https://doi.org/10.62753/ctp.2003.15.6.6 KOMPOZYTY (COMPOSITES) 3(2003)6

**Józef Gawroński[1], Mirosław Cholewa[2], Piotr Wróbel[3]**
**Politechnika Śląska, Katedra Odlewnictwa, ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice**

# KOMPOZYTOWE WARSTWY STOPOWE NA ODLEWACH STALIWNYCH

**Przedstawiono zastosowanie programu komputerowego Simtec RWP do modelowania procesu tworzenia się kompozytowej warstwy stopowej na odlewach staliwnych kul. Wyniki obliczeń porównano z wynikami uzyskanymi drogą eksperymentalną.**

**Słowa kluczowe: kompozyty warstwowe, odlewanie, krystalizacja**

## COMPOSITE ALLOY LAYERS ON THE CAST CARBON STEEL

**Use of surface composite alloy layers permits onto obtain a lot of casts properties, also usable. In order to presentation of formation mechanism of alloy layers we present in introduction part of real executed experiment on sphere casting model (Fig. 1). Figure 2 shows influence analysis of individual variable factors. Figures 3 and 4 show macro- and microstructure of choose area. In order to confirmation of conclusions from real experiment, apply SIMTEC - 3D computer program to determine process of formation alloy composite layer on casts. Figures 5-10 show next stages of virtual experiment. On the basis of made investigation it were been possible to affirm: for optimum executing conditions of surface composite alloy layers on casts steel, which come into being from liquid state, most important relationships are between cast solidification module and temperatures parameters of liquid metal and have make allowances all different described technological and metallurgical conditions.**

**Key words: composite layers, casting, crystallization**

## WPROWADZENIE

Szereg własności odlewów żeliwnych i staliwnych, również użytkowych, zależy od fizycznych i chemicznych własności warstwy powierzchniowej. Takimi własnościami są np. twardość, odporność na korozję, odporność na zużycie ścierne. Własności warstwy powierzchniowej odlewu zależą przede wszystkim od warunków stygnięcia oraz od reakcji na powierzchni metal/forma, czyli od rodzaju oddziaływania materiału formy na warstwę powierzchniową odlewu, w warunkach zalewania i stygnięcia odlewu.

Szczególne własności odlewu uzyskuje się przez wytworzenie kompozytowej, powierzchniowej warstwy stopowej, bezpośrednio w procesie odlewania. Przeprowadzone badania ukierunkowane były na zagadnienia kompozytowych warstw stopowych na żeliwie i staliwie, odpornych na zużycie w różnych trudnych warunkach pracy odlewów (np. przemysł wydobywczy lub surowców budowlanych). Opracowana w Katedrze Odlewnictwa technologia otrzymywania stopowych warstw kompozytowych na wybranych powierzchniach odlewu umożliwia uzyskanie w żądanych miejscach odlewu wysokich własności, takich jak:

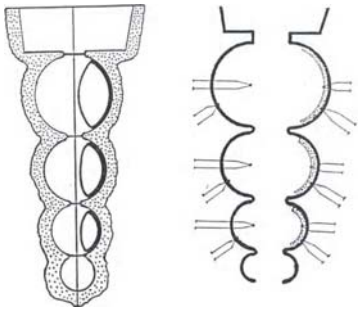
– wysoka twardość, wielokrotnie wyższa od twardości odlewu bazowego,
– wysoka odporność na żużycie, nieporównywalnie wyższa od odporności odlewu bazowego,
– optymalna grubość stopowej warstwy kompozytowej zależna od warunków pracy i grubości ścianki odlewu,
– możliwość uniknięcia w przypadku staliwa dwustopniowej obróbki cieplnej na rzecz jednostopniowej (np. normalizowania).

Duża ilość zebranych informacji na temat warunków wytwarzania i własności takich twardych i trudno ściernych warstw kompozytowych pozwala na stworzenie opisu mechanizmu jej powstawania. Stanowi również podstawę do kontynuacji dalszych prac eksperymentalnych, jak też opracowania modeli otrzymywania warstw kompozytowych na odlewach.

## POWIERZCHNIOWE WARSTWY KOMPOZYTOWE NA ODLEWACH STALIWNYCH

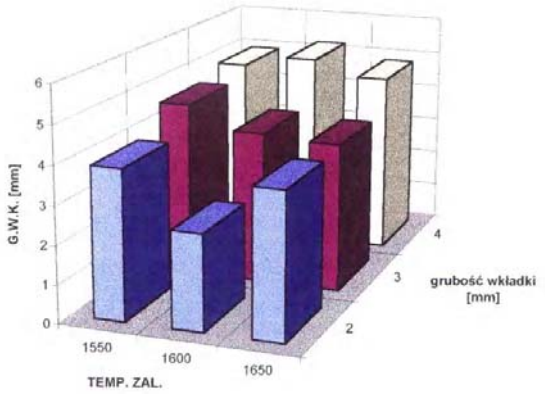
W celu przedstawienia mechanizmu powstawania kompozytowych warstw stopowych na odlewach staliwnych do niniejszego artykułu wybrano fragment badań przeprowadzonych na odlewach modelowych w postaci kul o zmiennej średnicy: 100, 80 i 60 mm. Rysunek 1 przedstawia schemat formy doświadczalnej, umiejscowienie wkładki (folii) kompozytującej i zespołu termoelementów.

[1] prof. dr inż., [2] dr inż., [3] inż.



Rys. 1. Skorupowa forma doświadczalna
Fig. 1. Experimental shell mould

Celem eksperymentu było określenie ilościowego wpływu parametrów odlewania, tj. temperatury zalewania $T_{zal}$, masywności odlewu (moduł krzepnięcia kuli $M_k$) oraz grubości wkładki kompozytującej $g_w$, na jakość warstwy kompozytowej na odlewie staliwnym, a przede wszystkim na jej grubość $g_{wk}$. Przebieg badań ułożono na podstawie planu ułamkowego Hartleya. Odlewy modelowe kul wykonano ze staliwa węglowego gatunku L450. Analizę wpływu poszczególnych zmiennych czynników procesu na grubość warstwy kompozytowej w odlewach staliwnych na przykładzie kuli $\phi$ 80 mm pokazano na rysunku 2. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono zgłady metalograficzne odlewu bazowego, strefy przejściowej i stopowej warstwy kompozytowej dla odlewu kuli $\phi$100 mm.




Rys. 2. Wpływ grubości wkładki i temperatury zalewania na grubość warstwy kompozytowej w odlewach staliwnych na przykładzie kulki $\phi$ 80 mm
Fig. 2. The influence of the thickness of a composite insert and the pouring temperature on the thickness of a composite layer in steel castings on the example of $\phi$80 mm sphere

Rys. 3. Przecięta kula z widoczną kompozytową warstwą stopową
Fig. 3. Cross-section with visible composite alloy layer

Generalnie można stwierdzić, ze średnia grubość kompozytowej warstwy stopowej w odlewach jest większa niż grubość wkładki (folii) nałożonej na ściankę formy. Ponadto w każdym przypadku przy stałej temperaturze zalewania wraz ze wzrostem grubości wkładki rośnie grubość warstwy kompozytowej w odlewie. Zmiany te zarejestrowano dla kul o wszystkich średnicach.

Rys. 4. Stopowa warstwa kompozytowa, strefa przejściowa w kuli $\phi$100 mm
Fig. 4. Composite alloy layer, interface zone in sphere $\phi$100 mm

Dalsza analiza wpływu zmiennych czynników procesu na grubość warstwy kompozytowej oparta na obliczeniach statystycznych pozwoliła uzyskać zależność

$$g_{wk} = -1{,}51 + 0{,}78_{gw} - 0{,}0386\ \phi_{kuli}$$

przy czym: wartość średnia $g_{wk}$ = 3,92, odchylenie standardowe = 0,81, odchylenie jako % średniej = 20,7, współczynnik korelacji $R$ = 0,77, $F$ = 16,49, $W$ = 2,29.

## OPIS PROCESU OTRZYMYWANIA KOMPOZYTOWYCH WARSTW STOPOWYCH Z WYKORZYSTANIEM PROGRAMU KOMPUTEROWEGO SIMTEC-RWP

Współczesne eksperymentalne badania naukowe są coraz bardziej kosztowne nie tylko ze względu na wysoki koszt aparatury kontrolno-pomiarowej, ale również, a może przede wszystkim, na konieczność posiadania dla celów opracowań statystycznych dużej liczby charakterystyk wybranych (istotnych) parametrów procesu. Sposób ustalania i wyboru istotnych parametrów procesów jest również z konieczności ograniczony do najważniejszych, tych które potrafimy pomiarowo oprzy- rządować. Istniejące obecnie mniej lub bardziej skompli- kowane symulacyjne programy komputerowe okazują się w tej sytuacji bardzo pożytecznym narzędziem. Pozwalają często nie tylko poprawić opracowywaną technologię, ale również ułatwiają ocenę zjawisk fizycznych i krystalizacyjnych, zmniejszają koszty badań eksperymentalnych, przyspieszają formułowanie poprawnych wniosków, a nawet pozwalają potwierdzić lub zanegować teoretyczny model procesów. W niniejszej pracy

wykorzystano program komputerowy SIMTEC-3D firmy RWP do modelowania procesu tworzenia się warstwy kompozytowej na odlewach kul staliwnych $\phi$ 100, 80 i 60 mm w różnych warunkach temperaturowych zalewania i dla różnych grubości materiału stopowego (folii) zastosowanych w formie. Plan eksperymentu komputerowego jest identyczny z planem eksperymentu rzeczywistego.

Geometria objętości kuli i geometria jej powierzchni, a także geometria kształtu nadlewu stanowią istotną trudność w zapisie komputerowym nie tylko ze względu na inne potrzeby w dokładności modelowania, ale i konieczności zagęszczenia siatki w strefie powierzchniowej kul oraz również ze względu na taką samą potrzebę - w warstwie materiału stopowego, o stosunkowo niewielkiej grubości 2, 3 i 4 mm. Ponadto program winien „pracować" w dwu różnych zakresach temperatur interesujących nas ze względu na dane temperaturowe staliwa ($T_P$ = 1650ºC, $T_L$ = 1525ºC, $T_S$ = 1490ºC) oraz dane temperaturowe materiału stopowego (Fe-Cr-C) $T_L$ = 1281ºC, $T_S$ = 1220ºC oraz $T_0$ = 20ºC.

Jak widać z zestawienia temperatur charakterystycznych dla zakresów krzepnięcia staliwa i wysokochromowej warstwy materiału stopowego, przedział pomiędzy $T_S$ staliwa i $T_L$ warstwy stopowej wynosi:

$$T_{S\,\text{staliwa}} - T_{L\,(\text{Fe-Cr-C})} = 1490 - 1281 = 200°\text{C}$$

$$T_{S\,\text{staliwa}} - T_{S\,(\text{Fe-Cr-C})} = 1490 - 1220 = 270°\text{C}$$

Oznacza to, że warstwa stopowa niezależnie od jej grubości działa na odlew w pierwszej fazie kontaktu z ciekłym staliwem - jako ochładzalnik zewnętrzny, po czym w zależności od jej grubości i masywności odlewu ulega nadtopieniu lub całkowitemu stopieniu. Tak więc pojemność cieplna odlewu jest zależna od jakości kompozytowej warstwy stopowej, a więc od jej grubości w odlewie, szerokości strefy przejściowej, warunków stężeniowych i czasowych dyfuzji węgla i chromu w głąb odlewu. Te czynniki decydują o trwałości połączenia odlewu z warstwą stopową.

Potwierdza się również teza i model teoretyczny procesu, mówiące o tym, że w początkowym - chwilowym kontakcie ciekłego staliwa z warstwą stopową, działającą jako ochładzalnik, tworzy się na jej wewnętrznej powierzchni bardzo cienka warstwa zakrzepła staliwa, która, oddając jej swe ciepło krzepnięcia, nagrzewa ją szybko do temperatury $T_{S\,w.st.}$, a sama roztapia się dzięki znacznie większej pojemności cieplnej odlewu (zależnej również od temperatury przegrzania staliwa) od pojemności cieplnej warstwy materiału stopowego. Tworzy się cienka strefa przejściowa pomiędzy odlewem a warstwą kompozytową. Stopowa warstwa kompozytowa tworzy się zatem ze stanu ciekłego i tylko tak dobrane parametry procesu, które gwarantują taki jego przebieg - gwarantują również optymalną jej jakość.

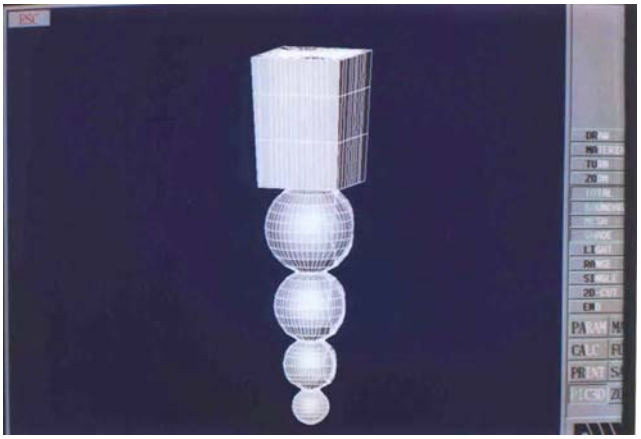
Poniżej przedstawione zostaną wyniki i przebieg badań modelowych. Ze względu na potrzebę zilustrowania charakteru zjawisk towarzyszących procesom tworzenia się kompozytowej warstwy stopowej przedstawione zostaną wyniki modelowania dla odlewu próbnego średniej kuli $\phi$80 mm, grubości warstw materiału stopowego 2, 3 i 4 mm, temperatur zalewania form 1650, 1600 i 1550ºC oraz dla różnych charakterystycznych czasów trwania procesu. Wyniki modelowania dla odlewów kul $\phi$100 i 60 mm wykazują bardzo podobny lub identyczny charakter procesów.

Ponadto wyniki badań przedstawiono w dwu charakterystycznych zakresach temperatur krzepnięcia, a mianowicie:

– dla odlewu staliwnego $\Delta T_{kr}$ = 1525 – 1490ºC
– dla warstwy materiału stopowego
  $\Delta T_{kr\,(\text{Fe-Cr-C})}$ = 1281 – 1220ºC

Takie pokazanie badań ułatwia ocenę wizualną i termofizyczną, zachodzących zjawisk w polu temperatur i kinetykę krzepnięcia (topnienia) obszarów odlewu i warstwy kompozytowej.

Na rysunku 5 przedstawiono geometrię zestawu badawczego odlewów kul $\phi$ 100, 80, 60 i 40 mm wraz z geometrią nadlewu (będącego jednocześnie układem wlewowym). Kula $\phi$40 mm w zestawie badawczym pełni rolę czaszy kulistej, przyjmującej ciekły metal w czasie zalewania. Wypełnianie wnęki formy skorupowej dzięki temu jest łagodne i szybkie, czego nie gwarantuje klasyczny układ wlewowy. Nadlew i układ kul z wzrastającym w jego kierunku modułem krzepnięcia zapewniają właściwe zasilanie i częściową kierunkowość krzepnięcia.

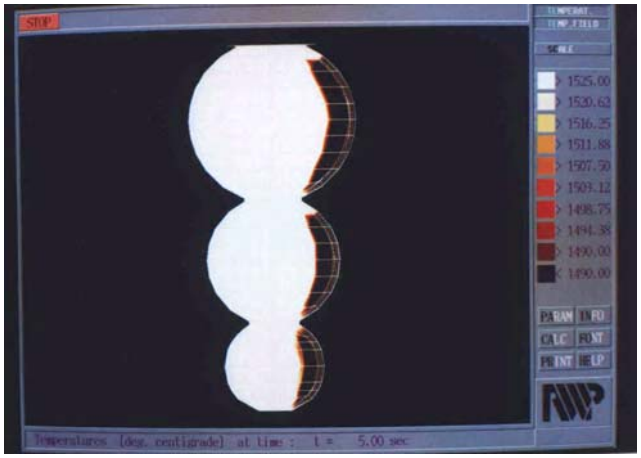


Rys. 5. Geometria zestawu badawczego odlewów kul $\phi$ 100, 80, 60 i 40 mm

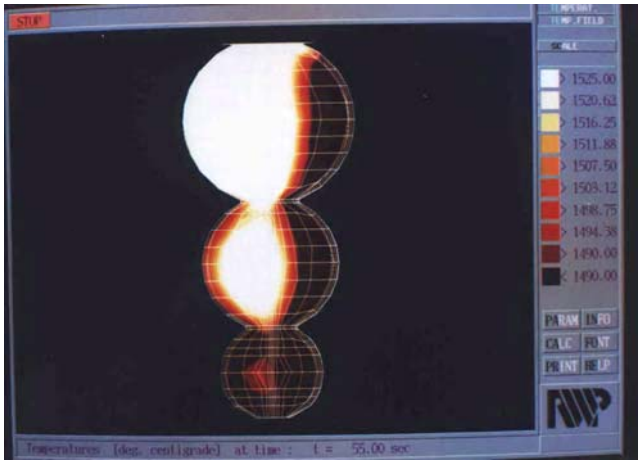
Fig. 5. Research set geometry of casts sphere $\phi$100, 80, 60 and 40 mm

Na rysunkach 6 i 7 pokazano pole temperatury zestawu badawczego w różnych czasach trwania procesu, w skali temperatur zakresu krzepnięcia właściwego dla staliwa węglowego. Z rysunków widać bardzo szybki przyrost warstwy zakrzepłej staliwa na kompozytowej warstwie stopowej, zaś znacznie wolniejszy przyrost na tych czę-

ściach odlewów, gdzie ciekły metal kontaktuje się tylko z formą skorupową. Z szybkości przyrostu warstwy zakrzepłej staliwnego odlewu na kompozytowej warstwie stopowej można sądzić o grubości występującej strefy przejściowej, w której zachodzą procesy dyfuzji składników stopowych.



Rys. 6. Pole temperatury dla $g$ = 3 mm, $T_{zal}$ = 1600°C, $\tau$ = 15 s
Fig. 6. Field of temperature for $g$ = 3 mm, $T_{zal}$ = 1600°C, $\tau$ = 15 s



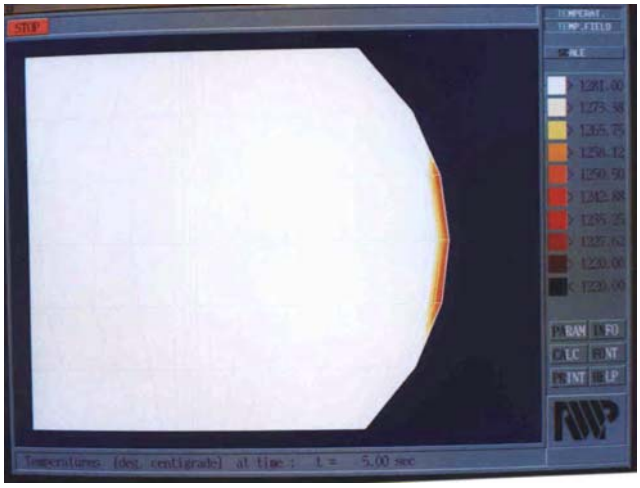
Rys. 7. Pole temperatury dla $g$ = 3 mm, $T_{zal}$ = 1600°C, $\tau$ = 55 s
Fig. 7. Field of temperature for $g$ = 3 mm, $T_{zal}$ = 1600°C, $\tau$ = 55 s

W miarę przechodzenia materiału stopowego (Fe-Cr-C) w stan ciekły ustają przeszkody na drodze procesów rozpuszczania i dyfuzji. Wymienione procesy limitują grubość strefy przejściowej oraz stężenie pierwiastków stopowych (Cr, C) w kompozytowej warstwie na odlewie. Procesy rozpuszczania i dyfuzji wpływają również na końcową grubość kompozytowej warstwy stopowej, z reguły większą od grubości materiału stopowego (folii) w formie. Jest to korzystny objaw, gdyż pozwala to sądzić o możliwości uzyskania dowolnie cienkich warstw kompozytowych o dużej odporności na zużycie na wybranych powierzchniach odlewów maszynowych (charakteryzujących się zazwyczaj małą grubością ścianki).

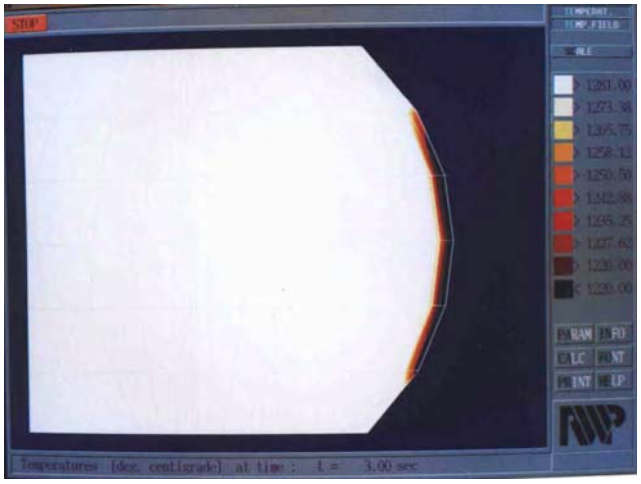
Analizując tę część badań komputerowych, trzeba stwierdzić ścisły związek pomiędzy pojemnością cieplną odlewu, wyrażoną modułem krzepnięcia, temperaturą zalewania, grubością stopowej warstwy kompozytowej a jej jakością, a także możliwością jej uzyskania w procesie wytwarzania odlewu.

Nie ulega wątpliwości, że w warunkach produkcyjnych wybór parametrów procesu zależny będzie głównie od wymagań stawianych przez proces „kompozytowania" wybranej powierzchni odlewu, co w pewnym stopniu może zakłócać tradycyjne i ustalone już inne parametry, np. temperaturę zalewania, odbieraną zwykle ze względu na cienkościenność lub masywność poszczególnych części odlewu (konieczność dolania lub uniknięcia jam skurczowych).

Przechodząc obecnie do przedstawienia wyników badań komputerowych dotyczących mechanizmu tworzenia się stopowej warstwy kompozytowej na odlewach staliwnych oraz kinetyki nagrzewania się, topnienia i krzepnięcia warstwy stopowej, należy przypomnieć, że program komputerowy realizuje obliczenia w dwu zakresach temperatur charakterystycznych dla odlewu staliwnego ($\Delta T_{kr}$ = 1525 – 1490°C) i dla materiału stopowego ($\Delta T_{kr(Fe\text{-}Cr\text{-}C)}$ = 1281 – 1220°C). Pozwala to śledzić proces zmian w czasie pola temperatury w warstwie stopowej.

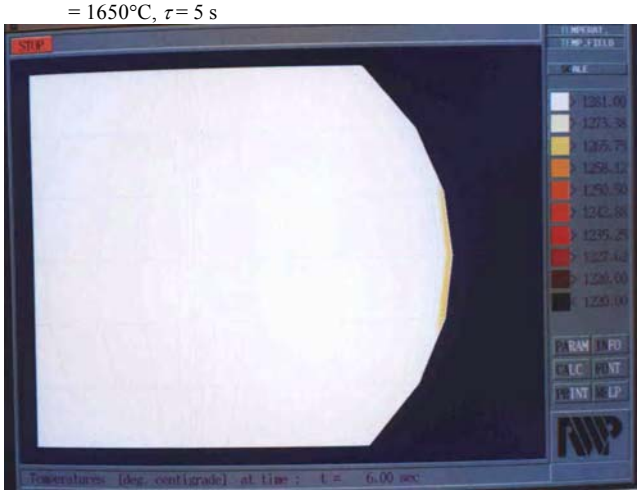


Rys. 8. Pole temperatury w warstwie stopowej - $\phi$ 80 mm, $g$ = 2 mm, $T_{zal}$ = 1650°C, $\tau$ = 3 s
Fig. 8. Field of temperature in alloy layer for $\phi$ 80, $g$ = 2 mm, $T_{zal}$ = = 1650°C, $\tau$ = 3 s



Rys. 9. Pole temperatury w warstwie stopowej - $\phi$ 80 mm, $g$ = 2 mm, $T_{zal}$ = 1650°C, $\tau$ = 5 s

Fig. 9. Field of temperature in alloy layer for $\phi$ 80, $g$ = 2 mm, $T_{zal}$ = = 1650°C, $\tau$ = 5 s



Rys. 10. Pole temperatury w warstwie stopowej - $\phi$80 mm, $g$ = 2 mm, $T_{zal}$ = 1650°C, $\tau$ = 6 s

Fig. 10. Field of temperature in alloy layer for $\phi$ 80, $g$ = 2 mm, $T_{zal}$ = = 1650°C, $\tau$ = 6 s

Na rysunkach 8, 9 i 10 (kula $\phi$ 80 mm, $g$ = 2 mm) pokazano, co dzieje się z warstwą stopową dla najwyższej temperatury zalewania formy (1650°C) po czasie ok. 6 s. Po 3 s warstwa stopowa jest jeszcze w stanie stałym i szybko nagrzewa się, osiągając już po 5 s stan stałociekły. W tym czasie odlew (patrz rys. 2) staliwny zaczyna krzepnąć. Kolejne grubości warstwy stopowej, a więc $g$ = 3 mm i $g$ = 4 mm przy różnych temperaturach zalewania, ale widziane w tych samych czasach, zachowują się podobnie, wykazując jednak silniejsze działanie ochładzające dla staliwa, co skutkuje „namrożeniem" warstewki, a później jej roztopieniem i dalszym nagrzewaniem stopowej warstwy kompozytowej.

## ANALIZA BADAŃ I WNIOSKI

Analizując przebieg symulacji komputerowej i modelowanie tworzenia się kompozytowych warstw stopowych na odlewach staliwnych, można stwierdzić:

a) w praktyce przemysłowej i eksploatacji odlewów z kompozytowymi warstwami stopowymi odpornymi na zużycie nie istnieje potrzeba wytwarzania warstw grubszych niż kilka mm;
b) warstwy stopowe o większej grubości są możliwe do uzyskania, ale ich jakość budzi zastrzeżenia, zwłaszcza jakość powierzchni umocnionej;
c) optymalne warunki wytwarzania kompozytowych warstw na odlewach staliwnych w formach piaskowych muszą uwzględniać podstawowe - tradycyjne warunki wytwarzania odlewów, w szczególności zaś istotne są związki pomiędzy modułem krzepnięcia odlewu a parametrami temperaturowymi ciekłego metalu (temperatura przegrzania i zalewania), grubość warstwy stopowej w granicach 2÷4 mm jest mniej czuła na temperaturę zalewania i masywność odlewu;
d) stopowa warstwa kompozytowa na staliwie o optymalnych własnościach mechanicznych powstaje w procesie przetapiania materiału stopowego przez ciekły metal odlewu (powstaje ze stanu ciekłego), stąd technologiczne warunki jej wytwarzania muszą uwzględniać wszystkie parametry opisane, ale także skład chemiczny materiału stopowego (Fe-Cr-C), wielkość ziarna materiału stopowego w folii, masę Fe-Cr-C na jednostkę powierzchni formy, a także warunki metalurgiczne topnienia i odlewania.

## LITERATURA

[1] Nowa technologia uszlachetniania odlewów do pracy w trudnych warunkach mechanicznych. Praca zbiorowa. Projekt badawczy Nr 3 P407 012 07.
[2] Badania procesów odlewniczych. Praca zbiorowa. Projekt badawczy BK-203/RMT-3/2001.

Recenzent
Zbigniew Górny