

Lech BULKOWSKI, Urszula GALISZ, Artur MAZUR,
Jerzy POGORZALEK, Janusz STECKO, Piotr RÓŻAŃSKI

Instytut Metalurgii Żelaza

SYMULACJE NUMERYCZNE WSPOMAGAJĄCE BADANIA NAD OPRACOWANIEM TECHNOLOGII WYTWARZANIA ODLEWÓW ZE STOPU ALNICO 400

Przeprowadzone symulacje numeryczne przy wykorzystaniu programu JMat Pro i FactSage umożliwiły wyznaczenie temperatury solidus i likwidus oraz zmian parametrów stopu AlNiCo, takich jak: gęstość, rozszerzalność liniową, objętość molową, lepkość, przewodność cieplną, ciepło właściwe, współczynnik rozszerzalności cieplnej w funkcji temperatury. Wymienione parametry ulegają znacznym zmianom w zakresie temperatur od solidus do likwidus; temperatury te zweryfikowano metodą różnicowej analizy termicznej DTA. Wyniki symulacji numerycznej i termoanalizy posłużyły do opracowania technologii formy i wytapiania. W ramach badań nad technologią formy zastosowano modelowanie z wykorzystaniem programów Nova Flow & Solid oraz Fluent. W oparciu o wyniki symulacji procesu zalewania i krzepnięcia odlewu, określono niezbędne parametry technologiczne zalewania i konstrukcji formy.

Słowa kluczowe: stop AlNiCo, symulacje numeryczne, właściwości termofizyczne stopu, zalewanie, technologia formy

NUMERICAL SIMULATION SUPPORTING INVESTIGATION FOR DEVELOPING TECHNOLOGY OF ALNICO 400 ALLOY MANUFACTURING

Numerical simulations with the use JMat Pro and FactSage software enabled determination of solidus and liquidus temperature and AlNiCo alloy parameter changes, such as: density, linear expansion, molar volume, viscosity, thermal conductivity, specific heat, coefficient of thermal expansion as a function of temperature. These parameters vary significantly in the range of the solidus and liquidus temperatures; these temperatures were verified by differential thermal analysis DTA. The results of both numerical simulation and thermal analysis were used to develop the technology of mold, melting. In the study on the technology of mold the modeling with use of Nova Flow & Solid and Fluent software was applied. Based on the simulation results of the process of pouring and solidification of the casting the necessary technological parameters of casting and mold design were determined.

Key words: AlNiCo Alloy, numerical simulation, thermo-physical properties of the alloy, casting, technology of the mold

1. WPROWADZENIE

Stop AlNiCo stosowany jest w produkcji magnesów tzw. „twardych”. Podstawą wszystkich magnesów z tej grupy jest stop o formule Fe_2NiAl . Skład stopu na przestrzeni lat ulegał modyfikacji dodając do jego składu chemicznego takie pierwiastki jak Co, Ti, Cu, S, Nb oraz udoskonalając techniki wytwarzania magnesów „twardych”.

Przedmiotem badań był stop AlNiCo 400 o składzie chemicznym podanym w tabeli 1.

Wytwarzanie stopu AlNiCo 400 z przeznaczeniem na magneto zwierciadła, oparto o technologię wytapiania

w próżni z zalewaniem stopu do form odlewniczych na określony kształt półwyrobu.

Dla celów projektowania technologii: wykonania formy (zasilania wnętrza), technologii wytapiania stopu w próżniowym piecu indukcyjnym i zalewania formy, wykonano symulacje numeryczne, umożliwiające uzyskanie danych pozwalających optymalizować procesy technologiczne jak i procesy zachodzące w trakcie krystalizacji odlewów w formie. Przeprowadzenie takich symulacji wymaga znajomości danych fizykochemicznych uzyskanych w wyniku eksperymentu przy użyciu aparatury (termoanalyzer wraz z oprogramowaniem) lub specjalistycznych programów komputerowych.

Tabela 1. Skład chemiczny stopu AlNiCo 400 wg BN-87/0672-02

Table 1. The chemical composition of the alloy AlNiCo 400 according to BN-87/0672-02

Zawartość pierwiastków [% masowe]									
Ni	Al	Co	Cu	Ti	S	C	Mn	Si	Fe
13,5	7,5	24,0	2,7	0,5	–	max 0,17	max 0,01	0,1	reszta
14,0	8,0	25,5	3,2	1,0					

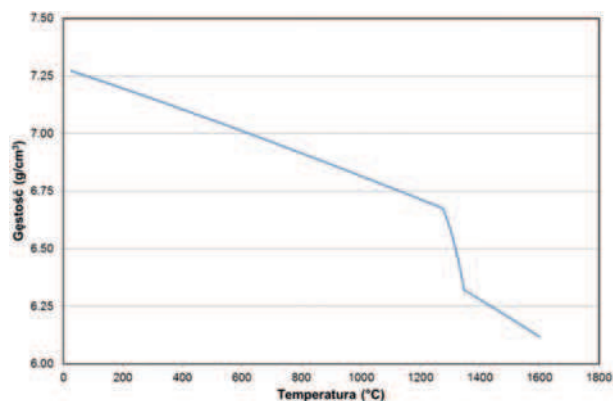
Właściwości stopu w procesie nagrzewania lub krzepnięcia stopu ulegają istotnym zmianom, szczególnie w zakresie temperatur solidus i likwidus. Znajomość tych zmian ma istotne znaczenie technologiczne, ponieważ umożliwia wyznaczenie stopnia przegrzania kąpieli metalowej do zalewania, obliczenie wartości skurczu objętościowego stopu w formie odlewniczej, a tym samym jej zaprojektowanie, a także moment rozbrajania formy.

2. BADANIA PODSTAWOWYCH WŁAŚCIWOŚCI STOPU

2.1. WŁAŚCIWOŚCI TERMOFIZYCZNE STOPU ALNICO400

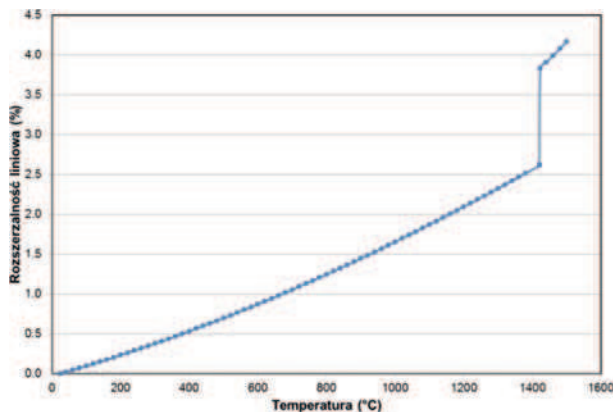
Obliczenia właściwości termofizycznych stopu AlNiCo przeprowadzono z wykorzystaniem programu JMat-Pro¹⁾. W ramach wykonanej symulacji wyznaczono zmiany poszczególnych parametrów w funkcji temperatury tj.:

- gęstości (Rys. 1),
- rozszerzalności liniowej (Rys. 2),
- objętości molowej (Rys. 3),



Rys. 1. Obliczona zależność zmiany gęstości w funkcji temperatury

Fig. 1. The calculated dependence of changes in density as a function of temperature

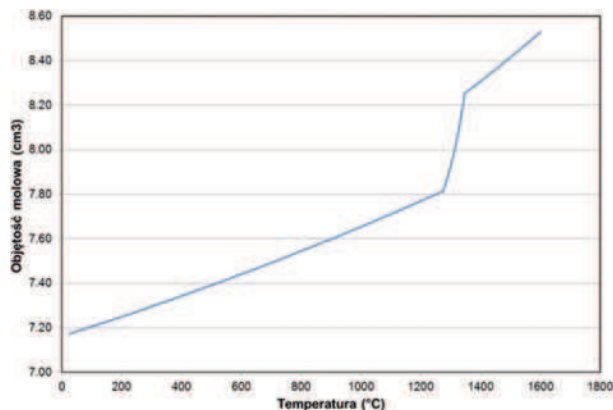


Rys. 2. Obliczona zależność zmiany rozszerzalności liniowej w funkcji temperatury

Fig. 2. The calculated dependence of linear expansion as a function of temperature

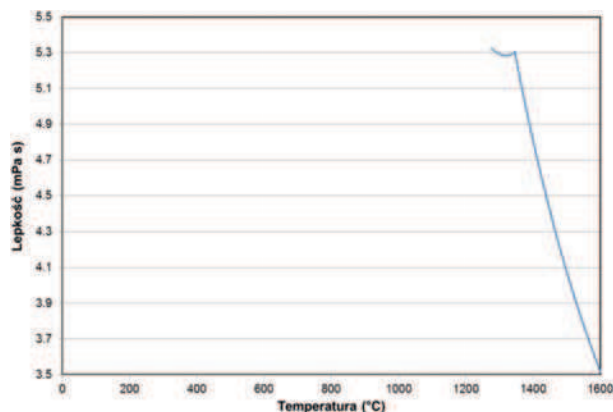
- lepkości (Rys. 4),
- przewodności cieplnej (Rys. 5),
- ciepła właściwego (Rys. 6),
- współczynnika rozszerzalności cieplnej (Rys. 7).

Z przedstawionych wykresów można określić temperaturę solidus i likwidus dla badanego stopu [1]. Temperatury te odzwierciedlają dwa wyraźne „załamania” w przebiegu krzywych obrazujące początek i koniec procesu roztapiania.



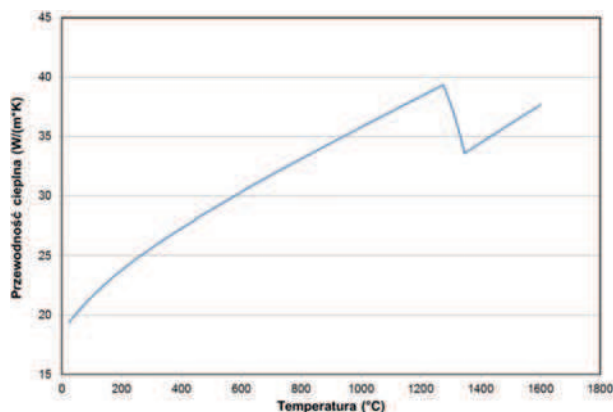
Rys. 3. Obliczona zależność zmiany objętości molowej w funkcji temperatury

Fig. 3. The calculated dependence of changes in molar volume as a function of temperature



Rys. 4. Obliczona zależność zmiany lepkości w funkcji temperatury

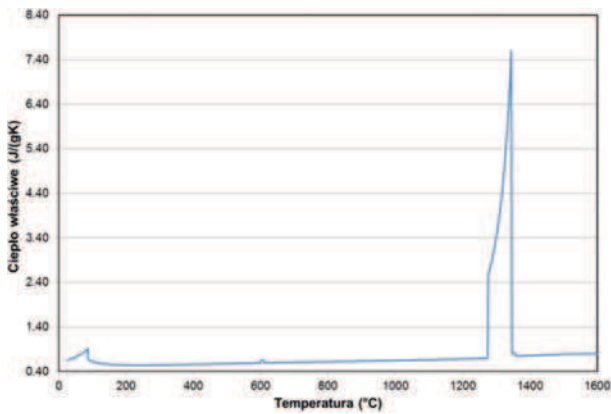
Fig. 4. The calculated dependence of viscosity changes as a function of temperature



Rys. 5. Obliczona zależność zmiany przewodności cieplnej w funkcji temperatury

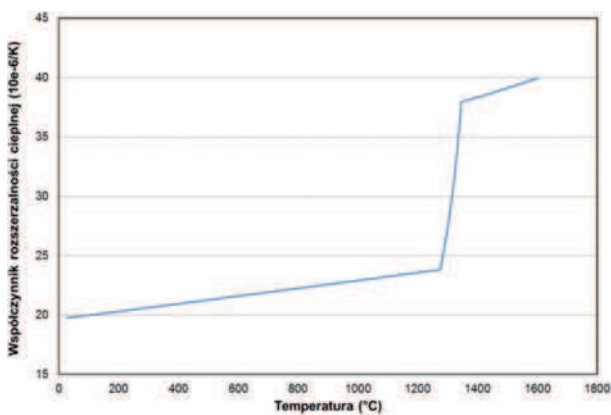
Fig. 5. The calculated dependence of the thermal conductivity changes as a function of temperature

¹⁾ <http://www.sentessoftware.co.uk/jmatpro.aspx>



Rys. 6. Obliczona zależność zmiany ciepła właściwego w funkcji temperatury

Fig. 6. The calculated dependence of specific heat changes as a function of temperature



Rys. 7. Obliczona zależność zmiany współczynnika rozszerzalności cieplnej w funkcji temperatury

Fig. 7. The calculated dependence of the thermal expansion coefficient changes with temperature

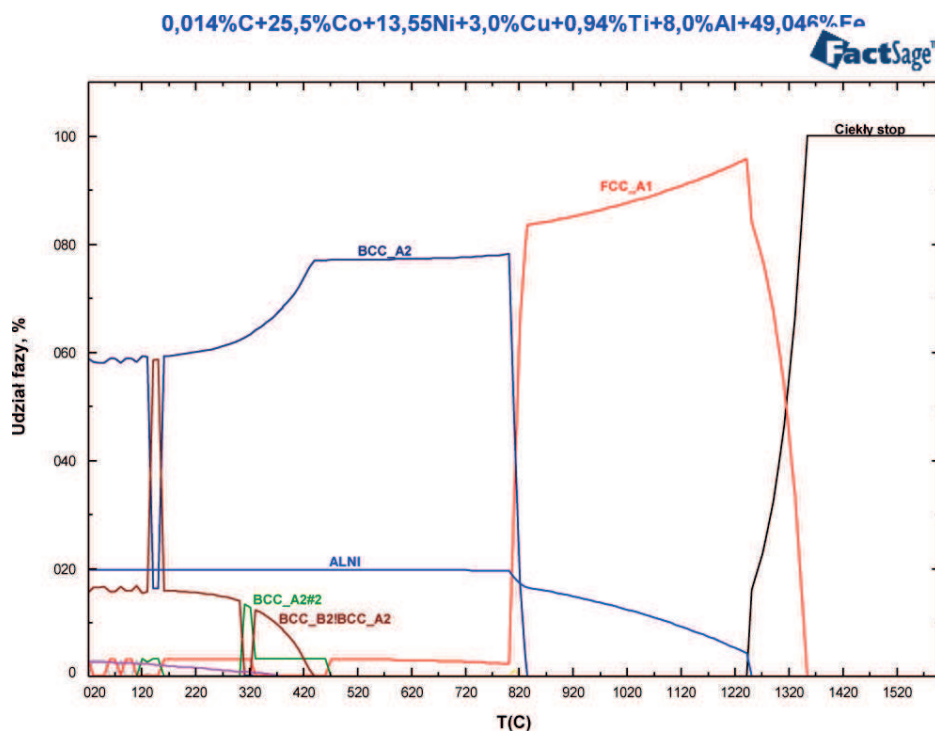
Z przeprowadzonych obliczeń właściwości termofizycznych stopu AlNiCo 400 wynika, że właściwości te ulegają istotnym zmianom w zakresie temperatury solidus i likwidus [1].

Znajomość powyżej przywołanych zmian właściwości termofizycznych umożliwia obliczenie wartości skurczu objętościowego stopu w formie odlewniczej, a tym samym jej zaprojektowanie. Znajomość temperatury likwidus stopu oraz zmian jego lepkości, tym samym lepkości stopu w funkcji temperatury umożliwia wyznaczenie stopnia przegrzania kąpieli metalowej do odlewania.

2.2. SYMULACJA PROCESU KRZEPNIĘCIA

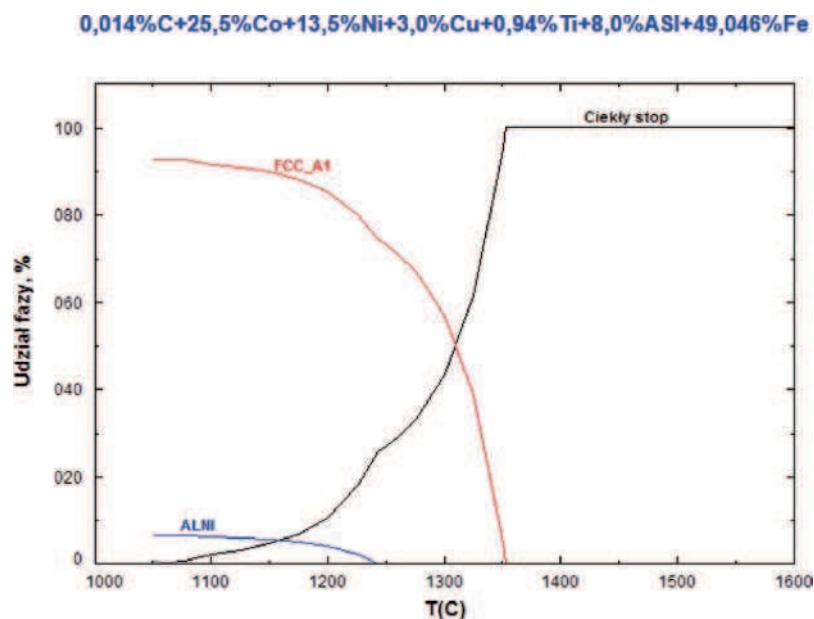
Celem symulacji było określenie przebiegu (temperatur) krzepnięcia stopu AlNiCo, z którego odlewane są pierścienie – magnesy. Symulację procesu krzepnięcia stopu wykonano za pomocą programu termochemicznego FactSage 6.4 z wykorzystaniem bazy danych FSstel, według dwóch modeli: modelu równowagowego (Rys. 8a) i modelu Schel-Gulivera (Rys. 8b).

Według modelu równowagowego, stop zaczyna krzepnąć w temperaturze około 1350°C (temperatura likwidus), kiedy to z ciekłej fazy wykryształowuje faza w układzie sześciennym ściennie centrowanym FCC-A1. Proces krzepnięcia kończy się w temperaturze około 1245°C (temperatura solidus). Tuż przed zakończeniem procesu krzepnięcia wytrąca się faza międzymetaliczna AlNi. Poczynając od temperatury około 830°C w miejsce fazy FCC-A1 pojawia się faza BCC-A2 (krystalizująca w układzie regularnym sześciennym przestrzennie centrowanym). Poczynając od temperatury około 430°C pojawia się faza BCC_A2BCC_B2, a w temperaturze około 360°C faza Lavesa_C14 (faza międzymetaliczna typu AB₂ mająca charakter wtórnego roztworu stałego, budowa heksagonalna C14).



Rys. 8a. Symulacja przebiegu równowagowego krzepnięcia stopu Fe-Co-Ni-Al-Cu o składzie podanym powyżej

Fig. 8a. Equilibrium solidification simulation of the alloy Fe-Co-Ni-Al-Cu having the composition given above



Rys. 8b. Symulacja przebiegu krzepnięcia wg modelu Schel-Gulivera stopu Fe-Co-Ni-Al-Cu o składzie podanym powyżej

Fig. 8b. Simulation of solidification according to the model Schel-Guliver of Fe-Co-Ni-Al-Cu alloy having the composition given above

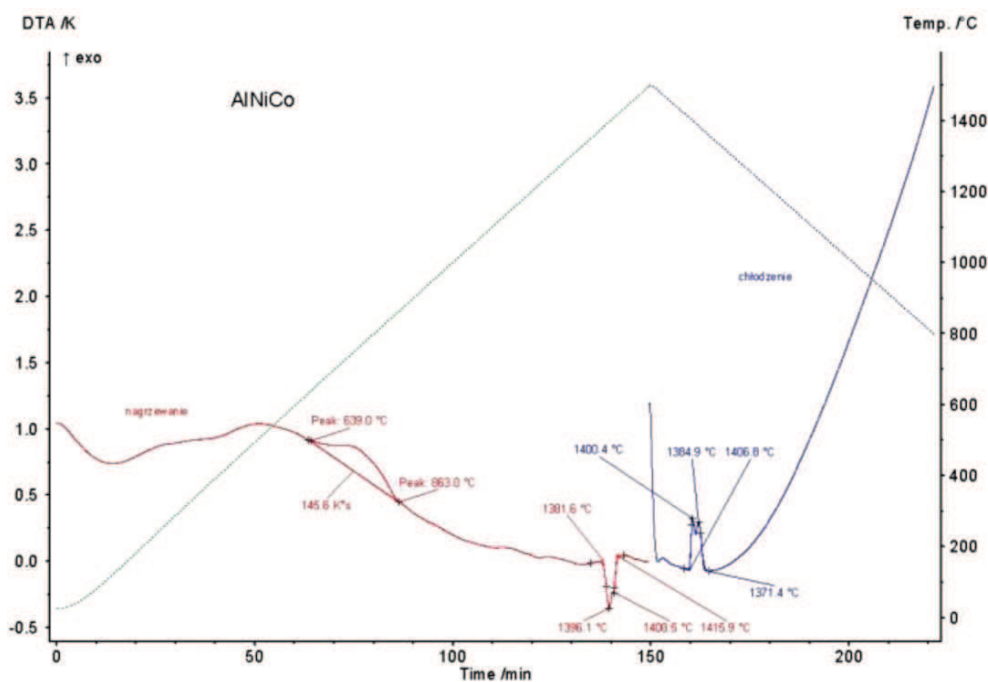
Według modelu Schel-Gulivera, krzepnięcie stopu rozpoczyna się w temperaturze nieco powyżej 1350°C (likwidus), a kończy się w temperaturze około nieco powyżej 1050°C (solidus). Stop krystalizuje w układzie sześciennym, ściennie centrowanym FCC-A1. W temperaturze około 1240°C z fazy ciekłej wykrystalizowuje faza międzymetaliczna AlNi. Ze względu na istotne różnice temperatury solidus występujące w symulacji numerycznej według modelu równowagowego oraz Schel-Gulivera, konieczna była weryfikacja temperatury krzepnięcia stopu metodą symulacji fizycznej, za pomocą analizy termicznej stopu AlNiCo (DTA).

2.3. RÓŻNICOWA ANALIZA TERMICZNA

Celem analizy termicznej próbek stopu AlNiCo metodą DTA było wyznaczenie charakterystyk wysokotemperaturowych stopu. Badania przeprowadzono dla 2 próbek stopu z różnymi szybkościami nagrzewania [1].

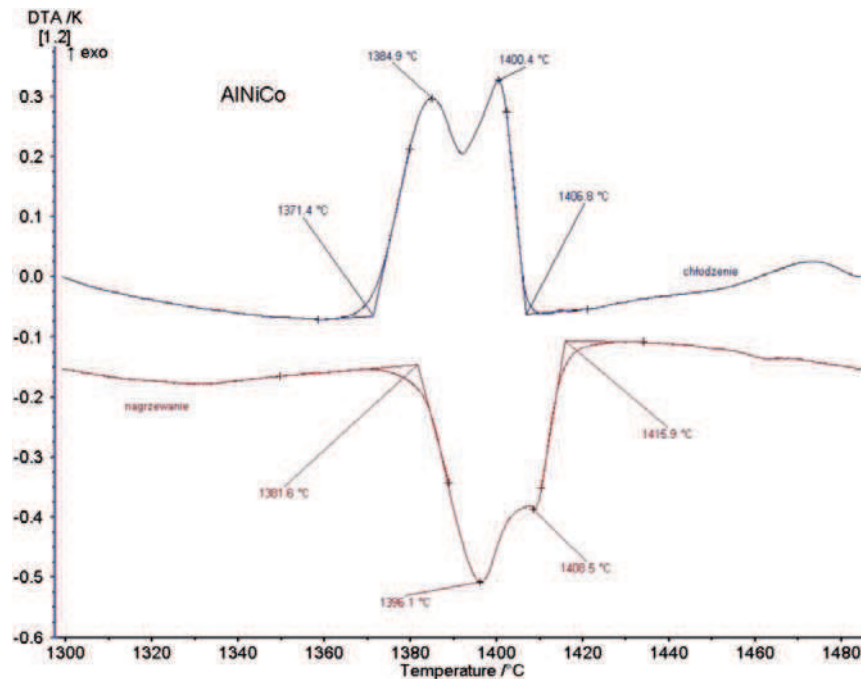
Analizę termiczną materiału przeprowadzono na analizatorze firmy NETZSCH model STA 449 F3 Jupiter, metodą różnicowej analizy termicznej (DTA) w atmosferze obojętnej.

Krzywe DTA w układzie czas-temperatura przedstawiono na rys. 9, a na rys. 10 przedstawiono krzywą DTA w zakresie temperatur 1300÷1480°C.



Rys. 9. Zmiany termicznej analizy różnicowej (DTA) w zależności od czasu i temperatury podczas ogrzewania i chłodzenia próbki stopu AlNiCo (według zadanego programu temperaturowego)

Fig. 9. Changes in differential thermal analysis (DTA) depending on the time and temperature during the heating and cooling of the sample of AlNiCo alloy (at a predefined temperature program)



Rys. 10. Zmiany termicznej analizy różnicowej (DTA) w zależności od temperatury podczas ogrzewania i chłodzenia próbki stopu AlNiCo (według zadanego programu temperaturowego) w zakresie temperatur 1300÷1480°C

Fig. 10. Changes in differential thermal analysis (DTA) depending on temperature during the heating and cooling of the sample of AlNiCo alloy (at a predefined temperature program) in the temperature range 1300÷1480°C

Jak wynika z przeprowadzonych badań nagrzewania próbki z szybkością 10°C/min, przedstawionych w postaci krzywych na rys. 8 i 9 początek roztopienia wyznacza temperatura 1381,6°C, przy przekroczeniu której występuje faza ciekła oraz faza stała. Krzywa charakteryzuje najsilniejszy przebieg reakcji endotermicznej, osiągając „pik” przy temperaturze 1396,1°C, co może świadczyć o przemianie fazowej związanej z przebudową sieci. Dalsze nagrzewanie powoduje całkowite roztopienie próbki stopu i odpowiada temperaturze likwidus, która wynosi 1415,9°C.

Jak wynika z badań DTA otrzymane wyniki zmiany stanu skupienia przedstawione na wykresie (Rys. 8 i 9) istotnie różnią się od wyników symulacji numerycznych wykonanych programem Thermo-Calc oraz IMat Pro. Temperatury przemian wyznaczone metodą DTA nie odpowiadają temperaturom równowagi termodynamicznej i od nich odbiegają ponieważ jest to metoda dynamiczna w której nie osiąga się stanu równowagi.

Dla celów technologicznych przyjęto temperatury początku i końca roztopiania stopu AlNiCo wyznaczone metodą DTA opartą o warunki rzeczywiste, jako temperatury: solidus – 1381°C oraz likwidus – 1416°C [1].

3. BADANIA SYMULACYJNE ODLEWANIA PIERŚCIENI I OPRACOWANIE OPTIMALNEJ KONSTRUKCJI FORMY ODLEWNICZEJ

W ramach badań nad optymalizacją technologii formy, przeprowadzono badania procesu wypełnienia wnętrza formy oraz krystalizacji odlewu z kształtowaniem pola temperatury w formie i w odlewie, w oparciu o fizyczne modelowanie z użyciem programów Nova Flow & Solid oraz Fluent, prowadzące do doboru układu

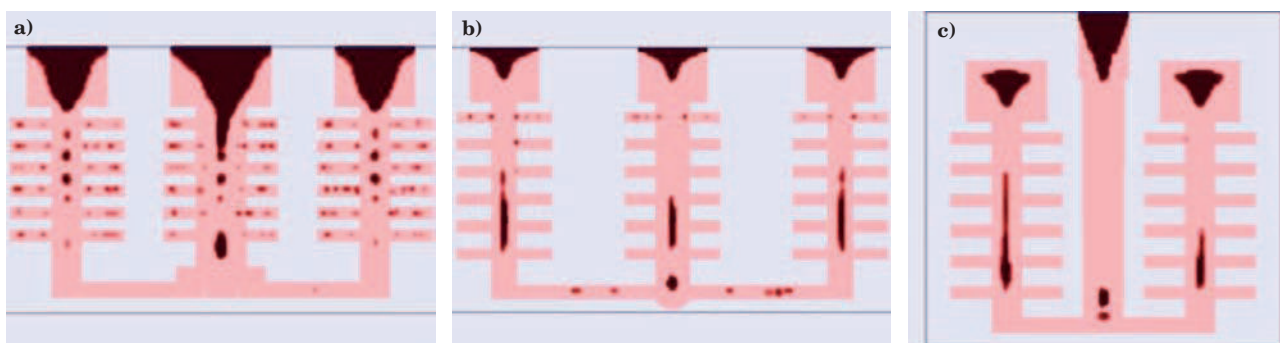
zasilania formy [2]. Celem tych badań było określenie najkorzystniejszych parametrów odlewania, w oparciu o wyniki komputerowej symulacji procesu zalewania i krzepnięcia odlewu. Symulacji poddano różne rodzaje form o zmiennych parametrach dotyczących głównie:

- geometrii wnętrza formy wraz z układem wlewowym,
- temperatury zalewania,
- osnowy masy formierskiej (analizowano 4 rodzaje masy formierskiej).

Doboru dokonano na podstawie oceny ilości, wielkości i rozkładu wad pochodzenia skurczowego w odlewie. Wykonano szereg symulacji zalewania i krzepnięcia odlewu, dokonując zmian geometrii układu wlewowego i zasilającego. Badaniom poddano formy wykonane z mas formierskich na bazie kwarcytu, chromitu, korundu oraz węgla krzemu. Masy te były stosowane również do wykonania form, do których odlewano woty doświadczalne.

Na podstawie analizy wyników symulacji stwierdzono, że dla postawionych wymagań możliwe jest uzyskanie odlewów bez wad skurczowych tylko przy zastosowaniu masy formierskiej na osnowie z węgla krzemu, dla określonych założeń geometrycznych wnętrza formy. Istotnym parametrem wpływającym na ilość i usytuowanie wad jest prędkość zalewania determinowana czasem zalewania. Na rys. 11 pokazano przykładowe wyniki symulacji dla form, różniących się składem masy formierskiej, geometrią wnętrza formy oraz prędkością zalewania. Z przeprowadzonych badań wynika, że najkorzystniejsze umiejscowienie wad skurczowych wystąpiło w formie monolitycznej (wersja II), wykonanej z masy z węgla krzemu, przy mniejszej prędkości zalewania formy metalem (Rys. 11c).

Wyniki symulacji wykorzystano do opracowania geometrii formy umożliwiającej wykorzystanie oprzyrządowania formierskiego, pozwalającego na uzyskanie

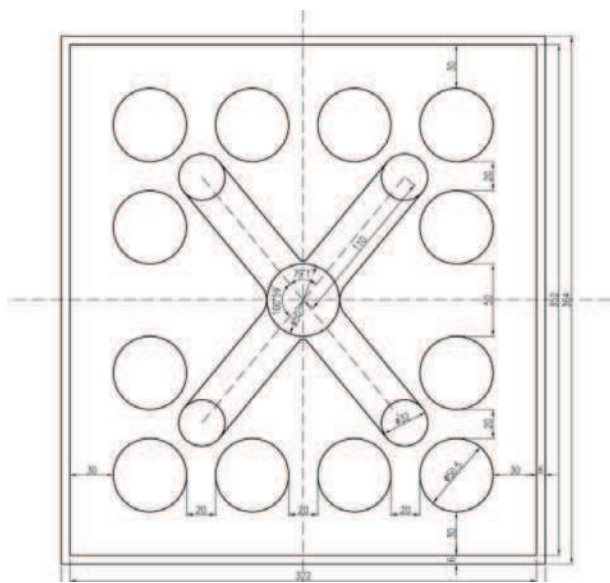


Rys. 11. Wyniki symulacji dla różnych układów odlewniczych: a) forma z masy kwarcowej, b) forma z węglika krzemu, wg wariantu I - zalewanie z większą prędkością, c) forma z węglika krzemu, wg wariantu II - zalewanie z mniejszą prędkością

Fig. 11. The simulation results for different casting systems: a) mold from quartz sand, b) mold from silicon carbide, acc. to variant I - pouring with greater speed, c) mold from silicon carbide, acc. to variant II - pouring with slower speed

wyższej jakości powierzchni wnętrza formy, a co za tym idzie powierzchni odlewu, oraz dokładności wykonania elementów formy a zatem powtarzalności w poszczególnych „warstwach” zespołu odlewów, jak również jej adaptacji w przestrzeni roboczej pieca VIM 30.

Schematycznie geometrię wnętrza formy „monolitycznej” oraz sposób rozprowadzenia metalu do poszczególnych stosów formy (wariant II) przedstawiono na rys. 12.



Rys. 12. Projekt wnętrza formy monolitycznej z czterema zespołami modelowymi

Fig. 12. Project of cavity in monolithic mold with four model units

5. PODSUMOWANIE

Wykonane symulacje numeryczne procesu roztopienia i krzepnięcia stopu AlNiCo za pomocą programu termochemicznego Fact Sage, obejmowały wyznaczenie udziału fazy stałej i ciekłej w funkcji temperatury. Z wykonanych, według modelu równowagowego oraz Schel-Gulivera obliczeń wynika, że temperatura likwidus stopu AlNiCo wynosi około 1350°C (Rys. 8a i 8b). Istotną różnicę obserwuje się w obliczonych wartościach temperatury solidus, gdzie model równowago-

wy wyznacza temperaturę końca krzepnięcia na około 1245°C (Rys. 8a), natomiast model Schel-Gulivera na około 1050°C (Rys. 8b). Tak duża różnica ($\Delta T \sim 200^\circ\text{C}$) w wartościach temperatury końca krzepnięcia ma istotne znaczenie technologiczne, między innymi na moment rozbrajania formy odlewniczej.

Właściwości termofizyczne stopu obliczone programem IMat Pro, takie jak gęstość, rozszerzalność liniowa oraz rozszerzalność cieplna stopu w funkcji temperatury w procesie nagrzewania lub krzepnięcia ulegają istotnym zmianom, szczególnie w zakresie temperatur solidus i likwidus (Rys. 1÷7).

Temperatury solidus i likwidus obliczone programem IMat Pro odpowiadają wynikom wyznaczonym przez model równowagowy Fact Sage. Znajomość powyższych przywołanych zmian właściwości termofizycznych umożliwia obliczenie wartości skurczu objętościowego stopu w formie odlewniczej, a tym samym jej zaprojektowanie. Znajomość temperatury likwidus stopu oraz zmian jego lepkości, tym samym leżności stopu w funkcji temperatury umożliwia wyznaczenie stopnia przegrzania kąpielii metalowej do zalewania formy.

Jak wynika z badań DTA, otrzymane wyniki zmiany stanu skupienia przedstawione na wykresach (Rys. 9 i 10), istotnie różnią się od wyników symulacji numerycznych wykonanych programem Fact Sage oraz IMat Pro, ponieważ jest to metoda dynamiczna, w której nie osiąga się stanu równowagi. Dla celów technologicznych przyjęto temperatury początku i końca roztopienia stopu AlNiCo wyznaczone metodą DTA opartą o warunki rzeczywiste, jako temperatury: solidus -1381°C oraz likwidus -1416°C.

Wyniki symulacji z użyciem programów Nova Flow & Solid oraz Fluent, prowadzące do doboru układu zasilania formy, dla określenia najkorzystniejszych parametrów zalewania, wykorzystano do opracowania geometrii formy umożliwiającej wykorzystanie oprzyrządowania formierskiego, pozwalającego na uzyskanie wyższej jakości powierzchni wnętrza formy, powierzchni odlewu, oraz dokładności wykonania elementów formy, a zatem powtarzalności w poszczególnych „warstwach” zespołu odlewów, jak również jej adaptacji w przestrzeni roboczej pieca VIM 30.

LITERATURA

1. Pogorzałek J., Bulkowski L., Galisz U. i inni: „Opracowanie doświadczalnej technologii wytapiania i odlewania w próżniowym piecu indukcyjnym stopu specjalnego typu AlNiCo o zoptymalizowanym składzie chemicznym oraz wykonanie wytopów badawczych z odlaniem stopu do form o wariantowej konstrukcji”. Sprawozdanie IMŻ nr PI-0004-03 z dnia 12.2013, praca niepublikowana
2. Cholewa M., Bartocha D., Kondracki M., Wróbel T.: „Optymalizacja procesu wypełniania wnęki formy oraz krystalizacji odlewu z kształtowaniem pola temperatury w formie i w odlewie w oparciu o fizyczne modelowanie prowadzące do doboru ukła-

du zasilania z użyciem programów NovaFlow&Solid oraz Fluent”. Sprawozdanie z pracy badawczej: nr: BS/2712/125F/2012, zad. 1, etap II, Gliwice, 05.2013 r. i nr: BS/2712/16F/2013, zad. 2, etap I, Gliwice, 12.2013 r., Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczno-Technologiczny, Katedra Odlewnictwa, Gliwice, praca niepublikowana

Praca została wykonana w ramach projektu INNOTECH-K2/IN2/42/182371/NCBR/12, dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.