

# Analiza wpływu warunków odprowadzania ciepła z formy na przebieg krystalizacji żeliwa o podwyższonej zawartości Si

M. Stawarz\*, M. Gromczyk, M. Kondracki, J. Szajnar

Katedra Odlewnictwa, Politechnika Śląska, ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice, Polska

\*Kontakt korespondencyjny: e-mail: Marcin.Stawarz@polsl.pl

Otrzymano 20.11.2014; zaakceptowano do druku 12.12.2014

## Streszczenie

Żeliwo krzemowe z uwagi na wysoką odporność chemiczną, która stanowi kluczową zaletę tego materiału, przez długi czas nie posiadało większej konkurencji i cieszyło się dużą popularnością na rynku materiałów metalowych ze względu na niewielką cenę. Niestety produkcja odlewów z tego materiału wymaga szczególnej uwagi i ostrożności, co stanowi barierę dla odlewni [1]. W artykule zaprezentowano wyniki badań związanych z procesem krystalizacji żeliwa wysokokrzemowego przeprowadzonych w oparciu o analizę termiczno derywacyjną (wyznaczono temperatury charakterystyczne procesu krystalizacji analizowanego stopu, posiłkując się odpowiednim fragmentem wykresu układu równowagi fazowej Fe – Si oraz analizą procesu w oparciu o obliczenia z wykorzystaniem programu Thermo – Calc) oraz analizę metalograficzną mikrostruktury.

**Słowa kluczowe:** żeliwo wysokokrzemowe, analiza termiczno derywacyjna, krystalizacja, fazy międzymetaliczne

## 1. Wprowadzenie

Żeliwo wysokokrzemowe reprezentuje grupę materiałów kwasoodpornych. Jest to stop żelaza z krzemem zawierający od 11,5 do 18,0 % Si oraz inne składniki, takie jak C, Mn, P, S. Materiał ten jest odporny na działanie wysokich temperatur, może pracować w warunkach do 1100°C [2]. Wykazuje on również odporność na zużycie ściernie. Najistotniejszą jednak zaletą żeliwa wysokokrzemowego jest wysoka odporność na działanie korozyjne kwasów [3]: stop 14,5 % Si – wykazuje odporność na działanie 30% kwasu siarkowego; stop o zawartości 16,5 % Si – odporność na kwas siarkowy i azotowy o dowolnym stężeniu; stop ok. 17 % Si – odporność na działanie roztworu miedzi i chloru.

Niestety, żeliwo tego typu posiada również szereg wad, które ograniczają jego produkcję i zastosowanie. Żeliwo wysokokrzemowe cechuje [3]:

- bardzo mała odporność na działanie korozyjne zasad;
- większa zawartość Si w stopie, zwiększa jego kruchość;
- duży skurcz odlewniczy;
- niskie własności mechaniczne;
- skłonność do tworzenia jam skurczowych;
- bardzo silna skłonność do pochłaniania gazów.

Szczególny wpływ na własności technologiczne, mechaniczne i odlewnicze żeliwa wysokokrzemowego wywiera węgiel. Dla każdej zawartości Si w stopie istnieje optymalny zakres zawartości C [2]. Zawartość węgla w żeliwie wysokokrzemowym powinna być zmniejszana przy jednoczesnym zwiększaniu zawartości krzemu w stopie. Węgiel może różnie wpływać na własności stopu, a jego wpływ może mieć pozytywne lub negatywne skutki. Korzyści wynikające z obecności węgla w żeliwie wysokokrzemowym mogą być następujące [3]:

- zmniejszenie skurczu odlewniczego;

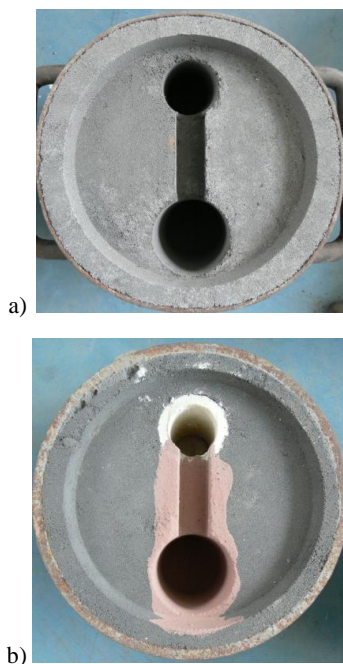
- polepszenie obrabialności materiału;
- zmniejszenie kruchości.

Zbyt duże stężenie węgla może jednak powodować pogorszenie własności mechanicznych oraz zmniejszenie szczelności odlewów [3].

## 2. Przebieg badań

W niniejszym artykule skoncentrowano się na badaniach prowadzonych nad żelitem krzemowym o podwyższonej zawartości krzemu do 19%. Prezentowane wyniki odnoszą się do jednej serii wytopów dla podanej zawartości Si, jednocześnie są one wybranym fragmentem szerszych badań [4-8] tego materiału prowadzonych w Katedrze Odlewnictwa Pol. Śl.

Do przeprowadzenia wytopu eksperymentalnego przygotowano dwa rodzaje form odlewniczych [9] przystosowanych do przeprowadzenia pomiaru zmiany temperatury w czasie. Pierwsza z nich to forma piaskowa z dodatkiem bentonitu (rys. 1a), w której metal ma stygnąć w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, panujących w odlewni, natomiast w drugiej formie zastosowano wkładkę z sibalru (rys. 1b), która w założeniu ma spowolnić proces odprowadzania ciepła z formy [4]. W każdej z form umieszczono termoelement w osłonce kwarcowej. Termoelementy podłączono do przetwornika wielokanałowego, dzięki któremu możliwe było zarejestrowanie zmian temperatury w czasie, podczas krzepnięcia metalu w formach.



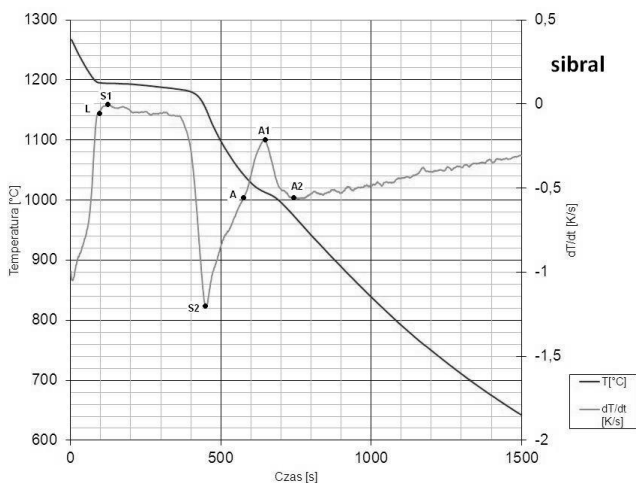
Rys. 1. a) Forma piaskowa z dodatkiem bentonitu,  
b) Forma z wkładką z sibalru [4]

Do wytopu żelity o 19% zawartości krzemu przygotowano odpowiednio wsad metalowy składający się ze złomu stalowego,

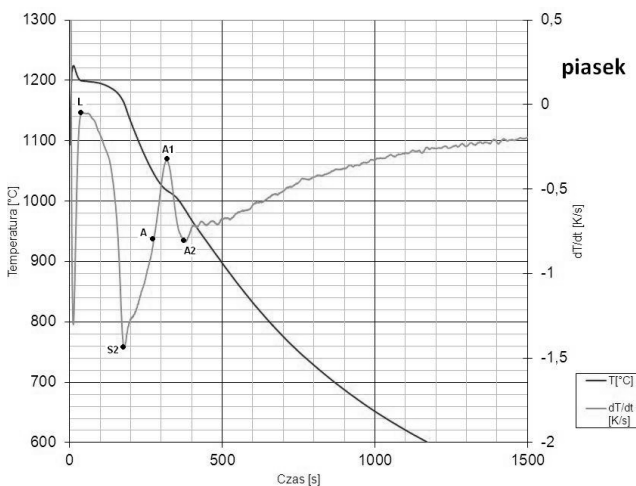
żelazostopu FeSi75 oraz nawęglacza. Po stopieniu wsadu ciekły stop przelano do wygrzanej kadzi odlewniczej. Formy wypełniane były ciekłym stopem w następującej kolejności: forma z wkładką sibalrową, a następnie forma bez wkładki.

## 3. Wyniki eksperymentu

Przebieg zarejestrowanych zmian temperatury w czasie oraz obliczone dla nich wartości pierwszej pochodnej przedstawiono na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Wykres zmian temperatury w czasie oraz pierwszej pochodnej temperatury po czasie dla żelity wysokokrzemowego (19% Si) w formie z wkładką z sibalru



Rys. 3. Wykres zmian temperatury w czasie oraz pierwszej pochodnej temperatury po czasie dla żelity wysokokrzemowego (19% Si) w formie piaskowej

Wykorzystanie wkładki z sibalru pozwoliło spowolnić proces krystalizacji. Analiza uzyskanych wyników dla badanego stopu

obejmowała obserwację efektów cieplnych procesu krystalizacji zarówno w stanie ciekłym jak i w stanie stałym. Na podstawie widocznych punktów charakterystycznych na krzywej krystalizacji (pierwszej pochodnej zmian temperatury w czasie) wyznaczono temperatury charakterystyczne procesu krystalizacji, posilując się odpowiednim fragmentem wykresu układu równowagi fazowej Fe – Si oraz analizą procesu w oparciu o obliczenia z wykorzystaniem programu Thermo – Calc.

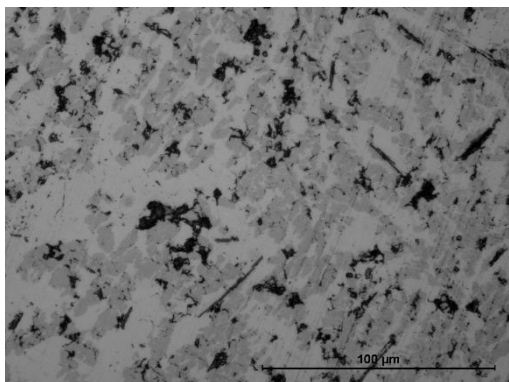
Punkt L rzutowany na krzywą chłodzenia wyznacza temperaturę TL początku krystalizacji pierwotnej (temperatura likwidus), punkt S1 odpowiada temperaturze TS1 związanej z maksymalnym efektem cieplnym krystalizacji eutektyki. Punkt S2 wyznacza po zrzutowaniu na krzywą temperaturową temperaturę TS2 końca krystalizacji pierwotnej (temperatura solidus). Temperatura TA w punkcie A określa początek przemiany fazy  $Fe_2Si$  w fazę  $Fe_5Si_3$ , temperatura maksymalnego efektu cieplnego pochodzącego od tej przemiany TA1 wyznaczona została przez zrzutowanie punktu A1 na krzywą chłodzenia, natomiast punkt A2 określa temperaturę końca przemiany TA2. Dane odczytane z wykresów zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1.

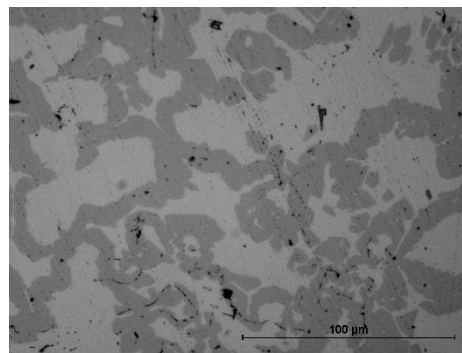
Temperatury charakterystyczne procesu krystalizacji dla różnych warunków odprowadzania ciepła z formy

	TL, °C	TS1, °C	TS2, °C	TA, °C	TA1, °C	TA, °C
Sibral	1205	1195	1155	1040	1015	970
Piasek	1205	1205	1150	1040	1025	985

Na rysunkach 4 oraz 5 przedstawiono otrzymane mikrostruktury stopu. Widoczna jest na nich znaczna ilość twardej fazy krzemkowej  $Fe_5Si_3$  (obszar ciemniejszy) w osnowie ferrytu krzemowego (jasny obszar) oraz wydzieleniem grafitu.

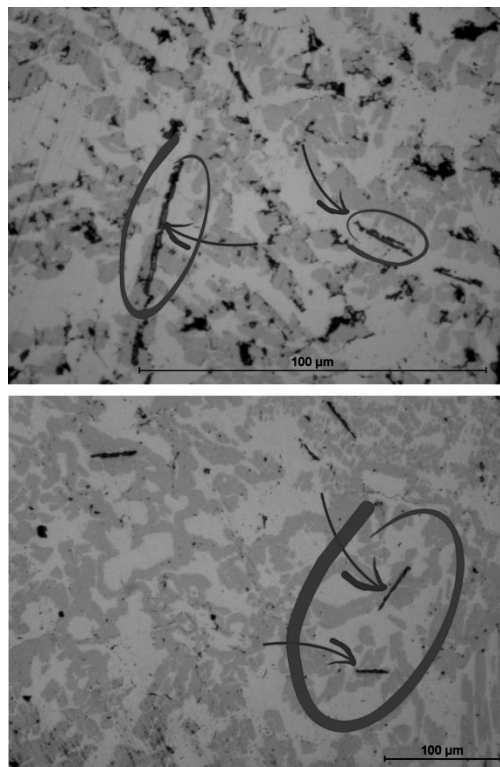


Rys. 4. Mikrostruktura żeliwa wysokokrzemowego o zawartości 19%Si odlanego do formy piaskowej



Rys. 5. Mikrostruktura żeliwa wysokokrzemowego o zawartości 19%Si odlanego do formy z wkładką sibralową

Analiza mikrostruktury otrzymanego stopu pozwala stwierdzić, że ilość grafitu widoczna na zglądzie metalograficznym jest nieznaczna, co jest zgodne z zalecaną niską zawartością węgla, jaka powinna występować w stopie o zawartości krzemu na poziomie 19%. Z analizy chemicznej (przy użyciu analizatora zawartości C i S firmy LECO) wynika, że zawartość węgla w badanym żeliwie wyniosła 0,52%. W osnowie badanego stopu pojawiły się również podłużne igłowe wydzielenia, które sklasyfikowano jako wydzielenie pierwotne fazy  $Fe_2Si$  krystalizujące z cieczy, zaznaczono je wyraźnie na rysunku 6.



Rys. 6. Wydzielenia pierwotne  $Fe_2Si$  (od góry dla formy z piasku, poniżej dla formy z wkładką sibralową)

Większą ilość wydzieleni fazy pierwotnej  $Fe_2Si$  zaobserwowano w mikrostrukturze stopu krzepnącego w formie bez wkładki z sibralu. Analizę ilościową przeprowadzono z użyciem komputerowego analizatora obrazu firmy Nikon z oprogramowaniem NIS – Elements BR.

## 4. Wnioski

W osnowie badanego stopu zidentyfikowano dwa rodzaje faz międzymetalicznych, fazę  $Fe_2Si$  w postaci podłużnych igłowych wydzieleni, sklasyfikowaną w oparciu o obliczenia z wykorzystaniem programu Thermo – Calc jako wydzielenie pierwotne krystalizujące bezpośrednio z cieczy oraz fazę  $Fe_5Si_3$ . Spowolnienie procesu krystalizacji skutkowało zmniejszeniem ilości pierwotnych wydzieleni fazy  $Fe_2Si$ . Efekt cieplny od krystalizacji fazy  $Fe_2Si$  nie został zidentyfikowany na zarejestrowanych wykresach ATD.

Wprowadzenie dwóch różnych warunków odprowadzania ciepła z form odlewniczych wpłynęło na zarejestrowane wartości charakterystycznych temperatur odpowiadających procesowi krystalizacji stopu oraz na morfologię otrzymanych mikrostruktur.

Niższą o  $10\text{ }^\circ\text{C}$  wartość zarejestrowanej temperatury (dla formy z wkładką sibralową) zaobserwowano dla punktu S1 związanego z maksymalnym efektem cieplnym krystalizacji eutektyki. Analogiczne różnice wystąpiły dla punktu A1, który opisuje maksymalny efekt cieplny pochodzący od przemiany fazy  $Fe_2Si$  w fazę  $Fe_5Si_3$ . Natomiast temperatura opisująca koniec przemiany fazy  $Fe_2Si$  w  $Fe_5Si_3$  była niższa o  $15\text{ }^\circ\text{C}$ .

W obu analizowanych przypadkach nie zaobserwowano różnic dla temperatury likwidus ( $1205\text{ }^\circ\text{C}$ ) oraz temperatury w punkcie A określającej początek przemiany fazy  $Fe_2Si$  w fazę  $Fe_5Si_3$  ( $1040\text{ }^\circ\text{C}$ ).

Wyższą wartość temperatury (o  $5\text{ }^\circ\text{C}$ ) dla punktu S2 (temperatura solidus) zarejestrowano dla warunków spowolnionego odprowadzania ciepła z formy.

W kolejnym etapie badań planuje się analizę fazową składników osnowy stopu oraz statystyczne powiązanie danych otrzymanych z analizy ATD oraz badań metalograficznych.

## Literatura

- [1] Henderieckx G.D.: *Silicon Cast Iron*. Gietech BV 2009.
- [2] Fałęcki Z.: *Zarys metalurgii i odlewnictwa żeliwa, cz. III żeliwo stopowe*. Skrypty uczelniane nr 276, Kraków 1972, AGH.
- [3] Sakwa W.: *Żeliwo*. Katowice 1974, Śląsk.
- [4] Stawarz M.: *Influence of technological parameters on the microstructure of the silicon cast iron*. 22<sup>nd</sup> International Conference on Metallurgy and Materials, Metal 2013, May 15-17.2013, Brno, Czech Republic, p. 92-96.
- [5] Stawarz M.: *Aspekty wytwarzania żeliwa wysokokrzemowego w warunkach przemysłowych*. Archives of Foundry Engineering, Vol. 11, Special Issue 3/2011, p. 205 – 208, (in Polish).
- [6] Stawarz M.: *Żeliwo wysokokrzemowe, zapomniany materiał odporny na korozję – problemy podstawowe*. Ochrona przed korozją, vol. 55, nr 5, 2012, p 235, (in Polish).
- [7] Stawarz M., Janerka K., Jezierski J., Szajnar J.: *Thermal effect of phase transformations in high silicon cast iron*. 23<sup>rd</sup> International Conference on Metallurgy and Materials, Metal 2014, May 21-23.2014, Brno, Czech Republic
- [8] Gromczyk M.: *Praca dyplomowa magisterska*. Gliwice 2014.
- [9] Studnicki A.: *Rola wybranych modyfikatorów w krystalizacji żeliwa chromowego odpornego na zużycie ścierne*. Archives of Foundry Engineering, Monografia 2013, str. 39-41, (in Polish).

# Analysis of the Effect of Heat Removal from the Mould to the Crystallization of Cast Iron with High Si Content

## Abstract

Silicon cast iron with high chemical resistance, which is the biggest advantage of this material, did not have any competition for a long time. It was popular on the market of metal materials because of its low price. However, the production of this material requires special attention and precautions, which is a barrier for foundry [1]. The article presents the results of research of high silicon cast iron crystallization based on thermal derivative analysis (have been identified characteristic temperatures of the investigated alloy crystallization process basis on the part of Fe – Si phase diagram and process analysis using calculations made in Thermo – Calc software) and metallographic analysis of the structure.