1/21

ARCHIWUM ODLEWNICTWA Rok 2006, Rocznik 6, Nr 21(1/2) ARCHIVES OF FOUNDARY Year 2006, Volume 6, N° 21 (1/2) PAN – Katowice PL ISSN 1642-5308

SYMULACJA CIEPLNA PROCESU TWORZENIA WARSTWY KOMPOZYTOWEJ NA ODLEWIE MODELOWYM

C. BARON¹, J. SZAJNAR², J. GAWROŃSKI³, D. BARTOCHA⁴. Foundry Department of Institute of Engineering Materials and Biomaterials, Faculty of Mechanical Engineering, Silesian University of Technology ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice, POLAND

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki cieplnej symulacji tworzenia warstwy kompozytowej na staliwnym odlewie modelowym. Celem badań było wyznaczenie parametrów technologicznych procesów tworzenia warstwy kompozytowej, dla których można uzyskać dobrej jakości warstwę zbrojącą o pożądanej grubości. Dla założonych zmian wybranych parametrów technologicznych wyznaczono rozkład temperatury w odlewie modelowym oraz przebieg zmian temperatury w charakterystycznych punktach wkładki kompozytowej. Obliczenia numeryczne wykonano przy pomocy programu NovaFlow&Solid 2.9 r81. Uzyskanie warstwy kompozytowej dobrej jakości i o pożądanej grubości na odlewie jest uzależnione od procesu i poziomu temperatury zalewania w trakcie odlewania. Badania pozwoliły ustalić, jakie parametry technologiczne wpływają na ten proces i jakie kryteria powinna spełniać technologia odlewania tego typu odlewów. Dzięki otrzymanym wynikom można opracować wytyczne i zasady projektowania konstrukcji i doboru parametrów technologicznych wykonywania odlewów zbrojonych powierzchniowo.

Key words: composites, technological design, casting, surfacing alloy layer

¹ mgr inż., czeslaw.baron@polsl.pl

² dr hab. inż. Prof. Pol. Śl., jan.szajnar@polsl.pl

³ prof. dr inż., jozef.gawronski@polsl.pl

⁴ dr inż., dariusz.bartocha@polsl.pl

1. WSTĘP

W dzisiejszym zaawansowanym technologicznie świecie elementom wszelkiego rodzaju maszyn stawiane są coraz wyższe wymagania z jednoczesnym naciskiem na obniżenie kosztów produkcji i emisji szkodliwych dla środowiska substancji. Charakterystycznym przykładem są elementy maszyn narażone na silne zużycie ścierne niektórych ich powierzchni jednocześnie obciążone udarowo, co wymaga od materiału, z którego są wykonane, posiadania wysokiej granicy plastyczności. Połączenie tak różnych właściwości, wysokiej odporności na ścieranie i dobrej plastyczności wymaga zastosowania elementów wykonanych z materiałów plastycznych z wzmocnionymi tymi powierzchniami, które narażone są na zużycie ścierne. Wzmocnienie takie realizuje się na wiele sposobów np.: napawanie warstwy stopowej, zgrzewanie elementu odpornego na ścieranie z plastycznym korpusem, lutowanie twarde. Wszystkie te technologie posiadają wiele zalet, ale także wad, a przede wszystkim są drogie. Wad tych pozbawiona jest technologia odlewniczego wykonywania warstw zbrojących (kompozytowych) na wybranych powierzchniach odlewu z równoczesnym kształtowaniem odlewu. Kompozyt taki powstaje bezpośrednio podczas zalewania formy metalem wskutek przetopienia ziarnistej preformy składającej się ze składników stopowych np.: Cr, Mn, Ti i C, które w procesie wypełniania wneki formy tworza dyfuzyjna warstwe bogata w pożądane wegliki. Materiałem wiążącym składniki preformy sa zwiazki powierzchniowo czynne o charakterze topnikowym. Poniższa praca przedstawia jedno z zagadnień dotyczących powstawania powierzchniowej warstwy stopowej, a mianowicie określanie grubości powstającego kompozytu. W ramach badań przeprowadzono symulację komputerową wykorzystując program Nova Flow&Solid. Wyniki tej symulacji umożliwiły obliczenie prawdopodobieństwa powstawania kolejnych warstw kompozytowych oraz ostateczne określenie grubości kompozytu. Pozwoli to na projektowanie odlewów ze ściśle określoną grubością powierzchniowej warstwy kompozytowej.

2. BADANIA

Celem przeprowadzonych badań było opracowanie założeń konstrukcyjnych modelowego odlewu oraz opracowanie optymalnej technologii zalewania – odpowiedniej konstrukcji układu wlewowego zapewniającego możliwe spokojne wypełnianie wnęki formy i równomierne nagrzewanie preform (rys.1.), przede wszystkim zaś określenie, dla opracowanych założeń konstrukcyjnych i technologicznych, optymalnej temperatury zalewania dla materiałów badanych preform. Optymalnej w sensie otrzymania możliwie najgrubszej warstwy kompozytowej na odlewie i uniknięcia miejscowego rozpuszczenia materiału preformy bądź miejscowego wymycia materiału wkładki przez płynący metal.



Rys. 1. Schemat układu modelowego Fig. 1. Schema of model casting

Wykorzystując bezpośredni związek pomiędzy przebiegiem procesów cieplnych w preformie, grubością preformy i rodzajem materiału (własności cieplne), a finalną grubością warstwy stopowej na odlewie podjęto próbę prognozowania grubości warstwy kompozytowej. Prognozowania w oparciu o dane w postaci temperatury i czasu wygrzewania preformy będące wynikami symulacji komputerowej. Kontynuacją pracy będzie opracowanie narzędzia w postaci programu komputerowego, będącego rozwinięciem odlewniczych systemów symulacyjnych, służącego do doboru optymalnych konstrukcji odlewu i parametrów technologicznych procesu w celu otrzymania warstwy stopowej o pożądanym kształcie i grubości.

3. ZAKRES BADAŃ.

Aby osiągnąć postawiony cel określono następujący zakres badań:

- 1. Opracowanie założeń konstrukcyjnych modelowego odlewu.
- 2. Opracowanie konstrukcji układu wlewowego i sprawdzenie jej w procesie symulacji zalewania.
- 3. Symulacja procesu tworzenia warstwy kompozytowej dla następujących założeń:
 - a. Zmiana temperatury zalewania na trzech poziomach:
 - $T_1 = 1510 \ ^{\circ}C$
 - $T_2 = 1550 \ ^{\circ}C$
 - $T_3 = 1600 \ ^{\circ}C$
 - b. Materiał odlewu staliwo AISI-1086.
 - c. Materiał wkładki:
 - żelazochrom wysokowęglowy FeCr800
- 4. Określenie rozkładu temperatur w preformach na wszystkich poziomach zmienności.
- 5. Analiza uzyskanych wyników i wskazanie optymalnej temperatury zalewania dla badanych materiałów preformy.

6. Obliczenie prawdopodobieństwa powstawania warstwy kompozytowej o określonej grubości dla założonych parametrów technologicznych i materiałów preformy.

3.1. Założenia konstrukcyjne modelowego odlewu

Kształt modelowego odlewu został tak zaprojektowany, aby wykonanie preform oraz formy nie było kłopotliwe i czasochłonne. Położenie preformy oraz kształt wlewów doprowadzających, po przeanalizowaniu wyników wcześniejszych badań prowadzonych w Zakładzie Odlewnictwa Politechniki Śląskiej, zostały tak dobrane, aby ograniczyć do minimum działanie erozyjne strugi metalu (rys. 2).



Rys. 2. Rysunek konstrukcji odlewu modelowego Fig.2. Construction of model casting

3.2. Symulacja przepływu ciepła w procesie tworzenia kompozytu powierzchniowego

Na podstawie założeń konstrukcyjnych zamodelowano trójwymiarową geometrię eksperymentalnego odlewu w programie SolidWorks. Następnie geometrię zaimportowano do programu symulacyjnego Nova Flow&Solid v2.9 r81, ustalono położenie wirtualnych termoelementów (rys. 3) oraz wprowadzono dane potrzebne do przeprowadzenia symulacji (tabela 1).

Dane termofizyczne materiałów użytych w obliczeniach termicznych:

Materiały preform zostały zdefiniowane w grupie materiałów formierskich, a preforma była swego rodzaju ochładzalnikiem. Wynikało to nie tylko z ograniczeń programu symulacyjnego ale również z faktu, że preforma jest ziarnistym metalicznym materiałem spełniającym funkcję ochładzalnika zewnętrznego o małej intensywności chłodzenia.

Położenie wirtualnych termoelementów w preformach



Rys. 3. Rozmieszczenie wirtualnych termoelementów w preformie Fig. 3. Location of virtual thermocouple in premould

Dane termofizyczne materiałów zostały przedstawione w tabeli 1, gdzie:

- _ T – temperatura,
- λ przewodność cieplna,
- Cp ciepło właściwe,
- $\rho gęstość,$
- T_{liq} temperatura likwidus,
 T_{sol} temperatura solidus,
 Q_{cr} ciepło krystalizacji,
 Q_{eu} ciepło eutektyczne.

Tabela 1. Dane termofizyczne materiałów użytych w obliczeniach termicznych

Table 1. Thermophysical data of materials used in calculation

T [°C]	$\lambda [W/m/^{\circ}C]$	Cp [J/kg/°C]	$P [kg/m^3]$	
Żelazochrom FeCr				
0	45	450	-	
20	-	-	7500	
200	-	475	7447	
500	30,6	550	7343	
700	26,2	600	7270	
1100	24	650	-	
1200	-	-	7080	
1500	-	750	-	
Staliwo AISI-1086				
$T_{lig} = 1505,53, T_{sol} = 1451,$				
$Q_{cr} = 250 [kJ/kg], \qquad Q_{eut} = 250 [kJ/kg]$				
0	51,8	469	-	
500	39,3	661	-	
1000	27,2	644	-	
1100	28,5	644	7431,1	
1200	29,7	661	-	
1300	29,7	686	-	
1400	-	-	7262,6	
1525	-	-	6995	
1550	-	740	6978,88	
1600	30	740	6946,23	
Masa formierska – green sand				
20	0,9	550	1550	
500	0,6	600	1500	
1000	0,5	800	1490	
1500	0,5	900	1450	

Dane startowe:

Temperatury poszczególnych materiałów użytych w symulacji:

-	temperatura preform:	20 [°C]
_	temperatura formy:	20 [°C]

- temperatura otoczenia: 20 [°C]
- temperatura metalu:

a) 1510 [°C], b) 1550 [°C], c) 1600 [°C]

3.3. Wyniki

_

Wynikiem symulacji był zbiór krzywych stygnięcia dla poszczególnych wirtualnych punktów pomiaru temperatury. Przykładowy wykres dla żelazochromu FeCr i temperatury zalewania 1510°C przedstawiono na rysunku (rys. 4).







Fig. 5. Course of crystallization of Fe-Cr

Na podstawie otrzymanych wyników dla wszystkich przeprowadzonych symulacji wyznaczono istotne dane potrzebne do dalszej analizy. Danymi tymi są:

T_{max} – maksymalna temperatura w danym punkcie pomiarowym,

t_{Tmax} – czas po jakim w danym punkcie będzie maksymalna temperatura,

T_t – temperatura w czasie zakończenia fazy zalewania odlewu,

t_{T-Ts} – czas po jakim w danym punkcie pomiarowym zostanie przekroczona temperatura solidus,

 t_{T-TL} – czas po jakim w danym punkcie pomiarowym zostanie przekroczona temperatura likwidus,

 t_L – czas, w którym metal w danym punkcie pomiarowym ma temperaturę wyższą od temperatury likwidus,

 t_{s} – czas, w którym metal w danym punkcie pomiarowym ma temperaturę wyższą od temperatury solidus.

Przykładowy zbiór wyznaczonych wartości danych został przedstawiony w postaci trójwymiarowych wykresów maksymalnego wygrzania preform i rozkładu temperatury w preformie dla określonej chwili czasu, w której był on najkorzystniejszy. Obrazują to rysunki od 5 do 13.

Temperatury solidus i likwidus dla materiału preformy zostały odczytane z wykresu sporządzonego w programie Thermo-Calc (rys. 5).

 T_S – Temperatura solidus dla FeCr – 1300 $^\circ C$

 T_L – temperatura likwidus dla FeCr – 1545 °C





- Rys. 6. Obraz maksymalnego wygrzania wkładki (na wykresie naniesiono maks. temp. zarejestrowane w poszczególnych punktach pomiarowych)
- Fig. 6. Premould maximum heating image (on diagram the maximum temperature of each measurement point were plotted)



Rys. 7. Rozkład temp. po czasie 74,8s Fig. 7. Temperature distribution after 74,8 s

Duża kostka – strona zewnętrzna



- Rys. 8. Obraz maksymalnego wygrzania wkładki (na wykresie naniesiono maks. temp. zarejestrowane w poszczególnych punktach pomiarowych)
- Fig. 8. Premould maximum heating image (on diagram the maximum temperature of each measurement point were plotted)



Rys. 9. Rozkład temp. po czasie 74,8s Fig. 9. Temperature distribution after 74,8 s

Mała kostka – strona zewnętrzna



Rys. 10. Obraz maksymalnego wygrzania wkładki (na wykresie naniesiono maks. temp. zarejestrowane w poszczególnych punktach pomiarowych) Fig. 10. Premould maximum heating image (on diagram the maximum temperature of each

measurement point were plotted)



Rys. 11. Rozkład temp. po czasie 74,8s Fig. 11. Temperature distribution after 74,8 s

Mała kostka – strona wewnętrzna



Rys. 12. Obraz maksymalnego wygrzania wkładki (na wykresie naniesiono maks. temp. zarejestrowane w poszczególnych punktach pomiarowych)

Fig. 12. Premould maximum heating image (on diagram the maximum temperature of each measurement point were plotted)



Rys. 13. Rozkład temp. po czasie 74,8s Fig. 13. Temperature distribution after 74,8 s

4. OKREŚLENIE PRAWDOPODOBIEŃSTWA POWSTANIA WARSTWY KOMPOZYTOWEJ O OKREŚLONEJ GRUBOŚCI.

W sensie matematycznym zadanie polega na określeniu prawdopodobieństwa zdarzenia, że warstwa kompozytowa osiągnie określoną grubość. W pracy [6] wyprowadzone zostały równania różniczkowe określające wartości prawdopodobieństwa. Idea rozwiązania postawionego problemu polega na podziale obszaru, w którym ma powstać warstwa kompozytowa, na warstwy częściowe.

Dla tak określonego zagadnienia w pracy [6] określono prawdopodobieństwo $P_n(t)$ oznaczające, że w czasie *t* kompozyt będzie się składał z *n* warstw częściowych. Prawdopodobieństwo otrzymano jako rozwiązanie układu równań różniczkowych, którego rozwiązaniem jest:

$$P_n(t) = \frac{\alpha^n t^n}{n!} e^{-\lambda t}$$
(1)

gdzie:

 α – współczynnik intensywności,

n – numer warstwy,

t – czas powstawania kompozytu.

Wyznaczenie prawdopodobieństw dla wyników przeprowadzonych symulacji

Zgodnie z podanym wzorem (1) wyznaczono prawdopodobieństwo określające powstanie kolejnej warstwy kompozytowej, a wartość oczekiwana pozwoliła podać grubość kompozytu. Do wyznaczenia prawdopodobieństwa wykorzystane zostały dane

uzyskane na drodze symulacji cieplnej procesu tworzenia warstwy kompozytowej na odlewie staliwnym.

W obliczeniach przyjęto różne wartości α uzależnione od położenia punktu pomiaru temperatury.

Założono także, że wartość współczynnika α przyjęta do obliczeń wyznacza maksymalne prawdopodobieństwo dla środkowej warstwy. Maksymalną liczbę możliwych warstw przyjęto równą dwadzieścia. Grubość jednej warstwy przyjęto 1[mm]. Do weryfikacji otrzymanych wyników przyjęte zostały grubości kompozytu 8, 6 i 4[mm] otrzymane eksperymentalnie i uzyskane jako wartości średnie w pracy [7]. Z obliczonych wartości prawdopodobieństwa wynika, że najgrubszy kompozyt powstanie w strefie środkowej, gdzie uzyskano najwyższą temperaturę i najdłuższy czas wygrzania preformy. Wraz ze spadkiem temperatury wygrzania grubość kompozytu maleje aż do miejsca, w którym nie uzyskano wystarczająco wysokiej temperatury, aby przetopić preformę. Dla dużej kostki uzyskano znacznie mniejsze grubości kompozytu, co prawdopodobnie jest spowodowane większą odległością centrum cieplnego od preformy i w efekcie niewystarczającym wygrzaniem preformy, w porównaniu do małej kostki. Średnia grubość kompozytu oraz zakres powstawania warstwy w małej kostce jest znacznie większy. Wynika to z dłuższego wygrzania preformy i wyższej temperatury po zalaniu formy. Porównanie grubości kompozytu w małej i dużej kostce dla poszczególnych materiałów i temperatur zalewania zostały przedstawione na rysunkach od 14 do 19.



Grubość kompozytu powstałego z preformy FeCr dla temperatyry zalewania 1510°C



Rys. 15. Grubość kompozytu dla małej kostki [mm]

FeCr 1510 small cube

Fig. 15. Thickness of composite layer – small cube [mm]



- Rys. 14. Grubość kompozytu dla dużej kostki [mm]
- Fig. 14. Thickness of composite layer big cube[mm]

Grubość kompozytu powstałego z preformy FeCr dla temperatyry zalewania 1550°C



(x,y,dz),(x,y,dw)

Rys.16. Grubość kompozytu dla dużej kostki [mm]

Fig.16. Thickness of composite layer – big cube [mm]



(x,y,dz).(x,y,dw) Rys.17. Grubość kompozytu dla małej kostki. [mm] Fig.17. Thickness of composite layer– small

cube [mm]

Grubość kompozytu powstałego z preformy FeCr dla temperatury zalewania 1600°C



(x,y,az),(x,y,dw) Rys. 18. Grubość kompozytu dla dużej kostki. [mm]

Fig. 18. Thickness of composite layer – big cube [mm]

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.



Rys. 19. Grubość kompozytu dla małej kostki [mm] Fig. 19. Thickness of composite layer – small cube [mm]

Opracowane założenia konstrukcyjne modelowego odlewu wzbogacono o odpowiedni układ wlewowy, zapewniający spokojne wypełnienie formy i równomierne wygrzanie preformy (rys. 1). Postawione założenia sprawdzono na drodze symulacji komputerowej procesu zalewania i stygnięcia. Przyjęte założenia konstrukcyjne okazały się poprawne, co potwierdzono doświadczalnie.

Następnie przeprowadzono cykl symulacji według przyjętego planu eksperymentu w celu określenia optymalnej temperatury zalewania dla danego materiału zbrojącego. Obliczono także wartości prawdopodobieństwa uzyskania warstwy kompozytowej o określonej grubości, co pozwala na prognozowanie grubości warstwy kompozytowej na odlewie w oparciu o dane uzyskane na drodze symulacji komputerowej zjawisk termicznych w procesie tworzenia kompozytu. Na podstawie analizy uzyskanych wyników można stwierdzić, że:

- Dla przyjętej konstrukcji odlewu najkorzystniejszą temperaturą zalania dla FeCr jest 1550°C. Zapewnia ona powstanie warstwy kompozytowej na całej powierzchni zbrojonej z niewielkim niebezpieczeństwem wymycia materiału preformy.
- 2. W każdym przypadku korzystniejszy rozkład temperatury obserwowano w preformie dla mniejszej kostki (mniejsza wnęka formy). Wskazuje to na korzystny wpływ mniejszej odległości preformy od centrum cieplnego odlewu, a nie jak przypuszczano pojemności cieplnej odlewu.
- Przeprowadzona analiza wyników i obliczenia prawdopodobieństwa powstawania warstwy kompozytowej o określonej grubości potwierdzają korzystniejsze warunki tworzenia warstwy kompozytowej dla małej kostki (grubsza i o bardziej równomiernej grubości warstwa stopowa) tzn. dla mniejszej odległości od centrum cieplnego.
- 4. Otrzymane wyniki badań i ich analiza pozwalają określić podstawowe wytyczne projektowania technologii i konstrukcji odlewów zbrojonych powierzchniowo, ale eksperyment przeprowadzony w ramach pracy był w całości eksperymentem wirtualnym i otrzymane wyniki muszą być zweryfikowane doświadczalnie.

LITERATURA

- [1] Baron C., Gawroński J.: *The methods of digitizing in the process of determining the diffusion and mass transport in alloy surface composites*, Composites Cząstochowa – Ustroń 5(2005) 4a, s.76.
- [2] Baron C., Gawroński J.: Wyznaczenie parametrów dyfuzji i transportu masy w stopowych kompozytach powierzchniowych metodami dyskretyzacji, Przegląd Odlewnictwa, t. 55, 2005, Nr 4, s. 288.
- [3] Wróbel P., Szajnar J., Gawroński J.: *Kompleksowa ocean warunków powstawania kompozytowej warstwy stopowej na powierzchni odlewu staliwnego*, Archives of Foundry, Year 2004, Volume 4, No 14.
- [4] Baron C., Gawroński J.: Influence of the diffusion and mass transport on the thickness of composite. Composites Częstochowa Ustroń 5(2005) 4, s. 53.
- [5] Gawroński J., Ignaszak Z., Wróbel P.: *Kompozytowe warstwy stopowe C-Cr-Mn na odlewach staliwnych*, Solidification of Metals and Alloys, Year 2000, Volume 2, No 44.

- [6] Baron C., Gawroński J.: Stochastic method of thickness of composite layers on casting determination. AMME, Polska-Zakopane, December 07.10.2003, 51-56.
- [7] Baron C., Gawroński J.: *Empirical evaluation of composite layer occurrence probability*. Archives of Foundry, Year 2004, Volume 4, No 14.
- [8] Baron C.: *Surfacing composite as a material about increased strength*. III Doctoral Symposium, 2004 Lublin.
- J. Gawroński, C. Baron, Wyznaczanie grubości warstw kompozytowych metodą dyskretyzacji VI International Conference, Surface Phenomenon in Foundry Processes 2004 Kołobrzeg.

Część badań wykonano dzięki dofinansowaniu przez Komitet Badań Naukowych (projekt badawczy KBN nr 3T08 B 032 27).

THERMAL SIMULATION OF FORMATION COMPOSITE LAYER ON MODEL CASTING PROCESS

SUMMARY

In article the results of thermal simulation of formation composite layer on model cast steel casting process have been presented. The aim of researches was determination of technological parameters of formation composite layer process for which is possible to obtain good quality reinforcement layer with desirable thickness. For assumed changes of chose technological parameters, distribution of temperature in model casting as well as course of temperature changes in characteristic point of composite insert have been determined. Simulations have been carried out for two different materials of compositing element (insert) and three different pouring temperatures with software NovaFlow&Solid 2.9 r81. Obtaining good quality and with desirable thickness composite layer depends on process and level of heating during casting process. Researches made possible to determination which technological parameters directly influent on this process and how criterions should be meet by casting technology of this kind of casting. Obtained results and their experimental verification will make possible to form basic to work out guidelines and principles for design technology of casting with composite layer on choose surfaces productions.

Recenzował: prof. Mirosław Cholewa.