

Łukasz JĘDRZEJKO¹

Opiekun naukowy: Ireneusz WRÓBEL²

ANALIZA PROCESU NAGRZEWANIA CIŚNIENIOWEJ FORMY ODLEWNICZEJ METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę termiczną ciśnieniowej formy odlewniczej w czasie jej nagrzewania. Celem pracy było uzyskanie rozkładu temperatur elementów roboczych formy. Rezultaty symulacji porównano z zdjęciem termowizyjnym rzeczywistej formy. W wyniku pracy potwierdzono możliwość stosowania metod MES (sprężonej analizy termiczno-przepływowej) w analizie skomplikowanych procesów jakim jest nagrzewanie się formy odlewniczej

Słowa kluczowe: analiza termiczna, metoda elementów skończonych, odlewy magnezowe, forma ciśnieniowa

THERMAL ANALYSIS OF DIE CASTING MOLD IN FINITE ELEMENTS METHOD

Summary: The results of die casting mold steady state thermal analysis is presented in this paper. The aim of article was to obtain similar temperature outcome. The results of simulation was compared with thermo vision pictures of mold. Ultimately result showed rightful of using FEM methods in analyzing difficult processes.

Keywords: Thermal analysis, finite elements method, magnesium casting, die mold

1. Wstęp

Stabilizacja rozkładu temperatury w formie ciśnieniowej jest jednym z podstawowych elementów automatyzacji procesu odlewania. Wpływa ona znacząco na zmniejszenie liczby braków i polepszenie właściwości odlewu oraz na trwałość formy. Gdy temperatura formy jest za niska odlew krzepnie gwałtownie co powoduje nadmierne utwardzenie jego struktury, pęknięcia skurczowe oraz trudności z zasilaniem odlewu. Zbyt wysoka temperatura wydłuża czas stygnięcia odlewu, co przekłada się na

¹Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, specjalność: Komputerowo Wspomagane Konstruowanie i Wytwarzanie

² dr hab. inż., prof. ATH, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, iwrobel@ath.bielsko.pl

wydłużenie czasu cyklu maszyny, wpływa na obniżenie właściwości mechanicznych takich jak wytrzymałość na rozciąganie oraz twardości odlewu oraz skraca żywotność formy [1].

Forma w swojej objętości ma niejednorodny rozkład temperatur, który tworzą gradienty temperatur pomiędzy obszarami gorętszymi takimi jak na przykład szczelina wlewowa i chłodniejszymi na obrzeżach formy. Charakter strumienia ciepła jaki przyjmuje forma również nie ma ciągłego charakteru ponieważ składają się na niego kolejne sekwencje impulsów cieplnych o tej samej intensywności, dostarczających ciepło (np. wtrysk ciekłego stopu) bądź odbierających ciepło (nanoszenie emulsji lubryfikatora). Powierzchnia wnętrza formy podlega wahaniom temperatury, których amplitudę łagodzi pojemność cieplna formy. Stosując układy stabilizacji temperatury można ograniczyć te wahania w pobliżu pewnej wartości średniej będącej temperaturą równowagi cieplnej[2].

2. Obiekt badań

Do przeprowadzenia symulacji wykorzystano model 3D jednego segmentu wnętrza (części dolnej) rzeczywistej formy ciśnieniowej do odlewania stopów magnezu. Część dolna formy wykonana jest z stali chromowo-molibdenowo-wanadowej UddeholmOrvarSupreme o składzie chemicznym i właściwościach fizycznych podanych w tabeli 1:

Tabela 1. Skład chemiczny i właściwości stali w zależności od temperatury

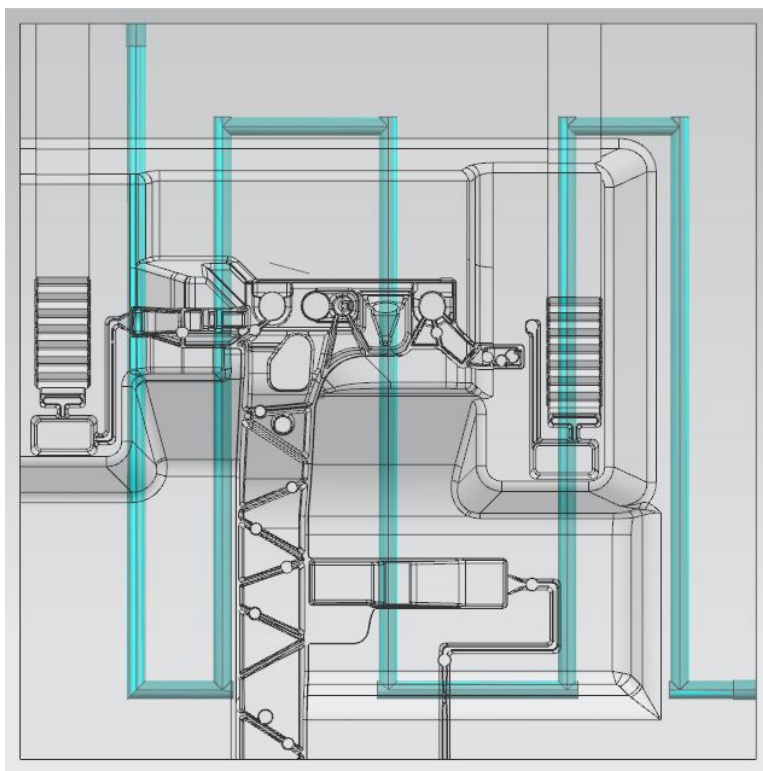
Skład chemiczny, %	C 0,39	Si 1,0	Mn 0,4	Cr 5,2	Mo 1,4	V 0,9
Temperatura	20°C		400°C		600°C	
Gęstość, kg/m ³	7800		7700		7600	
Moduł Younga E, MPa	210000		180000		140000	
Współczynnik rozszerzalności cieplnej α			12,6x10 ⁻⁶		13,2x10 ⁻⁶	
Przewodność cieplna, W/m°C	25		29		30	
Pojemność cieplna, kJ/kg°C	468					

Nośnikiem ciepła w formie jest olej mineralny wysokorafinowany Avia Thermofluid 6 o właściwościach fizykochemicznych podanych w tabeli 2:

Tabela 2. Właściwości fizykochemiczne oleju

Temperatura początku wrzenia i zakres temperatur wrzenia °C	>250; 350-600
Temperatura zapłonu, (t.o.), °C	220
Gęstość w temperaturze 15°C, g/cm ³	0,866
Rozpuszczalność	nie rozpuszczalny w wodzie, rozpuszczalny w większości rozpuszczalników organicznych
Temperatura samozapłonu	>270
Lepkość kinematyczna w temp. 100°C	5,5-6,5

Model 3D segmentu formy został uproszczony w celu ograniczenia mocy obliczeniowej potrzebnej do wykonania symulacji oraz aby ułatwić podział bryły na elementy skończone (dyskretyzację). W tym celu usunięto wszystkie elementy ruchome takie jak wypychacze, elementy złączne typu śruby, trzpienie, kołki a także niewielkie napisy i rowki których rozmiar jest pomijalnie mały w stosunku do rozmiaru formy a ich skomplikowana geometria miałaby duży wpływ na regularność siatki w obszarze ich występowania. Na rysunku 1 przedstawiono analizowany segment formy po uproszczeniu geometrii. Kolorem niebieskim zaznaczono kształt gorących kanałów w których płynie olej o temperaturze 200 °C .



Rysunek 1. Model 3D analizowanego segmentu formy

3. Dane do symulacji

W celu przeprowadzenia symulacji konieczne jest zebranie danych o rzeczywistym obiekcie. Składają się na nie właściwości termiczne i mechaniczne materiału formy oraz cieczy, warunki termiczne, w których forma pracuje tj. temperatura otoczenia, ruch powietrza (rodzaj konwekcji), parametry urządzenia podającego olej do formy takiej jak temperatura i wielkość przepływu. Solver Simcenter Thermal / Flow programu NX wymaga podania danych dla ciał stałych i ciekłych podanych w tabeli 3. W przypadku stosowanego oleju producent nie podał w karcie charakterystyki jego właściwości termicznych, dlatego użyto danych dla oleju mineralnego zawartych w bazie materiałów programu NX.

Tabela 3. Właściwości termiczne materiałów wymagane do przeprowadzenia symulacji [4]

Ciała stałe	Ciecze
Gęstość kg/m ³	Gęstość kg/m ³
Przewodność cieplna W/m*C	Przewodność cieplna W/m*C
Ciepło właściwe, J/kg*C	Ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu, J/kg*C
Emisyjność	Lepkość dynamiczna kg/m*s

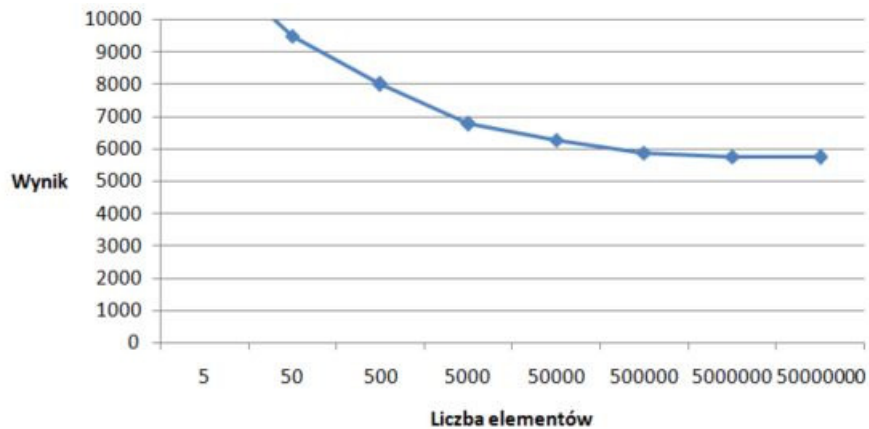
W przypadku emisyjności podano współczynnik dla zakresu 8-14μm wynoszący dla stali polerowanej 0.56 [5].

Olej, który jest podawany do formy ma temperaturę równą 250°C, a wydajność pompy wynosi 20 l/min. Temperatura na hali produkcyjnej wynosi średnio 25°C, a w miejscu nagrzewania formy przed założeniem na maszynę nie jest odczuwalny ruch powietrza, dlatego przyjęto efektywność konwekcji na poziomie 6 W/m²*K.

4. Budowa modelu obliczeniowego

4.1. Budowa modelu dyskretnego

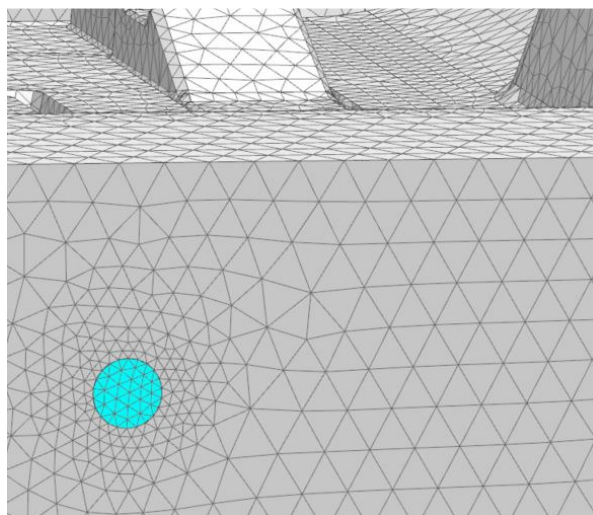
W przypadku analizowanej formy widać znaczącą różnicę wymiarów gabarytowych formy i średnicy kanałów olejowych. Znana jest zależność, że zwiększanie liczby elementów zwiększa dokładność wyniku. Zmniejszając rozmiar siatki, za każdym razem przeprowadzając obliczenia i porównując wyniki można zauważyć, że zbliżają się one asymptotycznie do pewnej wartości (rys.2). Dalsze zmniejszanie rozmiarów elementów skończonych nie daje znaczącej zmiany (poprawy) wartości wyników symulacji.



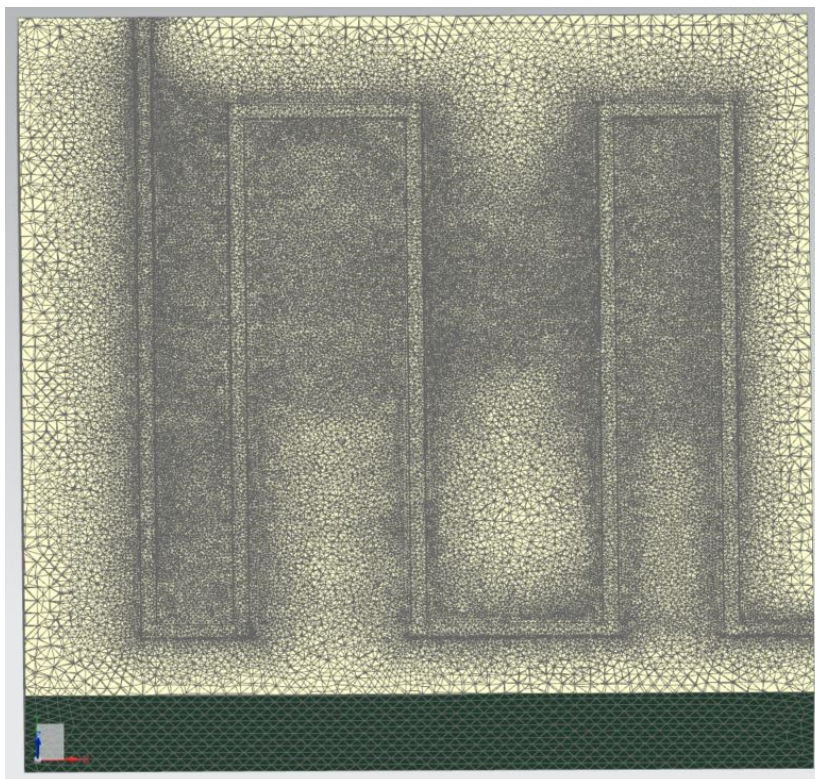
Rysunek 2. Wpływ liczby elementów na wyniki symulacji

Znając wartość asymptoty (liczby elementów) można zakończyć obliczenia. Taka metoda sprawdza się dobrze w przypadku modeli, których czas obliczeń jest akceptowalnie krótki. W przypadku analizowanego modelu takie podejście byłoby czasochłonne. Analizowaną część formy zdyskretyzowano trójwęzłowymi elementami typu TETRA3. Producent oprogramowania zaleca tego typu elementy do sprzężonych analiz termiczno - przepływowych. Dla modelu formy średnia wielkość elementu wynosiła 10 mm.

Kanał olejowy ma średnicę równą 15,25 mm co jest wielkością dużo mniejszą w porównaniu do gabarytów modelu formy (555mm x 555mm x 275mm). Dlatego w obszarze kanału olejowego siatka modelu MES miała mniejszy rozmiar (równy 4 mm). Ponadto aby zmniejszyć błąd obliczeń należy zapewnić połączenie węzłów kanału z węzłami formy co przedstawiono na rysunku 3 i 4.



Rysunek 3. Zagęszczenie siatki i połączenie węzłów w pobliżu kanału (niebieski)



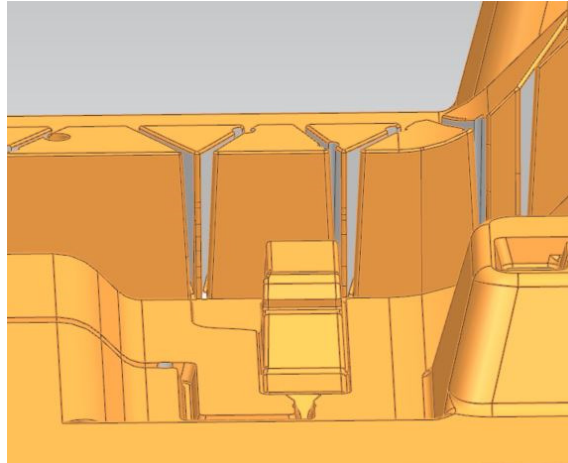
Rysunek 4. Gradacja siatki w przekroju przez kanał i matrycę

W wyniku takiego stopniowania siatki udało się zmniejszyć liczbę elementów składających się na matrycę z 15,3 mln do 4,2 mln, przy zachowaniu gęstego podziału elementów w pobliżu istotnego dla zagadnienia wymiany ciepła w formie obszaru.

4.2 Warunki brzegowe

W przypadku analizowanej formy do warunków brzegowych zalicza się konwekcję do otoczenia, promieniowanie, oraz temperaturę początkową matrycy oraz warunki związane z temperaturą i przepływem oleju w kanałach.

Na wszystkich powierzchniach formy, które mają swobodny do powietrza zdefiniowano konwekcję swobodną do otoczenia, przy temperaturze otoczenia równej 25°C. (rys.5). Temperatura początkowa formy, jest równa temperaturze utrzymującej się na narzędziowni i wynosi też 25°C.

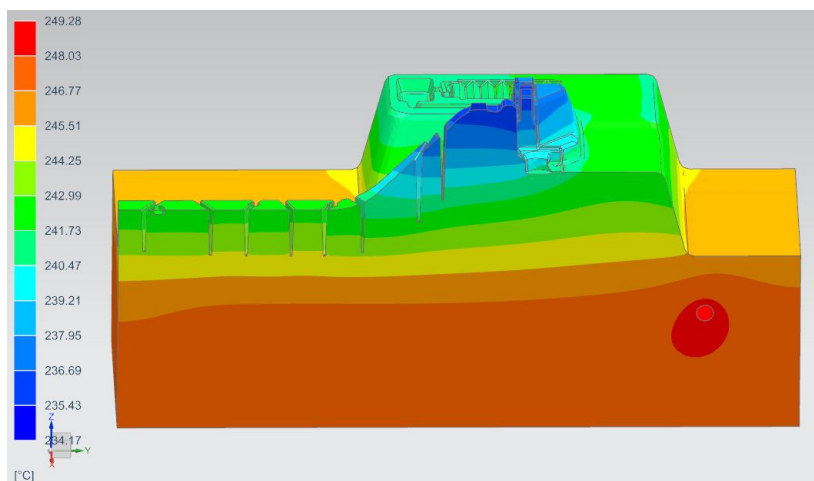


Rysunek 5. Powierzchnie, na których zachodzi konwekcja swobodna (żółty)

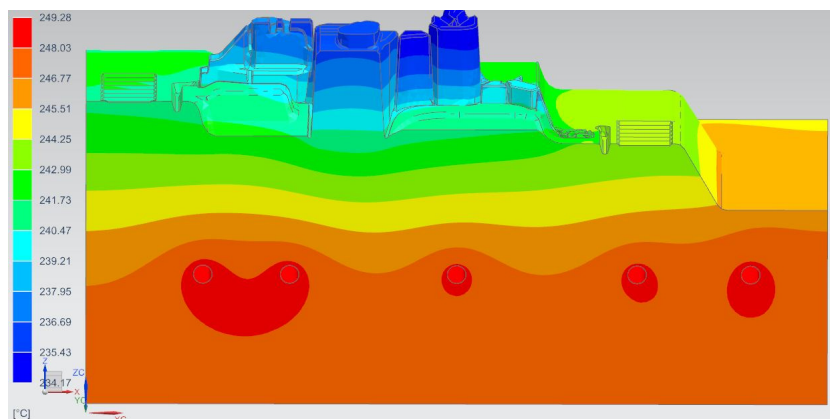
Zdefiniowano też warunki przepływu oleju przez kanał, na wlocie i wylocie z analizowanego fragmentu formy. Ilość podawanego oleju utrzymuje się w granicach 20 l/min a jego temperatura to 250°C. Na wyjściu kanału olejowego z formy zdefiniowano warunki swobodnego wypływu. Tak zbudowany model został poddany analizie w solverze *NX Thermal-Flow*.

5. Wyniki symulacji

Na rysunku 6 oraz 7 przedstawiono warstwicę temperatur na powierzchniach roboczych w określonych przekrojach formy.



Rysunek 6. Warstwicę temperatur w przekroju prostopadłym do osi *x*



Rysunek 7. Warstwice temperatur w przekroju prostopadłym do osi y

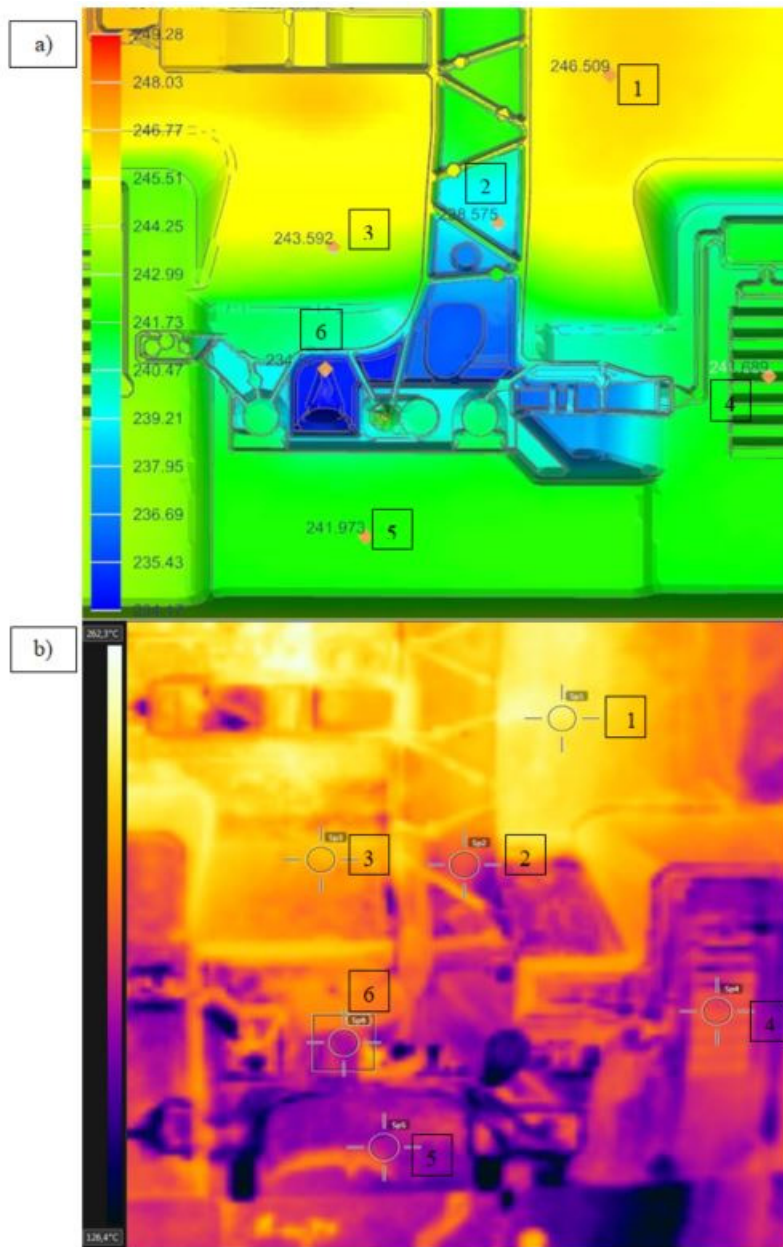
Analizując wyniki przedstawione na rysunkach 6 i 7 można zauważyć obszary o podwyższonej temperaturze równej 249,28 °C w okolicach kanałów olejowych. Należy pamiętać że w kanałach płynie olej o temperaturze początkowej 250 °C.

Na rysunku 8 a) i b) przedstawiono porównanie rozkładów temperatury na powierzchniach formy uzyskanych na drodze symulacji i z pomiaru kamerą termowizyjną.

Porównując wyniki symulacji z obrazem uzyskanym na kamerze termowizyjnej uzyskano zbliżony rozkład temperatur w analizowanym fragmencie formy. Zaobserwowano jednak różnice temperatur w wyznaczonych punktach formy, co przedstawiono na rysunku 8 oraz tabeli 4.

Tabela 4. Porównanie temperatur w zdefiniowanych punktach pomiarowych

Punkt pomiarowy:	Temp. z symulacji, °C	Temp. z kamery °C	Różnica względna
1	246,5	240,9	2%
2	238,6	200,9	19%
3	243,6	225,6	8%
4	241,7	199,3	21%
5	241,9	183,5	32%
6	234,5	182,1	29%



Rysunek 8. Porównanie rozkładu temperatury uzyskanych z: a) symulacji i b) obrazu z kamery termowizyjnej

Punkty leżące na płaszczyźnie podziału formy mają bardzo zbliżone wartości temperatur, lecz punkty 2, 4 i 6 znajdują się na powierzchniach mających kontakt z ciekłym magnezem. Skutkiem czego ustalenie jednej wartości emisyjności na tych

powierzchniach jest niemożliwe ze względu na zachodzące na powierzchni wnęki dynamiczne procesy dyfuzji, korozji, spalania powłok oddzielających oraz różnice w prędkości i temperaturze płynącego stopu. Ustalenie dokładnych wartości konwekcji na różnych powierzchniach również jest problematyczne. Można jednak założyć, że elementy wystające ponad powierzchnię podziału formy będą chłodzone intensywniej poprzez swobodniejszy przepływ powietrza.

Należy również pamiętać, że analizie nie została poddana cała forma lecz jej fragment. Przez co nie uwzględniono oddziaływania termicznego innych segmentów na siebie. Jednakże przeprowadzenie analizy dla całej formy odlewniczej jest trudne i wymaga ogromnych nakładów mocy obliczeniowej.

6. Wnioski.

Analizując wyniki symulacji stwierdzono zgodność wyników symulacji (rozkład temperatury) dla powierzchni roboczej formy z rzeczywistym obiektem, oraz niezgodność dla zdefiniowanych obszarów wystających ponad powierzchnię podziału co może być spowodowane zakłóceniami pomiaru termowizyjnego poprzez niejednorodność faktury powierzchni wnęki. Wykazano, że można z powodzeniem stosować metodę elementów skończonych do analizowania procesów nagrzewania formy odlewniczej. Dokładność wyników symulacji w dużej mierze zależy od znajomości parametrów i czynników mający bezpośredni wpływ na modelowane zjawiska.

LITERATURA

1. DUDYK M., WASILEWSKI P.: Oprzyrządowanie technologiczne dla obróbki bezwiórowej. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1993
2. BIAŁOBRZESKI A.: Odlewnictwo ciśnieniowe. WNT, Warszawa 1992.
3. KIEŁBUS A., CIBIS R.: Wpływ parametrów odlewania ciśnieniowego na strukturę i właściwość stopu magnezu AM50. Archiwum Odlewnictwa, **28**(2006)18, 185-190
4. Simcenter Thermal and Flow Analysis, Student Guide, 2016
5. Serwis internetowy Remes – *Tabela emisyjności*: <http://www.remes.gda.pl/wp-content/uploads/2013/11/Tabela-emisyjno%C5%9Bci.pdf> 15.10.2018