80/14

Archives of Foundry,
Year 2004, Volume 4, № 14
Archiwum Odlewnictwa,
Rok 2004, Rocznik 4, Nr 14
PAN – Katowice PL ISSN 1642-5308

KOMPLEKSOWA OCENA WARUNKÓW POWSTAWANIA KOMPOZYTOWEJ WARSTWY STOPOWEJ NA POWIERZCHNI ODLEWU STALIWNEGO

P. WRÓBEL[1], J. SZAJNAR[2], J. GAWROŃSKI[3]
Zakład Odlewnictwa, Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych
Wydział Mechaniczny Technologiczny Politechniki Śląskiej
ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice POLAND

STRESZCZENIE

Przedstawiono kompleksowe warunki powstawania warstwy kompozytowej na powierzchni odlewu na podstawie badań laboratoryjnych i przemysłowych a także w oparciu o numeryczną symulację procesu wymiany ciepła od odlewu do warstwy stopowej, opisując zjawiska towarzyszące tworzeniu się stopowej warstwy. Nie uwzględniono w opisie zjawisk procesów dyfuzyjnych, które są treścią dalszych badań.

Key words: composite layers, casting, crystallization

1. WPROWADZENIE

Głównym celem pracy jest opracowanie opisu mechanizmu tworzenia się powierzchniowej kompozytowej warstwy stopowej bezpośrednio w procesie odlewania staliwa dla uzyskania szczególnych własności odlewu staliwnego. Przeprowadzone badania ukierunkowane były na zagadnienia kompozytowych warstw stopowych na odlewach staliwnych odpornych na zużycie w różnych trudnych warunkach pracy.

Kompozytowa warstwa stopowa powstaje w wyniku współdziałania staliwa wlanego do formy, z materiałem kompozytującym umieszczonym na powierzchni wnęki formy, w warunkach termofizycznych panujących w formie. Analizowany

[1] *inż., sekrmt3@zeus.polsl.gliwice.pl*
[2] *dr hab. inż. prof. Pol. Śl., jszajnar@zeus.polsl.gliwice.pl*
[3] *prof. zw. dr inż., sekrmt3@zeus.polsl.gliwice.pl*

mechanizm charakteryzuje tworzenie twardych, trudnościeralnych kompozytowych warstw stopowych, w założonych, stwierdzonych doświadczalnie, warunkachtechnologicznych. To ograniczenie dotyczy przede wszystkim rodzaju materiałów uczestniczących w procesach zachodzących w formie, a mianowicie żelazostopów, pozwalających na uzyskanie wymaganych własności kompozytowej warstwy stopowej.

Założono następujące warunki tworzenia kompozytowej warstwy stopowej na staliwie:

- odlewane staliwo węglowe,
- formy kwarcowo – iłowe (suche) lub formy skorupowe,
- w materiale kompozytującym obecne są żelazostopy, w szczególności wysokowęglowy żelazochrom.

Pozostałe parametry technologiczne formowania, zasilania w formie oraz odlewania nie wymagają uściślenia, gdyż mieszczą się w zakresie warunków odlewania staliwa w przemyśle a wymienione gatunki staliwa są najczęściej stosowane w produkcji odlewów maszynowych. Założone warunki oraz własności głównych materiałów uczestniczących w procesie, jak też własności uzyskanych kompozytowych warstw stopowych, stanowią podstawę do kompleksowej oceny warunków powstawania powierzchniowej kompozytowej warstwy stopowej na odlewie staliwnym.

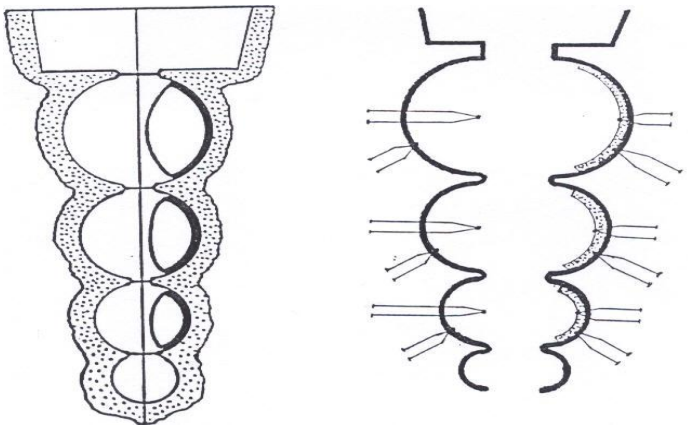
2. BADANIA WARUNKÓW OTRZYMYWANIA POWIERZCHNIOWYCH KOMPOZYTOWYCH WARSTW STOPOWYCH NA ODLEWACH STALIWNYCH

W celu przedstawienia warunków powstawania kompozytowych warstw stopowych na odlewach staliwnych, do niniejszego artykułu wybrano fragment badań przeprowadzonych na odlewach modelowych w postaci kul o zmiennej średnicy ϕ100, ϕ80 i ϕ60 mm. W skład stanowiska badawczego do realizacji założonego eksperymentu wchodziły jako zasadnicze elementy:

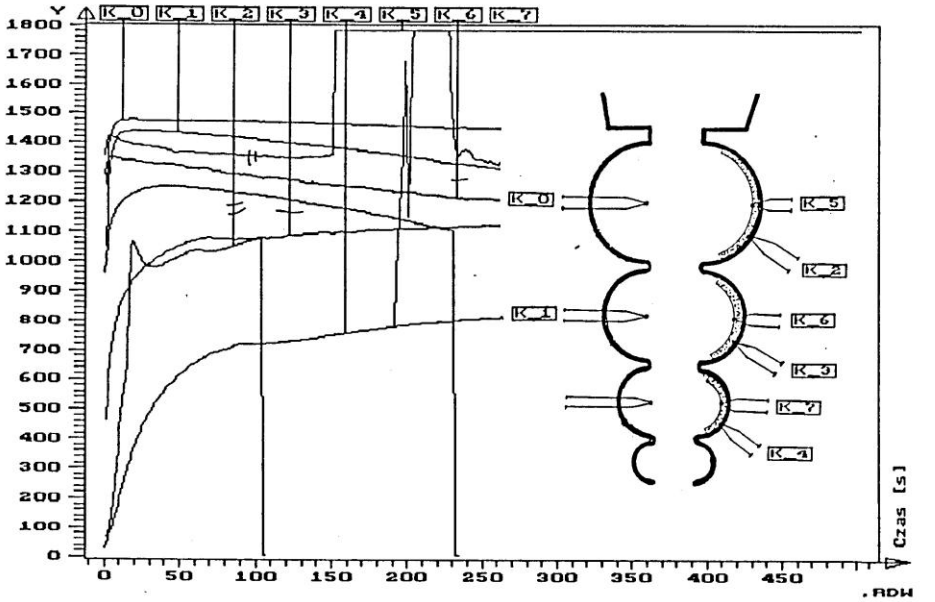
- skorupowa forma doświadczalna z wkładkami kompozytującymi i z zamontowanym zespołem termoelementów (rys. 1),
- zestaw CRYSTALDIGRAPH-PC-T do pomiaru i rejestracji temperatury w czasie (przykładowy wynik pomiarów temperatury przedstawiono na rys. 2).

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 Hartley´a. Odlewy modelowe kul wykonano ze staliwa węglowego, gatunku 230-450. Analizę wpływu poszczególnych zmiennych czynników

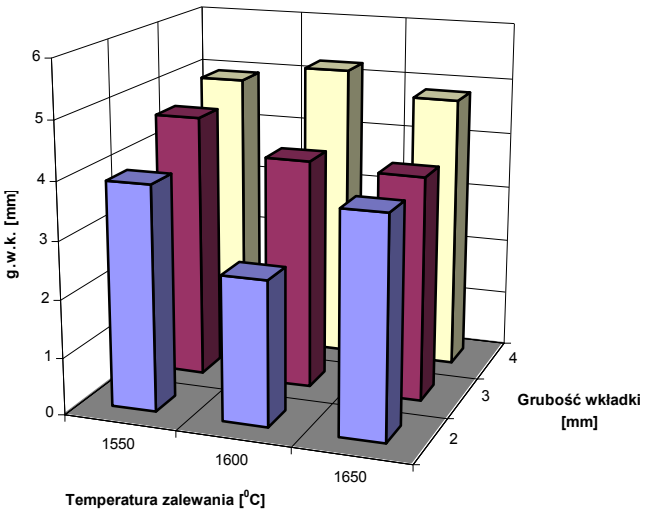
procesu na grubość warstwy kompozytowej w odlewach staliwnych na przykładzie kuli ϕ80 mm ilustruje rys. 3.



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



Rys.2. Krzywe stygnięcia odlewu próbnego przy T_{zal} = 1550 °C i g_w = 3 mm
Fig.2. Self-cooling curves of cast for T_{zal} = 1550 °C i g_w = 3 mm



Rys. 3.
Fig. 3.

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.

Analiza statystyczna wpływu zmiennych czynników procesu na grubość warstwy kompozytowej oparta pozwoliła uzyskać zależność:

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

gdzie: wartość średnia g_{wk} = 3,92; odchylenie standardowe = 0,81; odchylenie jako % średniej = 20,7; współczynnik korelacji R = 0,77; F = 16,49.

3. SYMULACJA KOMPUTEROWA PROCESU ODLEWANIA I POWSTAWANIA KOMPOZYTOWEJ WARSTWY STOPOWEJ

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 oprzyrządować. Istniejące obecnie mniej lub bardziej skomplikowane 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 wyciąganie 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 o średnicach ϕ 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 = 1650 ^{0}C, T_L = 1525 ^{0}C, T_S = 1490 ^{0}C) oraz dane temperaturowe materiału stopowego (Fe — Cr — C) T_L = 1281 ^{0}C, T_S = 1220 ^{0}C oraz T_0 = 20^{0}C.

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:

$$T_{S\ staliwa} - T_{L\ (Fe\text{-}Cr\text{-}C)} = 1490 - 1281 = 209\ ^\circ C$$

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

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 (zależna od modułu krzepnięcia odlewu dla stałej temperatury zalewania) i grubość warstwy stopowej (przy celowo dobranych parametrach temperaturowych $T_{L\ (Fe\text{-}Cr\text{-}C)}$ i $T_{S\ (Fe\text{-}Cr\text{-}C)}$) mają podstawowy wpływ na optymalną jakość kompozytowej warstwy stopowej - a więc jej grubość w odlewie, szerokość strefy przejściowej, warunki stężeniowe i czasowe 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

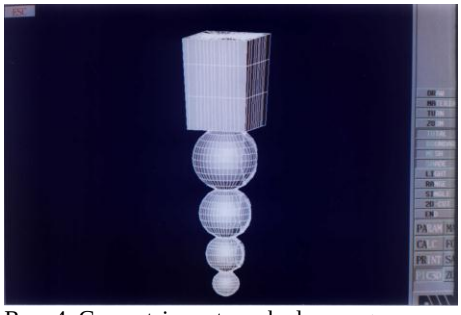
odlewem a warstwą kompozytową. Stopowa warstwa kompozytowa tworzy się zatem ze stanu ciekłego i tylko tak dobrane parametry procesu, które gwarantują taki jego przebieg — gwarantują również optymalną jej jakość. Poniżej przedstawione zostaną wyniki i przebieg badań modelowych. Ze względu na potrzebę zilustrowania charakteru zjawisk towarzyszących procesom tworzenia się kompozytowej warstwy stopowej, przedstawione zostaną wyniki modelowania dla odlewu próbnego średniej kuli ϕ 80 mm, grubości warstw materiału stopowego 2,3 i 4 mm, temperatur zalewania form 1650, 1600 i 1550 ^{0}C oraz dla różnych charakterystycznych czasów trwania procesu. Wyniki modelowania dla odlewów kul ϕ 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 $\Delta T_{kr} = 1525 - 1490$ °C
- dla warstwy materiału stopowego $\Delta T_{kr\,(Fe\text{-}Cr\text{-}C)} = 1281 — 1220\ ^0C$

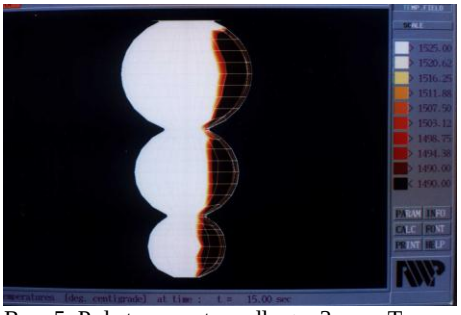
Takie przedstawienie badań ułatwia ocenę wizualną i termofizyczną, zachodzących zjawisk w polu temperatur i kinetykę krzepnięcia (topnienia) obszarów odlewu i warstwy kompozytowej.

Na rys.4 przedstawiono geometrię zestawu badawczego odlewów kul ϕ100, 80, 60 i 40 mm wraz z geometrią nadlewu (będącego jednocześnie układem wlewowym). Kula ϕ 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. 4. Geometria zestawu badawczego odlewów kul ϕ 100, ϕ 80, ϕ 60 i ϕ 40

Fig. 4. Research set geometry of casts sphere ϕ 100, ϕ 80, ϕ 60 and ϕ 40



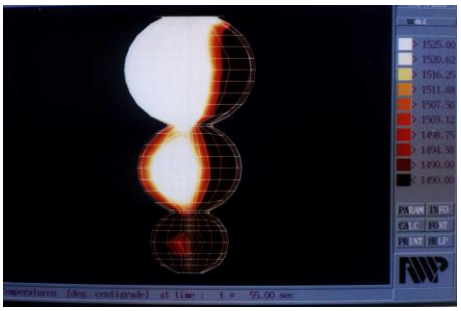
Rys. 5. Pole temperatury dla g = 3 mm, T_{zal} = 1600°C, τ = 15 s

Fig. 5. Field of temperature for g = 3 mm , T_{zal} = 1600°C, τ = 15 s

Na rys. 5 i 6 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

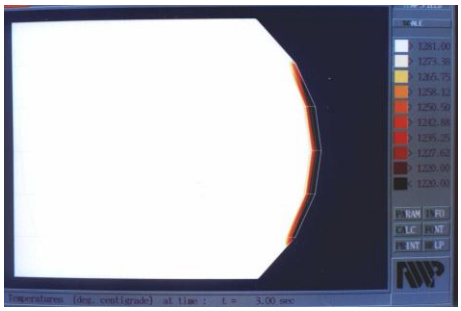
kompozytowej warstwie stopowej, zaś znacznie wolniejszy przyrost na tych częściach odlewów, gdzie ciekły metal kontaktuje się tylko z formą skorupową. Z szybkości przyrostu warstwy zakrzepłej staliwnego odlewu na kompozytowej warstwie stopowej można sądzić o grubości występującej strefy przejściowej,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

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.



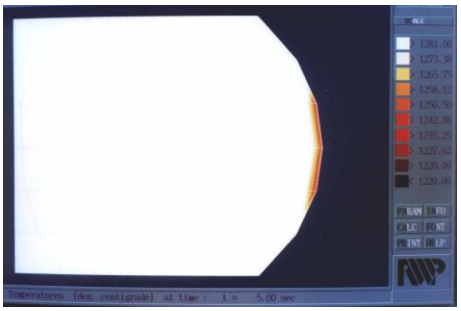
Rys. 6. Pole temperatury dla g = 3 mm, T_{zal} = 1600°C, τ = 55 s

Fig. 6. Field of temperature for g = 3 mm, T_{zal} = 1600°C, τ = 55 s



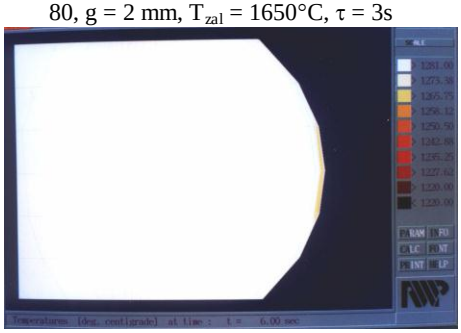
Rys. 7. Pole temperatury w warstwie stopowej - ϕ 80 mm, g = 2 mm, T_{zal} = 1650°C, τ = 3 s

Fig. 7. Field of temperature in alloy layer for ϕ 80, g = 2 mm, T_{zal} = 1650°C, τ = 3s



Rys. 8. Pole temperatury w warstwie stopowej - ϕ 80 mm, g = 2 mm, T_{zal} = 1650°C, τ = 5 s

Fig. 8. Field of temperature in alloy layer for ϕ 80, g = 2 mm, T_{zal} = 1650°C, τ = 5s



Rys. 9. Pole temperatury w warstwie stopowej - ϕ 80 mm, g = 2 mm, T_{zal} = 1650°C, τ = 6 s.

Fig. 9. Field of temperature in alloy layer for ϕ 80, g = 2 mm, T_{zal} = 1650°C, τ = 6s

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 tub 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 (ΔT_{kr} = 1525 - 1490 ^{0}C) i dla materiału stopowego ($\Delta T_{kr(Fe\text{-}Cr\text{-}c)}$ = 1281 - 1220^{0}C). Pozwala to śledzić proces zmian w czasie pola temperatury w warstwie stopowej.

Na rys.7, 8 i 9 (kula ϕ 80 mm, g = 2 mm) pokazano, co dzieje się z warstwą stopową dla najwyższej temperatury zalewania formy (1650^{0}C) po czasie ok. 6s. Po 3s warstwa stopowa jest jeszcze w stanie stałym i szybko nagrzewa się osiągając już po 5s stan stało — ciekły. W tym czasie odlew 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.

4. NUMERYCZNY OPIS PROCESU KRZEPNIĘCIA ODLEWU Z KOMPOZYTOWA WARSTWĄ STOPOWĄ

Proces tworzenia się powierzchniowej warstwy kompozytowej z wkładki na wewnętrznej powierzchni formy sporządzonej z materiałów stopowych ziarnistych (Cr, Mo, Si, Mn) w sensie technologicznym i cieplnym jest zbliżony do zagadnienia miejscowego ochładzania odlewu „luźnym" ochładzalnikiem zewnętrznym, o niewielkiej grubości (2 ÷ 5 mm), za to o skoncentrowanej masie składnika stopowego, który po roztopieniu dyfunduje w głąb odlewu. W związku z tym problem krzepnięcia metalu w formie należy do grupy zadań brzegowo-początkowych nazywanych zadaniami z ruchomymi granicami (moving boundary problems). Proces krzepnięcia i stygnięcia opisują równania różniczkowe cząstkowe typu parabolicznego i najbardziej charakterystyczną cechą odróżniającą zagadnienia termodynamiki procesów odlewniczych od typowych zadań z dziedziny przepływu ciepła są zmienne w czasie kształty podobszarów odpowiadających wyróżnionym fazom (stanom skupienia)

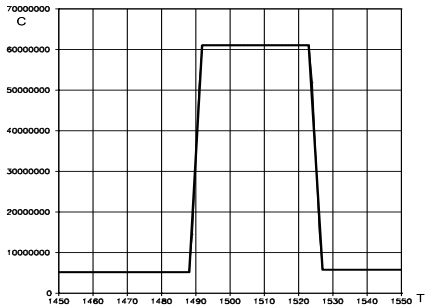
metalu, równocześnie niestacjonarne pole temperatury w rozważanym obszarze jest polem źródłowym, ponieważ przemiany zachodzące w procesie krzepnięcia związane są z wydzielaniem się ciepła utajonego. Występujący w równaniu różniczkowym składnik determinujący sposób wydzielania się ciepła przemiany nazywany jest funkcją źródła. Opisy matematyczne procesu krzepnięcia bazujące na równaniu energii z funkcją źródła należą do tzw. modeli matematycznych drugiej generacji lub też modeli makro-mikro. W praktyce obliczeń cieplnych związanych z krzepnięciem odlewu w formie rozważa się jednak najczęściej równania, w których oddziaływanie funkcji źródła uwzględnia się bądź przez wprowadzenie do opisu matematycznego tzw. zastępczej pojemności cieplnej bądź przez uzupełnienie opisu matematycznego procesów cieplnych warunkiem brzegowym (zadanym na granicy rozdziału faz), który w literaturze nazywany jest warunkiem brzegowym Stefana. Taki sposób podejścia umożliwia analizę procesu krzepnięcia odlewu na poziomie makroskopowym. W zależności od potrzeb można rozpatrywać modele dotyczące układu odlew-forma lub też modele opisujące krzepnięcie metalu, w których oddziaływanie cieplne formy zastępuje się określonym warunkiem brzegowym np. zakłada się a'priori pewną funkcję opisującą zmienną w czasie (lub ustaloną) temperaturę kontaktu na zewnętrznej powierzchni odlewu lub strumień ciepła oddawany od obszaru odlewu do obszaru formy itd., ale uproszczenia te, które w klasycznych rozwiązaniach analitycznych były niezbędne, w przypadku metod symulacji komputerowej nie są konieczne.

Symulację procesów cieplnych zachodzących w układzie odlew kulisty-wkładka-masa formierska wykonano przy założeniu, że zadanie można traktować jako jednowymiarowe (kierunek przepływu ciepła odpowiada współrzędnej promieniowej). Wzdłuż promienia odlewu kulistego wyróżniono n węzłów (liczba n wprowadzana była jako jedna z danych wejściowych). Kolejne trzy węzły o numerach n+1, n+2, n+3 należały do obszaru warstwy, natomiast węzły o numerach n+4, ..., m do obszaru masy formierskiej. Liczba m była na tyle duża, aby na zewnętrznej powierzchni formy można było przyjąć warunek adiabatyczności.

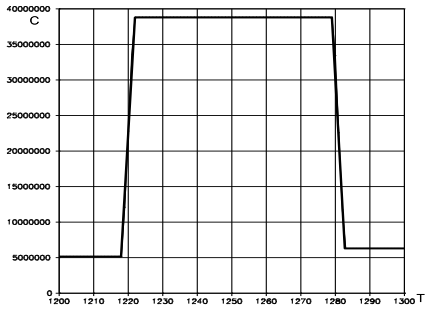
Generacja siatki w podobszarach układu realizowana była automatycznie i lokalny krok siatki geometrycznej wynikał z rozważanego promienia kuli i grubości warstwy. Krok siatki w obszarze masy odpowiadał krokowi siatki w obszarze odlewu. Z kolei krok czasu zadawany był w zbiorze danych wejściowych, przy czym w programie wprowadzono instrukcje „zabezpieczające" stabilność schematu różnicowego i automatyczną zmianę kroku, jeśli krok czasu okazywał się za duży. Parametry termofizyczne podobszarów przyjęto jako stałe na podstawie dostępnych danych literaturowych . Zastępczą pojemność cieplną materiału odlewu i warstwy kompozytującej opisano zgodnie z hipotezą Wiejnika z tym, że dodatkowo zastosowano tzw. wygładzenie rzędu zerowego zapewniające różnowartościowość wygładzanej funkcji w rozpatrywanym interwale temperatury. Na rys. 10 i 11 pokazano przebiegi wygładzonych zastępczych pojemności cieplnych materiału odlewu i wkładki kompozytującej.

Na rys. 12 pokazano dla porównania przebiegi obu zastępczych pojemności cieplnych. Należy w tym miejscu podkreślić, że pojemności te odniesiono do jednostki objętości, tzn. odpowiadają one iloczynowi pojemności cieplnej i gęstości masy.

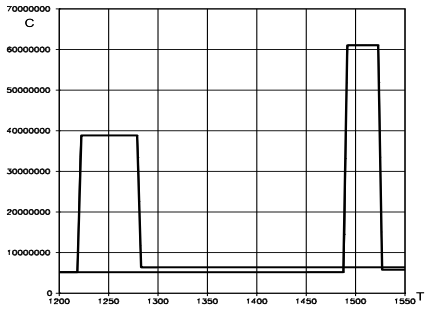
Opracowany program komputerowy wykorzystano do wykonania łącznie 27 eksperymentów numerycznych. Uwzględniono trzy średnice odlewów kulistych (60, 80 i 100 [mm]), trzy grubości warstwy (2, 3 i 4 [mm]) oraz trzy temperatury zalewania (1550, 1600 i 1650 [^{o} C]). Na rys. 13 i 14 przedstawiono wynik symulacji numerycznych dla kuli ϕ = 80 mm, g_w = 3 mm, T_{zal} = 1600° C.



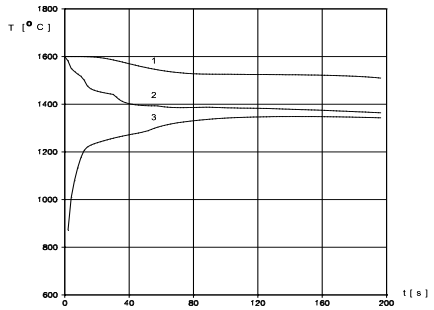
Rys. 10. Zastępcza pojemność cieplna dla materiału odlewu
Fig.10. Substitute heat capacity for cast material



Rys. 11. Zastępcza pojemność cieplna dla materiału warstwy kompozytującej
Fig.11. Substitute heat capacity for composite layer material

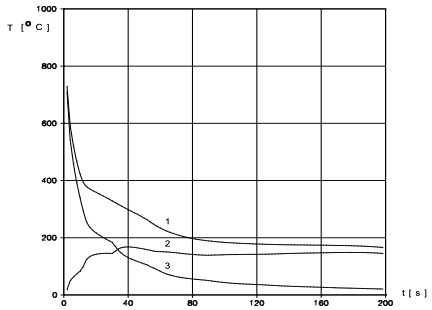


Rys. 12. Porównanie rozkładów zastępczych pojemności cieplnych
Fig.12. Comparison of substitute heat capacity distributions



Rys. 13. Krzywe stygnięcia: 1 - środek kuli, 2 - wewnętrzna powierzchnia warstwy, 3 – zewnętrzna powierzchnia warstwy

Fig.13. Self-cooling curves: 1 – sphere center, 2 – internal surface layer,
3 – external surface layer



Rys. 14. Zmiana temperatury: 1 - między środkiem kuli a wewnętrzną powierzchnią warstwy, 2 - w obszarze warstwy, 3 - między środkiem kuli a zewnętrzną powierzchnią warstwy

Fig.14. Change of temperature: 1 – between sphere center and internal surface layer, 2 – in layer area, 3 – between sphere center and external surface layer

5. ANALIZA BADAŃ I WNIOSKI

W oparciu o badania eksperymentalne, a także na podstawie modelowania komputerowego procesu i jego opisu teoretycznego oraz matematycznego opisu zjawisk cieplnych można dokonać oceny całokształtu zjawisk, decydujących o warunkach tworzenia się kompozytowych warstw stopowych na powierzchni odlewu bezpośrednio w procesie odlewania staliwa. Plan eksperymentu oraz badania wstępne istotności parametrów pozwoliły wyeliminować jako mało istotne – temperaturę początkową formy odlewniczej, materiał formy i jego własności termofizyczne (w granicach stosowanych materiałów formierskich w odlewnictwie staliwa) a także warunki technologiczne procesów wytwarzania odlewów jak: szybkość i czas zalewania formy. Istotnymi parametrami procesu pozostają: grubość kompozytującej warstwy (wkładki) stopowej, moduł krzepnięcia odlewów, temperatura zalewania formy oraz pośrednio temperatury likwidusu i solidusu staliwa, materiału podstawowego wkładki kompozytującej (przyjmując, że wszystkie eksperymenty realizowano dla tego samego składu chemicznego staliwa i materiału kompozytującego Fe-Cr-C).

Analiza tworzenia się kompozytowej warstwy stopowej na odlewie staliwnym pozwoliła na określenie najistotniejszych zmiennych czynników procesu oraz na postawienie hipotezy, że wkładka stopowa kompozytująca powierzchnię odlewu działając początkowo jako ochładzalnik zewnętrzny, zamraża cienką warstwę odlewu, która w dalszym procesie krystalizacji odlewu ulega ponownemu roztopieniu i po nagrzaniu warstwy kompozytującej następuje dyfuzja składników stopowych wkładki w głąb odlewu. Na podstawie wcześniejszych badań technologicznych stwierdzono, że przede wszystkim warunki cieplne krzepnięcia i stygnięcia odlewu oraz grubość wkładki decydują o jakości

warstwy kompozytowej.

Przedstawiona matematyczna analiza procesu opisuje zmiany pola temperatur, kinetyki krzepnięcia odlewu i nagrzewania się kompozytowej wkładki stopowej. Dokładność tych obliczeń zweryfikowano bezpośrednimi pomiarami temperatur w czasie realizacji eksperymentu rzeczywistego. Wysoka stabilność obliczeń, wg opracowanego programu, świadczy o poprawnie przyjętych założeniach modelu przepływu ciepła w układzie odlew-wkładka kompozytowa-forma i właściwie dobranych parametrach termofizycznych.

Badania teoretyczne modelowe potwierdziły tezę o powstawaniu stopowych warstw kompozytowych (Fe-Cr-C) ze stanu ciekłego, a nie poprzez infiltrację składników warstwy stopowej przez ciekłe staliwo.

LITERATURA

[1] Praca zbiorowa: Nowa technologia uszlachetniania odlewów do pracy w trudnych warunkach mechanicznych. Projekt badawczy Nr 3 P407 012 07.

[2] J. Marcinkowska, P. Wróbel: Technologia wytypowanych odlewów stosowanych w warunkach ścierania erozyjnego cząstkami mineralnymi. CPBP 02.09., Gliwice (1988).

[3] J. Marcinkowska, E. Majchrzak, P. Wróbel: Kontynuowanie umacniania powierzchni odlewów technologicznie użytecznych wraz z opracowaniem teoretycznym procesu. CPBP 02.09., Gliwice (1989).

[4] J. Gawroński, J. Marcinkowska, M. Cholewa, J. Szajnar, P. Wróbel: Stopowe warstwy kompozytowe na odlewach staliwnych. AMME 96 (1996).

[5] J. Gawroński, M. Cholewa, J. Szajnar, P. Wróbel: Composite Alloy Layers on the Steel Cast. EFM 97, Lviv (1997).

[6] J. Gawroński, J. Szajnar, P. Wróbel: Opracowanie podstaw teoretycznych otrzymywania kompozytowych warstw stopowych na wybranych powierzchniach odlewów ze staliwa węglowego. AMME 2002 (2002).

THE COMPLEX ASSESSMENT OF FORMATION CONDITIONS OF COMPOSITE ALLOY LAYERS ON SURFACES OF THE CAST CARBON STEEL

SUMMARY

The paper presents the formation conditions of alloy layers on the cast surfaces on the basis of laboratory - industrial research and numerical simulations of heat exchange process between cast and alloy layer. Phenomena of diffusion process was not considered in description because they are content of later research.

Recenzowała Prof. Ewa Majchrzak