

**mgr inż. Przemysław Poszwa, dr hab. inż. Marek Szostak**

Faculty of Mechanical Engineering and Management

Poznan University of Technology

Piotrowo 3 str., 60-965 Poznań, Poland

E-mail: przemyslaw.b.poszwa@doctorate.put.poznan.pl, marek.szostak@put.poznan.pl

## **Influence of scale deposition on maintenance of injection molds**

### **Wpływ odkładania się kamienia na eksploatację form wtryskowych**

**Keywords:** *injection mold, cooling phase, limescale, fouling*

**Abstract:** Układ chłodzenia formy wtryskowej odgrywa niebagatelną rolę w procesie wtryskiwania tworzyw sztucznych. Odpowiada on za sprawny odbiór ciepła z formy wtryskowej dostarczonego przez uplastycznione tworzywo, które w fazie wtrysku jest wprowadzone do formy. Oprócz szybkiego odbioru ciepła istotne jest, aby rozkład temperatury na powierzchni gniazda formującego był równomierny. W niniejszej pracy skupiono się na zjawisku osadzania się kamienia w układach chłodzących form wtryskowych. Kamień powoduje zarówno zwężenie przekroju kanału chłodzącego, jak i wyraźny spadek wydajności chłodzenia ze względu na jego niską przewodność cieplną. W pracy określono wpływ wielu czynników (geometria układu chłodzenia oraz wypraski, temperatura cieczy chłodzącej, rodzaj tworzywa) na eksploatację formy wtryskowej w wyniku pojawienia się kamienia w układzie chłodzącym. Przeprowadzone symulacje numeryczne pozwoliły uwzględnić wpływ grubości warstwy osadu na rozkład temperatury na powierzchni gniazda formującego, średnią temperaturę formy wtryskowej, a także czas potrzebny do zestalenia wyrobów produkowanych z tworzyw sztucznych.

## **1. Introduction**

Wtryskiwanie jest jedną najpopularniejszych metod przetwórstwa tworzyw sztucznych. Polega ona na cyklicznym uplastycznieniu tworzywa, wtrysnięciu go pod ciśnieniem do formy, uzupełnieniu ubytków związanych z jego zestaleniem, schłodzeniu i usunięciu gotowego wyrobu z formy. Najdłuższą częścią cyklu wtrysku jest faza chłodzenia, której długość wynika z izolacyjnych właściwości tworzyw sztucznych. Optymalne zaprojektowanie układu chłodzenia pozwala w sposób wydajny odebrać ciepły z tworzywa[9, 12].

Oprócz geometrii układu chłodzenia na wydajność odbioru ciepła ma wpływ rodzaj materiału wykorzystanego do wykonania formy wtryskowej lub jej elementów. Parametrem odpowiadającym za odbiór ciepła jest przewodność cieplna materiału formy oraz rodzaj i natężenie przepływu użytego chłodziwa. W celu przyspieszenia odbioru ciepła stosuje się wkładki wykonane ze stopów miedzi, np. brązu berylowego, Ampco 940, Ampco 944, MoldMax XL. Pozwalają one przyspieszyć odbiór ciepła sprawiając, że taką samą temperaturę formy jesteśmy w stanie uzyskać w czasie nawet o 29% krótszym poprzez zastosowanie odpowiedniego materiału na wkładki[6].

Podczas eksploatacji formy wtryskowej woda przepływa przez układ chłodzący, gdzie dochodzi do wytrącania się kamienia i osadzania na powierzchni kanałów chłodzących. Kamień cechuje się bardzo niską przewodnością cieplną, porównywalną lub nieco wyższą od przewodności cieplnej tworzyw sztucznych. Odłożenie się kamienia powoduje powstanie

dodatkowego oporu na drodze przepływu ciepła od uplastycznionego tworzywa do powierzchni kanałów chłodzących, skąd dalej jest usuwane na drodze przepływu ciepła[13].

W zależności od składu chemicznego wody stosowanej do chłodzenia mogą się osadzać różne rodzaje kamienia o różnych właściwościach termicznych. Niezależnie od rodzaju ich przewodnictwo cieplne jest 5-600x mniejsze niż przewodność stali (ok. 30 W/m/K), co przedstawiono w Tabeli 1. Oznacza to, że warstwa osadu o grubości 1 mm jest równoważna odpowiednio warstwie 5-600 mm stali. To pokazuje jak istotne jest zapewnienie wysokiej przewodności cieplnej formy wtryskowej.

**Tab. 1. Przewodność cieplna różnych gatunków osadów[1]**

Typ osadu	Węglan wapnia	Siarczan wapnia	Krzemian wapnia	Osad organiczny	Sadza
Przewodność cieplna [W/mK]	0,6 - 6	2,3	0,3	0,1	0,2

Istnieje szereg modeli opisujących osadzanie się kamienia w funkcji czasu. W przypadku kanałów o przekroju kołowym grubość osadu może osiągać bardzo duże wartości [7,10] – co w przypadku długo eksploatowanych form może powodować ogromne problemy z wydajnością chłodzenia. Ma to szczególnie znaczenie w przypadku form wtryskowych, które nie mają zainstalowanych czujników temperatury, a jedynym czynnikiem mierzonym w trakcie procesu związanym z chłodzeniem jest temperatura cieczy w termostacie.

Nie znaleziono prac traktujących o zagadnieniu osadzania się warstwy osadu w kanałach chłodzących form wtryskowych oraz wpływie tejże warstwy na proces chłodzenia. Z drugiej strony jest to zagadnienie bardzo szeroko omawiane w inżynierii procesowej, gdyż ma ono kluczowy wpływ na wydajność transportu ciepła [3,5,11]. Przykładem może być aparatura do destylacji ropy, gdzie określono wpływ osadu na wydajność chłodzenia. Po roku pracy układu bez zastosowania związków hamujących odkładanie się osadu sprawność takiego urządzenia spadła o ponad 40%[3].

Do prawidłowej realizacji chłodzenia formy wtryskowej prędkość przepływu cieczy powinna być na tyle duża, żeby różnica między jej temperaturą na wlocie i wylocie powinna być mniejsza niż 3°C [2]. Niestety sposób pomiaru nie daje informacji diagnostycznej o eksploatacji formy wtryskowej, gdyż kamień będzie powodować nieznaczne zmniejszenie temperatury cieczy chłodzącej na wylocie ze względu na spadek wydajności chłodzenia (przy prawidłowo dobranym objętościowym natężeniu przepływu). Brak narzędzia do monitorowania temperatury formy (szczególnie występujący w przypadku tańszych rozwiązań) może doprowadzić do pojawienia się problemu z wyprodukowaniem wypraski o założonych tolerancjach wymiarowych.

### 3. Opis problemu

W niniejszej pracy przeprowadzono szereg analiz numerycznych mających na celu wskazanie wpływu zatykania się kanałów chłodzących form wtryskowych na wydajność chłodzenia. W celach porównawczych wykorzystano analizę transportu ciepła uśrednioną w czasie z wykorzystaniem oprogramowania Autodesk Moldflow®. W oprogramowaniu dostępne są 2 rodzaje analizy – z określonym czasem chłodzenia oraz z automatycznym jego znalezieniem. Analiza ze zdefiniowanym czasem chłodzenia polega na wyznaczeniu pola temperatur przy założeniu danej temperatury wtryskiwanego tworzywa oraz początkowej temperatury formy (domyślnie 40°C). Mając te dane oprogramowanie wyznacza rozkład średnie temperatury, który jest podstawiany do kolejnego równania zamiast domyślnej

temperatury formy. Proces jest iteracyjnie powtarzany tak długo, aż różnica między kolejnymi cyklami (są to de facto cykle wtryskiwania) będzie mniejsza od  $0,1^{\circ}\text{C}$ . W przypadku poszukiwania czasu chłodzenia program rozpoczyna poszukiwania od wstępnie założonego czasu chłodzenia (30 s) i przeprowadza iteracyjną analizę weryfikując frakcję zestalonego tworzywa, jego temperaturę oraz rozkład temperatury na powierzchni formy. Po uzyskaniu założonej zbieżności (różnicy temperatur między cyklami mniejszej od  $0,1^{\circ}\text{C}$ ) program ocenia, przedstawione powyżej kryteria zostały spełnione. Jeżeli nie, to program modyfikuje czas chłodzenia tak i przeprowadza iteracyjną analizę, aby uzyskać oczekiwane wartości. Po otrzymaniu oczekiwanych wartości analiza ulega zatrzymaniu.

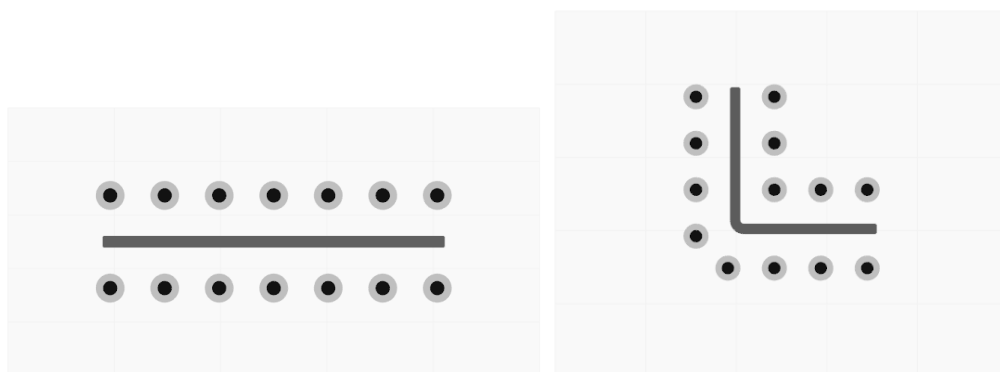
Symulacja zakłada, że całe gniazdo jest wypełnione tworzywem (uproszczenie to wynika z faktu, że czas wypełniania gniazda przez tworzywo w stosunku do czasu chłodzenia jest relatywnie krótki).

Aby uzyskać pełnię informacji przeprowadzono analizy wprowadzając modyfikacje w modelu bazowym. Zmiany wprowadzono w:

- geometrii układu chłodzenia, wypraski oraz formy (średnica kanałów chłodzących, odległość między kanałami chłodzącymi, odległość kanałów chłodzących od powierzchni wypraski, grubość wypraski oraz jej kształt, grubość formy wtryskowej),
- rodzaju tworzywa i parametrów nastawnych (temperatura tworzywa, temperatura cieczy chłodzącej, zakładana temperatura formy wtryskowej)

**Tab. 2 Zestawienie parametrów stałych**

Wymiary gabarytowe podstawy formy wtryskowej [mm]	156 x 156
Wymiary gabarytowe podstawy wypraski w kształcie płyty [mm]	100 x 100
Wymiary gabarytowe wypraski w kształcie krawędzi [mm]	51,5 x 51,5 x 100
Grubość wypraski w kształcie krawędzi [mm]	3
<b>Parametry nastawne</b>	
Objęściowe natężenie przepływu [l/min]	3,387 (dla średnicy kanału chłodzącego 8mm) 2,54 (dla średnicy kanału chłodzącego 6mm)
Czas otwarcia formy [s]	1
Analizowany czas cyklu (bez czasu otwarcia formy) [s]	20
<b>Kryteria doboru czasu chłodzenia</b>	
Temperatura wyjęcia wypraski z formy [ $^{\circ}\text{C}$ ]	103 (Moplen HP500N) 148 (Tarnamid T27 natural)
Procent zestalonego tworzywa podczas wyjęcia wypraski z formy	100%
<b>Właściwości materiałowe osadu</b>	
Gęstość [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	1,4
Ciepło właściwe [ $\text{J}/\text{kgC}$ ]	500
Przewodność cieplna [ $\text{W}/\text{mC}$ ]	0,5
<b>Właściwości materiałowe stali narzędziowej</b>	
Gęstość [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	7,8
Ciepło właściwe [ $\text{J}/\text{kgC}$ ]	460
Przewodność cieplna [ $\text{W}/\text{mC}$ ]	29



**Rys. 1 Geometria analizowanych wyprasek, form wtryskowych oraz układów chłodzenia z warstwami osadu.**

W ramach analiz wprowadzano jedną modyfikację naraz, aby można było zobrazować wpływ danego czynnika na badane aspekty. Wyjątek stanowi zmiana rodzaju tworzywa, gdzie sprawdzono wpływ temperatury cieczy chłodzącej. Zakłada się, że temperatura cieczy chłodzącej powinna być o 10-20°C niższa od oczekiwanej temperatury formy. Aby uzyskać pełny obraz sytuacji w przypadku drugiego tworzywa zastosowano ciecz o temperaturze 10 i 20°C niższej od temperatury formy, a także o temperaturze założonej dla tworzywa bazowego. Wszystkie wartości stałe przedstawiono w Tab. 2, a wszystkie wartości zmienne zostały przedstawione w Tab. 3 (wartości bazowe pogrubiono). Na Rys. 2 przedstawiono widok geometrii, która podlegała modyfikacji. Wypraski zostały ułożone tak, aby znalazły się w samym środku formy (uwzględniając ich wymiary gabarytowe).

**Tab. 3 Zestawienie parametrów zmiennych**

Srednica kanału chłodzącego $c$ [mm]	Odległość między kanałami chłodzącymi $c_s$ [mm]	Odległość kanału chłodzącego od powierzchni wypraski $c_d$ [mm]	Grubość wypraski $g_t$ [mm]
<b>6, 8</b>	<b>16,24</b>	<b>12, 18</b>	<b>3, 5</b>
Geometria wypraski $g$	Wysokość formy wtryskowej $m_h$ [mm]	Rodzaj tworzywa $p$	Temperatura wtrysku tworzywa $p_t$ [°C]
<b>plyta, krawędź</b>	<b>88 (126 w przypadku krawędzi), 126</b>	<b>Moplen HP500N,</b> Tarnamid T27 natural	<b>235, 250</b> 270
Temperatura chłodziwa $m_{ct}$ [°C]		Zakładana temperatura powierzchni gniazda $m_t$ [°C]	
<b>15, 25</b>		<b>35, 50</b>	
25, 60,70		80	

Analizy zakładały wprowadzenie warstwy osadu różnej grubości do kanałów chłodzących formy wtryskowej, aby zobrazować wpływ wielkości warstwy osadu na wydajność układu chłodzącego. Uśrednione dane materiałowe osadu ustalono na podstawie Tab. 1 oraz prac naukowych [3,4,8] i zaprezentowano również w Tab. 2.

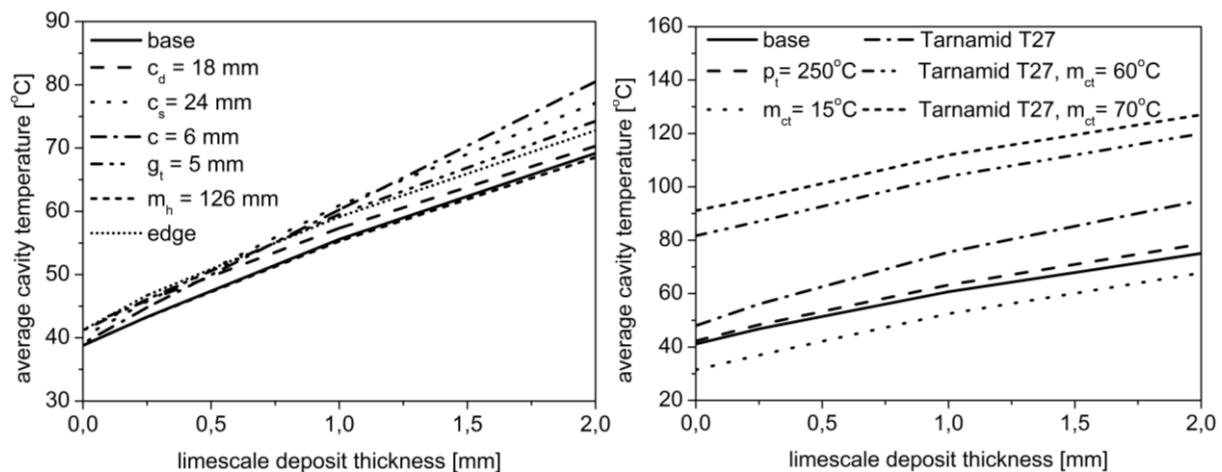
Wstępny czas chłodzenia został wyznaczony dla modelu bazowego tak, aby cała wypraska uległa zestaleni (zaokrąglony w górę do pełnych sekund). W celu porównania wpływu warstwy osadu porównano następujące rezultaty: minimalną, maksymalną oraz średnią temperaturę gniazda formującego, średnią temperaturę formy wtryskowej, procent zestalonego tworzywa a także czas, do którego należałoby wydłużyć proces chłodzenia, aby uzyskać całkowite zestalenie wypraski oraz założoną temperaturę formy.

Powyższe rezultaty mają istotne znaczenie dla eksploatacji formy jako narzędzia służącego do wyprodukowania wyrobu o założonych kryteriach jakościowych. Średnia temperatura gniazda wpływa na wielkość wypaczeń związanych ze skurczem tworzywa - wiąże się bezpośrednio z czasem potrzebnym do wychłodzenia wypraski. Im czas chłodzenia jest dłuższy, tym większy skurcz powstaje wewnątrz wypraski, który powoduje problemy z zachowaniem założonych tolerancji wymiarowych. Z drugiej strony różnica między minimalną i maksymalną temperaturą formy powoduje niejednorodny skurcz, który potęguje deformacje wypraski. Średnia temperatura formy z kolei ma bardzo duży wpływ na eksploatację samej formy i jej niezawodność. Wraz ze wzrostem temperatury formy ulega ona powiększeniu ze względu na rozszerzalność termiczną materiału. Ma to bardzo duży wpływ na jej eksploatację i niezawodność. Z jednej strony wzrost wymiarów liniowych formy powoduje zmianę wymiarów liniowych gniazda, przez co produkowane wyroby będą miały inne wymiary niż założone w przypadku dobrze chłodzonej formy. Z drugiej strony wzrost temperatury narzędzia powoduje problem z pasowaniem poszczególnych elementów ruchomych formy (np. suwaki, wypychacze), co może prowadzić do skrócenia żywotności tychże elementów. Procent zestalonego tworzywa mówi jaka grubość warstwy osadu może doprowadzić do dużych wypaczeń wypraski, która bez utwierdzenia w postaci gniazda będzie mogła się swobodnie deformować w trakcie zestalania poza formą. Czas, do którego należałoby wydłużyć proces chłodzenia jest z kolei miarą stopnia pogorszenia się wydajności układu chłodzenia w wypadku jego eksploatacji z daną warstwą osadu.

### **3.1. Rezultaty obliczeń numerycznych**

W niniejszej pracy wyniki były analizowane w 3 obszarach z podziałem na rodzaj zmiany modelu podstawowego (zmiana geometrii układu chłodzenia, wypraski i formy oraz zmiana tworzywa i parametrów nastawnych).

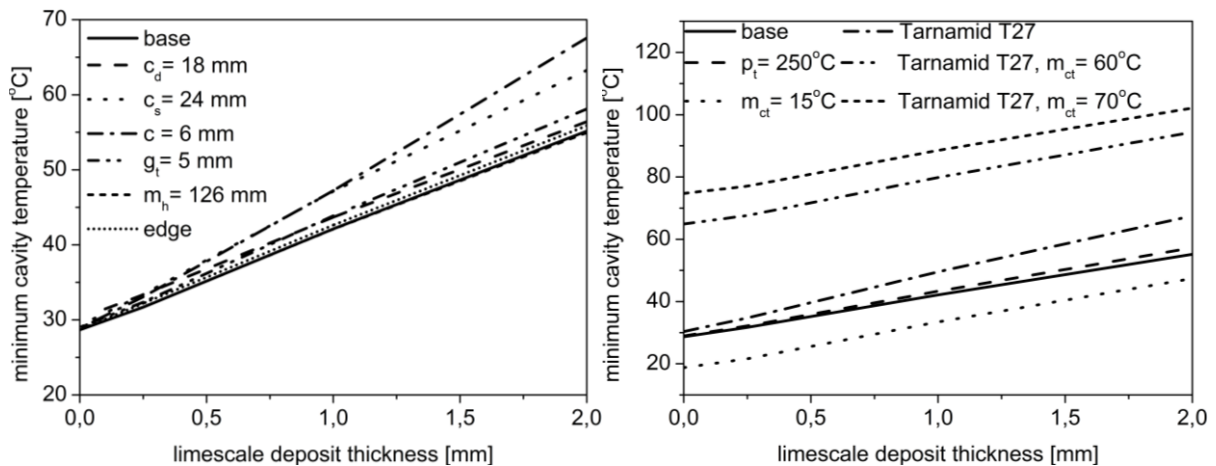
Pierwszym analizowanym aspektem była średnia temperatura na powierzchni gniazda formującego. W badanym zakresie dla każdej wprowadzonej modyfikacji modelu bazowego można założyć w przybliżeniu ( $R > 0,95$ ) liniową zależność między grubością warstwy osadu a wzrostem średniej temperatury formy (Rys.2). W przypadku braku osadu w zależności od zmian w geometrii wahała się ona od 38 do 42°C. różnice stały się wyraźniejsze dopiero przy grubości osadu równej 1 mm, aby osiągnąć największe rozróżnienie przy warstwie osadu równej 2 mm. Najmniejszą zmianę średniej temperatury powierzchni gniazda zaobserwowano dla odsunięcia kanałów chłodzących od powierzchni wypraski oraz pogrubienia formy wtryskowej. Wyraźny wzrost średniej temperatury gniazda zaobserwowano w wypadku zmiany geometrii wypraski z płyty na krawędź, co wynika z faktu utrudnionego odbioru ciepła z obszaru krawędzi. Jeszcze większy wzrost zaobserwowano w przypadku pogrubienia wypraski (wzrost wynika z większej ilości ciepła koniecznej do odbioru w trakcie cyklu). Największe zmiany zostały zaobserwowane w przypadku zwiększenia odległości między kanałami (ok. 10°C) oraz zmniejszenia średnicy kanału (ok. 15°C). W obydwóch przypadkach wyraźnie uległa zmniejszeniu liczba źródeł odbioru ciepła (mniejsza powierzchnia kanału chłodzącego w przypadku zmiany średnicy oraz mniejsza liczba kanałów chłodzących w przypadku większej odległości między kanałami chłodzącymi). W przypadku gdyby liczba kanałów chłodzących została zachowana, wzrost średniej temperatury na powierzchni gniazda wyniósłby mniej niż 5°C.



**Rys. 2 Wykres średniej temperatury na powierzchni gniazda formującego**

W przypadku zmiany parametrów nastawnych oraz tworzywa zaobserwowano dużo większe różnice w średniej temperaturze formy. Najmniejszy wpływ miało podniesienie temperatury tworzywa. Obniżenie temperatury cieczy chłodzącej dla Moplenu o  $10^{\circ}\text{C}$  spowodowało równoważny spadek minimalnej temperatury na powierzchni gniazda formującego. Zmiana tworzywa na Tarnamid nie spowodowała wyraźnej zmiany minimalnej temperatury gniazda przy braku osadu, jednak dla osadu o grubości 2 mm różnica wyniosła ok.  $15^{\circ}\text{C}$  (przy zachowaniu takiej samej temperatury cieczy chłodzącej). W przypadku zastosowania temperatury cieczy chłodzącej będącej o  $10\text{-}20^{\circ}\text{C}$  niższej od zakładanej temperatury gniazda zaobserwowano bardzo wyraźny wzrost temperatury minimalnej gniazda, jednak ta zmiana była proporcjonalna do zmiany temperatury cieczy chłodzącej.

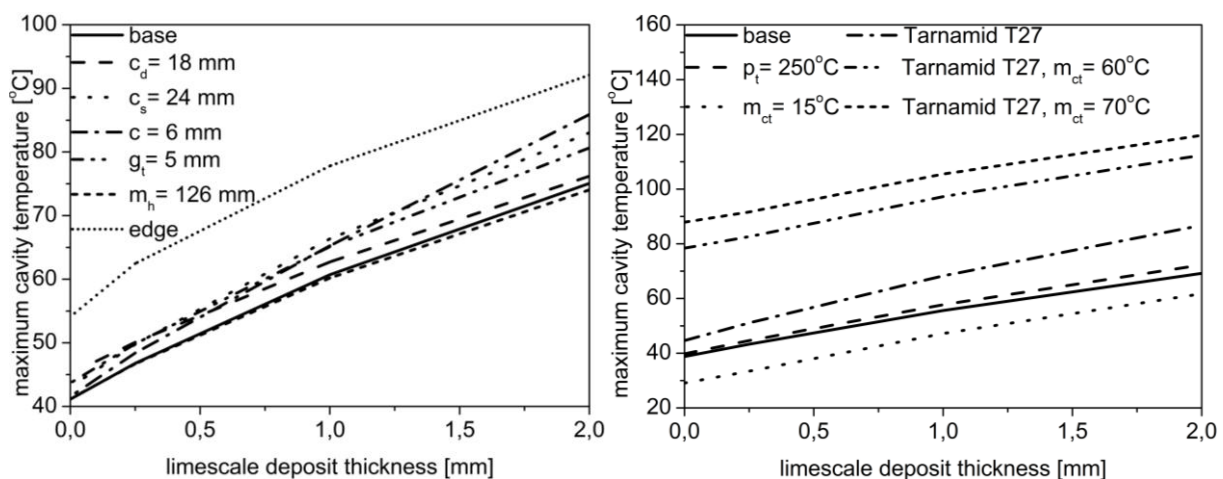
Kolejnym poddanym analizie kryterium była minimalna temperatura na powierzchni gniazda formującego. W przypadku modyfikacji geometrii dla zerowej grubości warstwy osadu średnia temperatura była równa ok.  $26\text{-}30^{\circ}\text{C}$ . Przy zwiększeniu grubości do  $0,25\text{ mm}$  średnia temperatura uległa wzrostowi o ok.  $5\text{-}7^{\circ}\text{C}$  do  $32\text{-}37^{\circ}\text{C}$  (w zależności od przypadku). Większe rozbieżności nastąpiły przy dalszym zwiększeniu grubości warstwy osadu. Dla  $1\text{ mm}$  warstwy zaobserwowano wyraźnie większy przyrost średniej temperatury dla kanału chłodzącego o mniejszej średnicy oraz układu chłodzenia z większą odległością między kanałami. Różnica ta pogłębiła się przy zwiększeniu grubości warstwy do  $2\text{ mm}$ . Zmniejszenie powierzchni odbioru ciepła poskutkowało wzrostem średniej temperatury formy o odpowiednio  $10^{\circ}\text{C}$  (zmiana odległości między kanałami) i  $20^{\circ}\text{C}$  (zmiana średnicy kanału). Zachowanie bazowej liczby kanałów chłodzących spowodowałoby, że wspomniany wzrost temperatury by nie zaistniał. W przypadku pozostałych zmian w geometrii wzrost grubości osadu powoduje w przybliżeniu liniowe zmiany temperatury z taką samą wartością współczynnika nachylenia prostej.



**Rys. 3 Wykres minimalnej temperatury na powierzchni gniazda formującego**

Zmiana tworzywa lub parametrów nastawnych spowodowała jedynie przesunięcie w górę wartości temperatury przy zachowaniu odstępów między poszczególnymi wykresami, tak jak w przypadku średniej temperatury powierzchni gniazda formującego.

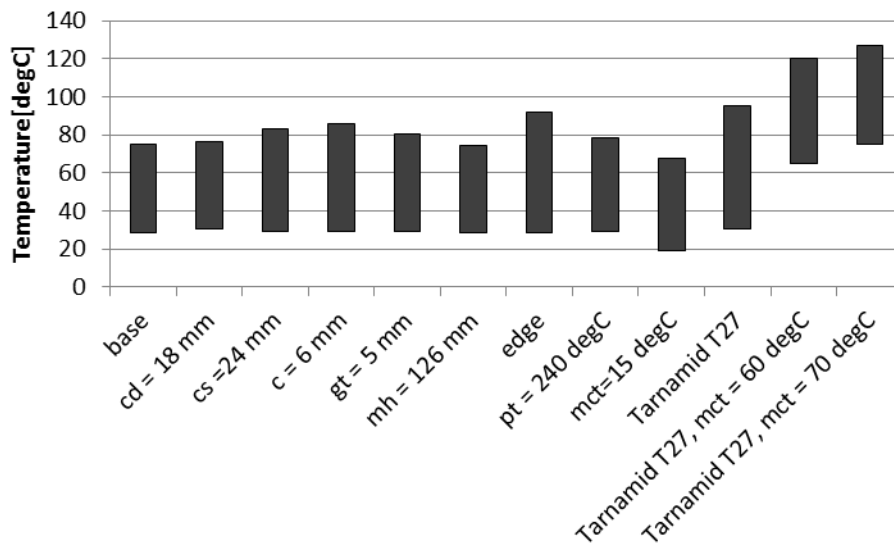
W przypadku maksymalnej temperatury na powierzchni gniazda formującego zaobserwowano wyraźne odstępstwo dla zmiany geometrii wypraski na krawędź (nawet w przypadku braku osadu). Wynika ono z faktu, że w obrębie krawędzi odbiór ciepła jest bardzo mocno utrudniony. Z tego powodu dla krawędzi obserwowana jest najwyższa temperatura maksymalna w całym zakresie grubości warstwy osadu. Podobnie jak w przypadku dwóch poprzednich parametrów zwiększenie grubości formy oraz odległości kanałów chłodzących od powierzchni formy nie powoduje zmian w stosunku do modelu bazowego. Pogrubienie wypraski, rozsuniecie kanałów chłodzących oraz zmniejszenie średnicy kanałów chłodzących daje również taki sam efekt jak w przypadku pozostałych parametrów. Nieusuwanie kanałów chłodzących w przypadku ich rozsunęcia powoduje zmniejszenie maksymalnej temperatury o 6°C względem wartości zaprezentowanej na wykresie (dla grubości warstwy osadu).



**Rys. 4 Wykres maksymalnej temperatury na powierzchni gniazda formującego**

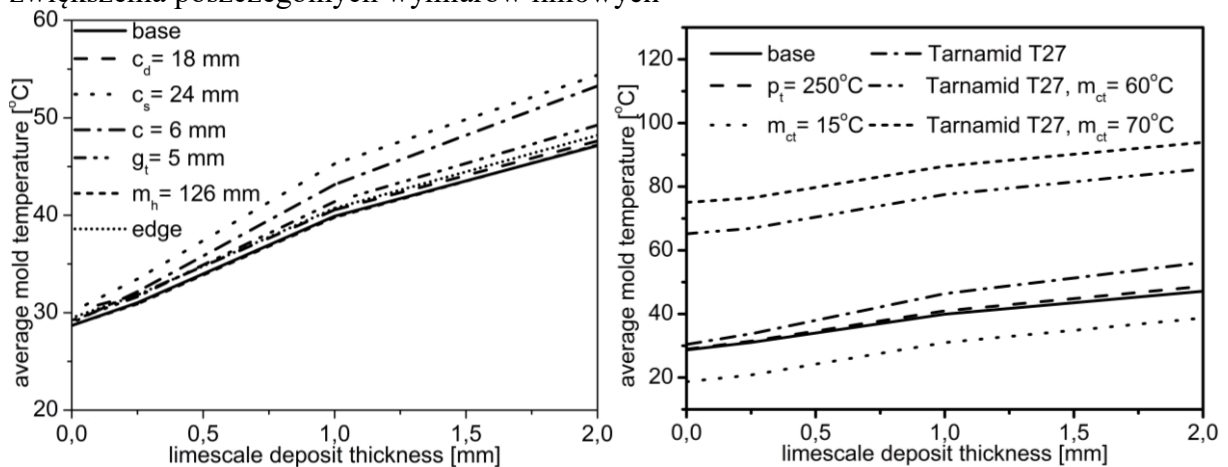
W celu porównania zmian w rozkładzie temperatury przygotowano Rys. 5, na którym zaznaczono zakres minimalnej i maksymalnej temperatury dla danego modelu. W analizowanym przypadku widać wyraźnie, że zastosowanie mniejszej średnicy kanałów chłodzących jak i większej odległości między kanałami prowadzi do wzrostu różnicy między minimalną i maksymalną temperaturą na powierzchni gniazda formującego. Zwiększenie grubości formy nieznacznie obniżyło różnicę temperatur, a zwiększenie grubości wypraski i

podniesienie temperatury wtryskiwanego tworzywa nieznacznie ją zwiększyło wielkość różnicy. Zmiana geometrii na bardziej złożoną (krawędź) poskutkowało bardzo wyraźnemu zwiększeniu różnic między minimalną i maksymalną temperaturą, podobnie jak zmiana tworzywa bez zmiany temperatury cieczy chłodzącej. Oznacza to, że zastosowanie zbyt zimnej cieczy chłodzącej prowadzi do uzyskania dużych różnic temperatur między poszczególnymi miejscami w formie wtryskowej, co będzie skutkowało dodatkowymi deformacjami związanymi z niejednorodnym skurczem. Zmiana temperatury cieczy chłodzącej spowodowała jedynie przesunięcie zakresu temperatury minimalnej i maksymalnej.



**Rys. 5 Wykres minimalnej i maksymalnej temperatury na powierzchni gniazda formującego dla warstwy osadu równej 2 mm**

Istotnym parametrem jest również średnia temperatura formy. Jej wartości w funkcji grubości warstwy osadu przedstawiono na Rys. 6. Podobne zmiany (jak w przypadku wcześniej analizowanych parametrów) zaobserwowano dla zwiększenia odległości kanałów chłodzących od powierzchni oraz zwiększenia grubości formy. Wynik dla zwiększonej objętości formy niesie ze sobą bardzo istotną informację – niezależnie od wielkości formy jej średnia temperatura pozostaje stała w funkcji grubości warstwy osadu. Wpływa to wyraźnie na eksploatację formy wtryskowej, w której ze względu na wzrost temperatury dochodzi do zwiększenia poszczególnych wymiarów liniowych



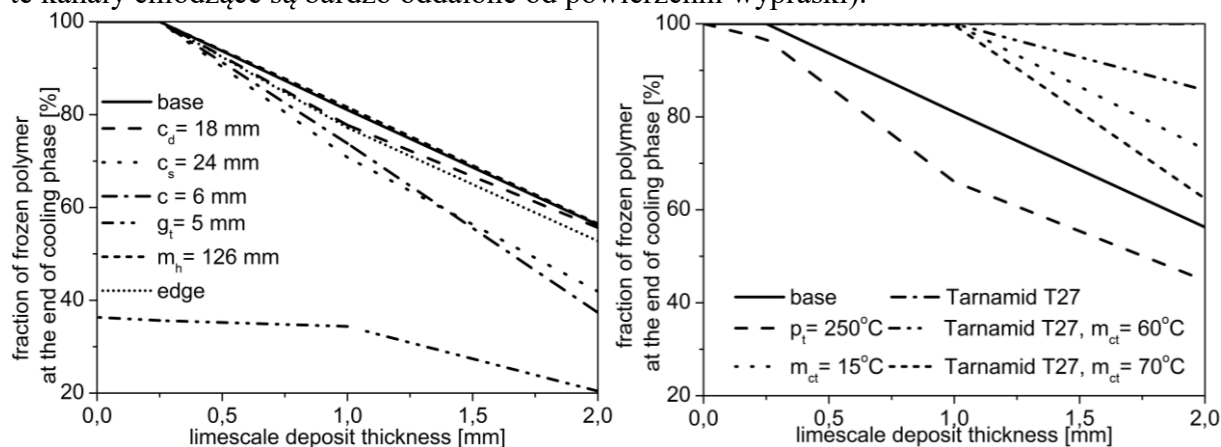
**Rys. 6 Wykres średniej temperatury formy wtryskowej**



Dla pozostałych zmian w geometrii formy zaobserwowano jedynie zmianę w przypadku zwężenia kanału oraz zwiększenia odległości między kanałami – dla średniej temperatury formy najwyższa wartość została osiągnięta w przypadku rozsunięcia kanałów chłodzących (a nie zmniejszenia średnicy kanału chłodzącego). W przypadku nieusuwania kanałów chłodzących znajdujących się daleko od powierzchni formy temperatura byłaby o 5°C niższa.

W przypadku zmian parametrów nastawnych największe zmiany w temperaturze zaobserwowano w przypadku zastosowania Tarnamidu T27 i zachowaniu pierwotnej temperatury cieczy chłodzącej (nieznacznie mniejsza zmiana została zaobserwowana w przypadku rozsunięcia kanałów chłodzących) i była równa ok. 27°C. Zakładając współczynnik rozszerzalności liniowej dla stali narzędziowej P20 (40CrMnMo9) równy 0,00012 wyznaczono wzrost wymiaru liniowego formy dla największego wzrostu temperatury. Zmiana wymiaru liniowego była równa ok. 0,05 mm dla boku formy równego 156 mm. Wiedząc, że standardowe formy wtryskowe są zdecydowanie większe stwierdzono, że podniesienie temperatury formy o zaledwie 20°C może spowodować istotne zmiany w wielkości gniazda formy wtryskowej, co z kolei będzie miało duży wpływ na dokładność wymiarową produkowanych elementów z tworzyw sztucznych. Oprócz tego wzrost temperatury formy ma wpływ na niezawodność pracy formy wtryskowej, ponieważ mogą wystąpić problemy z pasowaniem elementów ruchomych formy wtryskowej, skutkujące ich nadmiernym zużyciem.

Odkładanie się osadu w układach chłodzących wpływa nie tylko na rozkład temperatury formy wtryskowej ale też na zestalanie się tworzywa w trakcie fazy chłodzenia. W przypadku zmian geometrii dla wszystkich przypadków prócz zwiększenia grubości wypraski stwierdzono, że warstwa osadu o grubości 0,25 mm nie powoduje wydłużenia czasu potrzebnego do zestalenia wypraski (we wszystkich przypadkach osad nie spowodował obniżenia frakcji tworzywa zestalonego poniżej 100%. Wyraźny spadek zaobserwowano dla warstwy osadu o grubości 1 mm. W zależności od układu zestaleni uległo od 70 do 80% wypraski. Podobnie jak dla poprzednich parametrów zaobserwowano niewielkie różnice w przypadku zwiększenia grubości formy oraz zwiększenia odległości kanałów chłodzących od powierzchni formy. Dla warstwy osadu o grubości 2 mm najmniejszy procent zestalonego tworzywa zaobserwowano dla mniejszych kanałów (niewiele większy dla rozsunięcia kanałów chłodzących). Również i w tym przypadku nieusuwanie nadmiarowych kanałów chłodzących spowodowało podniosłoby procent zestalonego tworzywa do 55% (pomimo, że te kanały chłodzące są bardzo oddalone od powierzchni wypraski).

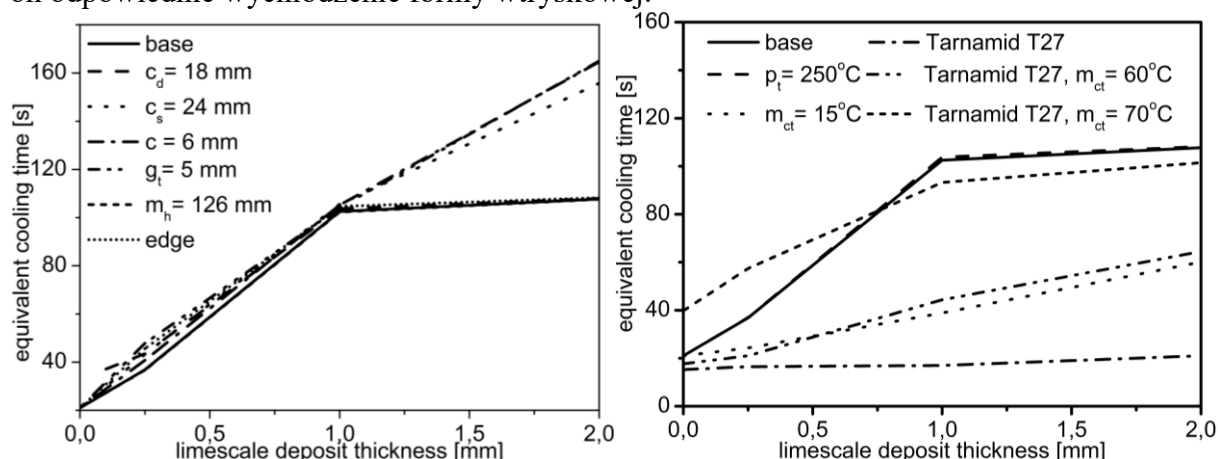


Rys. 7 Wykres frakcji zamrożonego tworzywa na końcu fazy chłodzenia

W przypadku zmian parametrów nastawnych zaobserwowano dużo większe różnice w wielkości zestalonego tworzywa. Zwiększenie temperatury tworzywa do 250°C spowodowało, że nawet dla cienkiej warstwy osadu równej 0,25 mm dochodzi do sytuacji, w której wypraska nie ulega całkowitemu zestaleniu przed wyjęciem z formy. Zastosowanie niższej temperatury cieczy chłodzącej spowodowało, że nawet dla warstwy osadu o grubości 1 mm cała wypraska ulegnie zestaleniu przed jej usunięciem z formy wtryskowej. W przypadku zmiany tworzywa na Tarnamid niezależnie od grubości warstwy osadu udało się zestalić wypraskę w ciągu założonego czasu chłodzenia (bez zwiększania temperatury cieczy chłodzącej). W wypadku podniesienia temperatury cieczy chłodzącej do 60°C zaobserwowano całkowite zestalenie się wypraski przy warstwie osadu o grubości 1 mm (dla cieczy chłodzącej o temperaturze 70°C zestaleniu uległo 99,71% wypraski).

Ostatnim analizowanym aspektem był teoretyczny czas chłodzenia potrzebny do zestalenia całej wypraski oraz wychłodzenia formy do założonej temperatury. W przypadku zmian geometrii zaobserwowano, że dla części przypadków wzrost grubości warstwy osadu powyżej 1 mm nie powoduje znaczącego wydłużenia czasu chłodzenia. Efekt ten wystąpił w przypadku zmiany grubości formy wtryskowej, odległości kanałów chłodzących od powierzchni wypraski oraz zmiany geometrii wypraski. W pozostałych przypadkach dalszy wzrost grubości warstwy osadu powodował wyraźne wydłużenie czasu chłodzenia.

Należy wziąć pod uwagę fakt, że tak długi czas chłodzenia wynikał nie z problemów z zestaleniem tworzywa, a z problemem schłodzenia formy do założonej temperatury. Najdłuższy czas potrzebny do zestalenia wypraski nie przekroczył 30 sekund, jednak zakładał on odpowiednie wychłodzenie formy wtryskowej.



**Rys. 8 Wykres równoważnego czasu chłodzenia, w którym całe tworzywo ulegnie zestaleniu oraz forma uzyska założoną temperaturę gniazda.**

Zmiana temperatury tworzywa na 250°C dała podobny rezultat jak model bazowy. Zmniejszenie temperatury cieczy chłodzącej do 15°C pozwoliło dużo szybciej schłodzić formę wtryskową do zakładanej temperatury (prawie 50% skrócenie czasu chłodzenia). W przypadku zastosowania Tarnamidu, ustawienie temperatury cieczy chłodzącej na 70°C spowodowało, że relacja między długością czasu chłodzenia a grubością warstwy osadu zaczęła przypominać relację dla Moplenu przy 25°C. Zastosowanie cieczy o 10°C chłodniejszej spowodowało, że relacja przypominała sytuację, gdzie zastosowano Moplen o temperaturze 15°C. Oznacza to, że nie temperatura cieczy chłodzącej, a względna różnica między zakładaną temperaturą formy a temperaturą cieczy ma istotny wpływ na potrzebny czas chłodzenia. Zastosowanie cieczy o temperaturze 25°C dla Tarnamidu sprawiło, że czas chłodzenia wyniósł nieco ponad 13 sekund (przy ok. 19,5 s dla Moplenu), co ma związek z temperaturą zestalenia Tarnamidu. Nawet przy 2 mm warstwie osadu czas potrzebny do schłodzenia wynosi niewiele ponad 20 s (a czas zestalenia wypraski wynosi ok. 19,2 s).

#### 4. Podsumowanie

Przeprowadzone analizy pokazały istotny wpływ osadzającego się kamienia w układzie chłodzącym na eksploatację formy wtryskowej. Ze względu na swoją niską przewodność osad powoduje problemy z prawidłowym odbiorem ciepła z formy wtryskowej.

W przypadku wystąpienia grubszej warstwy osadu (1 mm) stwierdzono jej bardzo wyraźny wpływ na wszystkie badane aspekty. Z punktu widzenia eksploatacji i niezawodności formy wtryskowej największe znaczenie ma średnia temperatura formy, która ulega rozszerzeniu wskutek wzrostu temperatury. Może to doprowadzić do problemów z pasowaniem elementów ruchomych, prowadzących do zmniejszenia żywotności formy jako narzędzia. Z drugiej strony rozkład temperatury na powierzchni gniazda oraz wydajność chłodzenia miały bardzo duży wpływ na niezawodność formy wtryskowej jako narzędzia, które ma za zadanie uformować wyrób w określonym czasie oraz o określonych parametrach. Niejednorodny rozkład temperatury na powierzchni formy może doprowadzić do zwiększenia deformacji wypraski i tym samym problemów z zachowaniem tolerancji. Niewydajny układ chłodzenia wydłuży czas procesu oraz spowoduje, że wypraska będzie się zestalać swobodnie po wyjęciu z formy, co również poskutkuje dalszymi deformacjami. Zmiana wymiarów formy na skutek podniesienia jej średniej temperatury wpłynie na poszczególne wymiary, co może spowodować niezachowanie założonych wcześniej tolerancji.

Obliczenia pokazały, że temperatura tworzywa, odległość kanałów od powierzchni formy, a także wielkość formy ma niewielki wpływ przebieg procesu chłodzenia. Oznacza to, że zastosowanie zbyt dużej formy wtryskowej będzie skutkowało dodatkowymi problemami z tolerancją wymiarową. Większy wpływ miała grubość wypraski, ze względu na fakt, że większa ilość ciepła musiała zostać odebrana z tworzywa, które ma właściwości izolacyjne. Bardzo duży wpływ miała z kolei średnica kanałów chłodzących, szczególnie w warunkach utrudnionego odbioru ciepła, podobnie jak liczba kanałów chłodzących. W przeprowadzonych analizach rozsuniecie kanałów chłodzących spowodowało, że część z nich znalazło się w dużej odległości wypraski, więc w praktyce przemysłowej nie zostałyby one wywiercone. Ich brak spowodował dużo większe podniesienie średniej temperatury formy wtryskowej wraz ze wzrostem grubości warstwy osadu aniżeli w przypadku gdyby zostały wywiercone. Oznacza to, że wprowadzenie dodatkowych kanałów chłodzących w obszarze, który normalnie nie brałby udziału w odbiorze ciepła, w przypadku pojawienia się osadu może on zredukować jego niekorzystne oddziaływanie na eksploatację formy wtryskowej. W analizie uwzględniono dwa rodzaje tworzyw, aby porównać ich wpływ w powiązaniu z różną temperaturą cieczy chłodzącej. Dla tworzywa wymagającego Wysokiej temperatury formy istnieje teoretyczna możliwość zastosowania dużo zimniejszej cieczy chłodzącej niż zakładana temperatura formy, co skutkuje wyraźnym skróceniem czasu chłodzenia, zmniejszeniem średniej temperatury formy, ale wprowadzi niejednorodność w rozkładzie temperatury gniazda formującego, która może rzutować w przypadku bardziej skomplikowanych wyprasek na deformacje wypraski. W przypadku tworzywa wymagającego niższej temperatury formy zmniejszenie temperatury cieczy chłodzącej jest problematyczne ze względu na kosztocłonność procesu ochładzania samego medium.

Należy mieć świadomość, że analizy zostały przeprowadzone dla bardzo prostej geometrii wypraski, jaką jest płyta i krawędź. W dzisiejszych czasach elementy produkowane metodą wtryskiwania są bardzo złożone, nierzadko grubościennie (szczególnie w branży motoryzacyjnej), przez co w rzeczywistej sytuacji wzrost średniej temperatury formy może wynieść nawet kilkadziesiąt stopni. W niektórych sytuacjach skomplikowany układ wypychaczy powoduje, że niemożliwe jest zastosowanie bardzo wydajnego chłodzenia, ponieważ kanały chłodzące przecinałyby miejsca, w których znajdowałyby się wypychacze.

Oznacza to, że wielkość zmian wymiarów liniowych może wynieść nawet 0,5 mm, co bardzo negatywnie wpłynie na eksploatację formy wtryskowej, która cechuje się wąskimi tolerancjami wymiarowymi.

## Literatura

1. Autodesk Inc., 11 factors for efficient mold cooling - Balancing speed and quality to reduce cycle time, 2016
2. Autodesk Inc., Autodesk Moldflow Insight, San Rafael, CA. 94903, USA, 2017
3. Bott T.B., Fouling of Heat Exchangers, Amsterdam-Lausanne-New York-Oxford-Shannon-Tokyo: Elsevier, 1995
4. Gane P. A. C., Cathy J. Ridgway C. J., Schoelkopf J. Heat transfer through calcium carbonate-based coating structures: observation and model for a thermal fusing Process, Omya Development AG, University of Maine
5. Garrett-Price B. A., Smith S. A., Watts R. L., Knudsen, J.G. Fouling of Heat Exchangers: Characteristics, Costs, Prevention, Control, and Removal, Parkdridge, NJ: Noyes Publications, 1985
6. 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
7. Kocsis D., Modeling and vibration analysis of limescale deposition in geothermal pipes, Environmental Engineering and Management Journal, 2014; 13 (11): 2817-2824
8. Mostafa M.A., Fouling of Heat Transfer Surfaces, Heat Transfer - Theoretical Analysis, Experimental Investigations and Industrial Systems, Prof. Aziz Belmiloudi (Ed.), InTech 2011, <https://doi.org/10.5772/13696>
9. Pepliński K., Bieliński M. Prototype modular inserts to boost the cooling of mold cavities in polymer processing, Polimery, 2015; 60 (11-12): 747-750 <http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2015.747>
10. Saifi A., Amiri A. E., Elhassnaoui A., Obbadi A., Errami Y. Sahnoun S. Thermography model for detecting the scale thickness in water pipes, 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), pp. 1-4, Marrakech, 2015
11. Shah R. K., Sekulic D. P., Fundamentals of Heat Exchanger Design, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2003
12. Sikora R., Przetwórstwo Tworzyw Wielkocząsteczkowych, Warszawa: Wydawnictwo Edukacyjne Zofii Dobkowskiej, 1993
13. Zhang Z., Zhang B., Li Z., Study on the prediction model of heat transfer coefficient during tube digestion, Light Metals 2015, pp. 35-38, Springer International Publishing 2016, [http://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4\\_6](http://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4_6)