerter. Kunststoffe 11/2000.
6. MUSZYŃSKI P., MROZEK K., POSZWA P.: Wybrane metody chłodzenia form wtryskowych, Mechanik 2016, nr 8–9/2016
7. KITAYAMA S., MIYAKAWA H., TAKANO M., AIBA S.: Multi-objective optimization of injection molding process parameters for short cycle time and warpage reduction using conformal cooling channel, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2018) 97:2087–2098,
8. Serwis internetowy:
https://www.wittmann-group.com/uploads/tx_wpsidebar/BFMOLD_en.pdf,
04.11.2019 r