

**WYTWARZANIE METODĄ ODLEWNICZĄ  
WYSOKOKRZEMOWYCH STOPÓW Fe-C-Cr**K. GRANAT<sup>1</sup>, M. PIGIEL<sup>2</sup>Zakład Odlewnictwa i Automatykacji Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji  
Politechniki Wrocławskiej, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27; 50-370 Wrocław; Polska

## STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wyniki badań nad możliwością wytwarzania metodą odlewniczą wysokokrzemowych stopów Fe-C-Cr. Stwierdzono, że przy zachowaniu ustalonej procedury postępowania, doborze odpowiednich składników wsadu metalowego i wykorzystaniu specjalnych nomogramów możliwe jest wytwarzanie stopów o założonych właściwościach użytkowych, w których krzem sprzyja krystalizacji zwiększonej ilości twardych węglików chromu typu  $M_7C_3$ , a ponadto krzemków typu  $M_5Si_3$  i  $M_3Si$  oraz węglikokrzemków typu  $M_7X_3$ ,  $M_5X_3$  i  $M_3X_2$ .

*Key words: Fe-C-Cr-Si alloys, casting of Fe-C-Cr-Si alloys, silicides, carbosilicides*

## 1. WPROWADZENIE

Wprowadzenie do stopów żelaza z węglem odpowiednich pierwiastków stopowych pozwala na podwyższenie ich właściwości wskutek zmiany cech osnowy, oraz regulację rodzaju, udziału, kształtu, wielkości i rozmieszczenia nowych faz tworzących strukturę stopów.

Uznaną grupę stopów odpornych na zużycie ścierne i korozję stanowią stopy Fe-C-Cr [11, 12, 13]. W opublikowanych w ostatnich latach pracach z dziedziny rozwoju i optymalizacji właściwości tej grupy stopów widoczna jest tendencja do poprawy ich

---

<sup>1</sup>dr inż.; e-mail: [kazimierz.granat@pwr.wroc.pl](mailto:kazimierz.granat@pwr.wroc.pl)

<sup>2</sup>dr inż.; e-mail: [miroslaw.pigiel@pwr.wroc.pl](mailto:miroslaw.pigiel@pwr.wroc.pl)

właściwości w wyniku wprowadzania tanich i łatwo dostępnych pierwiastków stopowych. Szczególną rolę przypisuje się dodatkowi krzemu [2, 3, 7, 8, 15].

W przedstawionej pracy przeprowadzono analizę możliwości wytwarzania metodą odlewniczą wysokokrzemowych stopów Fe-C-Cr, w których dodatek krzemu, powodując zmiany strukturalne, związane między innymi ze zmianą aktywności i rozpuszczalności węgla i chromu, wpłynie korzystnie na właściwości tych stopów takie jak odporność na zużycie, korozję elektrochemiczną i utlenianie związane z umocnieniem osnowy, wzrostem ilości twardych faz węglkowych, krzemkowych lub węglko-krzemkowych, zapewniając otrzymanie przydatnych do zastosowania w przemyśle wydobywczym, przy produkcji cementu i materiałów ogniotrwałych lub transporcie rurowym poczwórnych stopów Fe-C-Cr-Si [4, 5, 9, 10, 14].

## **2. BADANIA WŁASNE**

W pracy ustalono program i zakres badań, zapewniający możliwość wytwarzania stopów Fe-C-Cr-Si o określonej docelowej strukturze, stygnących w warunkach technologicznych (nierównowagowych), i charakteryzujących się najkorzystniejszymi właściwościami użytkowymi. Stwierdzono, że sterowanie właściwościami tych stopów może odbywać się już na etapie projektowania procesu metalurgicznego (dobór składu chemicznego stopu i dobór składników wsadu) z wykorzystaniem skorygowanych wykresów fazowych i wyborem metody odlewania wyrobów.

Wytwarzano stopy zawierające od 3,7 do 5,4% wag. C, od 25 do 62% wag. Cr oraz od 0,12 do 11% wag. Si. Skład chemiczny stopów dobrano na podstawie klasyfikacji zawartej w normie „Żeliwo odporne na ścieranie” (PN EN 12513.2000) oraz grupę stopów wytwarzanych w celu ustosunkowania się do nielicznych, zdaniem autorów dyskusyjnych, danych literaturowych opisujących skład fazowy tej grupy stopów i wprowadzono do nich stopniowo do 10% wag. Si.

Parametry procesu wytwarzania badanych stopów określono, po uwzględnieniu wyników obliczeń wpływu krzemu na rozpuszczalność węgla, co stanowi równocześnie wskazówkę podczas doboru materiałów wsadowych gwarantujących wyeliminowanie ze struktury stopów niepożądanych składników, np. wydzielenia grafitu. Szczególnie pomocnymi w projektowaniu i optymalizacji składu chemicznego stopów były obliczenia wpływu krzemu na układ fazowy, stygnących w warunkach technologicznych (nierównowagowych) stopów Fe-C-Cr.

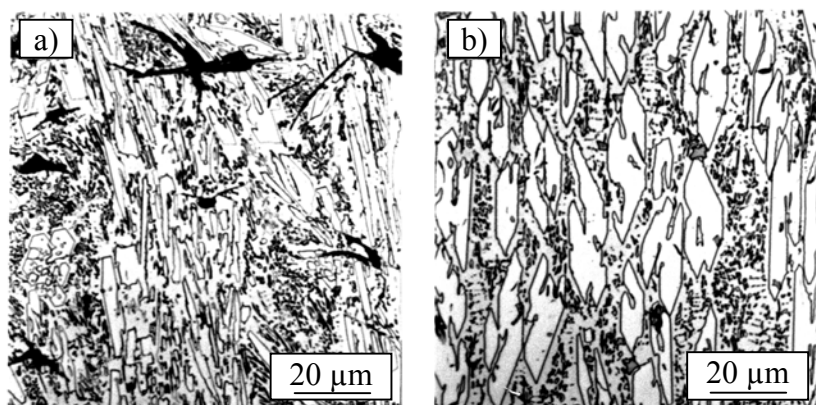
## **3. MATERIAŁY UŻYTE DO BADAŃ I SPOSÓB WYTWARZANIA STOPÓW**

Próbki niskochromowych stopów Fe-C-Cr-Si, wytapiano w elektrycznym piecu indukcyjnym średniej częstotliwości w tyglu grafitowo-szamotowym w atmosferze azotu, przegrzewano do temperatury 1500°C, po czym odlewano do form skorupowych (zapewniając mniejszą prędkość stygnięcia). Otrzymywano w ten sposób próbki walcowe średnicy 15 i 30 mm i długości 200 mm przeznaczone do badań metalograficznych oraz prostopadłościennych 70x50x20 mm do badań odporności na zużycie ściernie.

Materiał do badań wysokochromowych stopów Fe-C-Cr-Si wytapiano w oporowym piecu Tammanna w atmosferze argonu klasy 5,0, w tyglu ceramicznym wykonanym z  $Al_2O_3$  i przegrzewano do temperatury  $1600^{\circ}C$ , po czym odlewano do zabezpieczonych pokryciem ochronnym i podgrzanych do temperatury  $450^{\circ}C$  form metalowych (zapewniając większą prędkość stygnięcia). Otrzymano w ten sposób próbki walcowe średnicy 15 mm i długości 100 mm, przeznaczone do badań metalograficznych lub prostokątne próbki  $70 \times 50 \times 20$  mm do badania odporności na zużycie ścierne.

Ze względu na silnie grafityzujące oddziaływanie krzemu stwierdzono [2, 3], że uzupełnianie węgla dodatkiem grafitu w badanych stopach prowadzi – przy podwyższonej zawartości krzemu - do powstawania w strukturze stopów wydzielen grafitu niekorzystnych z punktu widzenia odporności na zużycie ścierne, korozję i utlenianie. Związane jest to z niepełnym rozpuszczaniem cząstek grafitu, szczególnie przy podwyższonej zawartości krzemu, który ogranicza rozpuszczalność węgla w stopie [6]. Dlatego określono wpływ równoczesnego oddziaływania chromu i krzemu na rozpuszczalność węgla w stopach Fe-C korzystając z prezentowanych w literaturze zależności.

Zaobserwowano, że w strukturze próbek, o zawartości węgla bliskiej do obliczonej ze wzorów maksymalnej zdolności do jego rozpuszczania, występują niekorzystne (z punktu widzenia np. odporności na zużycie ścierne) wydzielenia grafitu pierwotnego i eutektycznego (rys. 1a) [6]. Zjawisko to występowało wówczas, gdy w procesie wytwarzania stopów zawartość węgla uzupełniano dodatkami grafitu.



Rys. 1. Mikrostruktura stopów (% wag.): 5,0 C, 26,4 Cr, 7,2 Si (a) i 4,9 C, 26,5 Cr, 8,3 Si (b); Trawiono  $Mi27Fe$ ; pow. 500x

Fig. 1. The mikrostructure of the alloys (wt %): 5,0 C, 26,4 Cr, 7,2 Si (a) and 4,9 C, 26,5 Cr, 8,3 Si (b); (etched with  $Mi27Fe$ ; 500x)

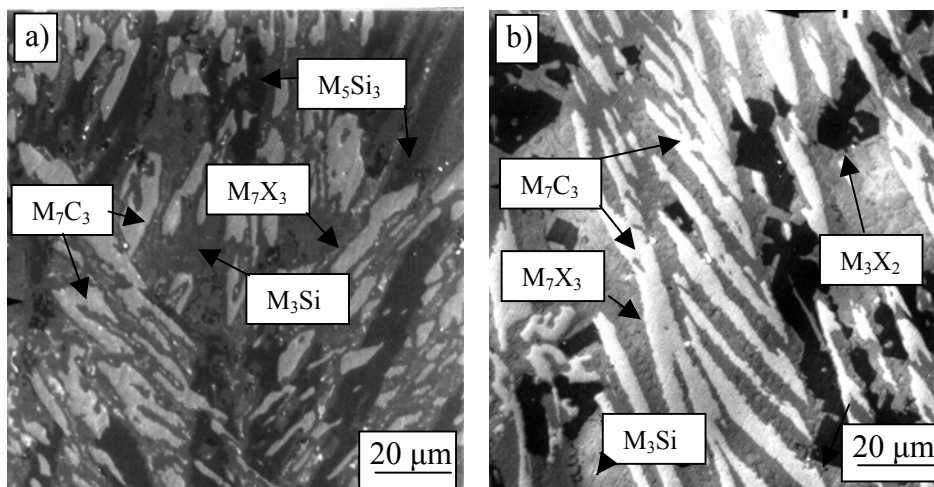
Po przeprowadzeniu korekty składu wsadu metalowego, tj. wprowadzeniu węgla w postaci węgla chromu  $Cr_3C_2$  oraz obniżeniu do niezbędnego minimum dodatku grafitu, wyeliminowano ze struktury stopów niekorzystne jego wydzielenia (rys. 1b) [6]. Jedynie w dwóch stopach, zawierających największą ilość krzemu i węgla, w których

zawartość węgla przekraczała lub była bliska zgodnej z obliczeniami granicy jego rozpuszczalności, w strukturze obserwuje się pojedyncze pierwotne lub dendrytycznie rozmieszczone wydzielenia grafitu [8].

Nomogramy, sporządzone w oparciu o przedstawioną w literaturze zależność maksymalnej rozpuszczalności węgla w stopach Fe-C-Cr-Si) umożliwiają dobór odpowiedniego składu chemicznego stopów, gwarantującego całkowite rozpuszczenie węgla i brak niekorzystnych wydzieleni grafitu w strukturze.

Przy zachowaniu opisanej powyżej procedury postępowania, (dobór odpowiednich składników wsadu metalowego, wykorzystanie nomogramów) możliwym jest wytwarzanie stopów o założonych właściwościach użytkowych (odporność na zużycie, korozję, utlenianie oraz wytrzymałość i stabilność strukturalną w podwyższonych temperaturach) w których krzem sprzyja krystalizacji zwiększonej ilości twardych węglików, krzemków i węglikokrzemków.

W strukturze niskochromowego stopu zawierającego największą ilość krzemu oraz stopów wysokochromowych występują, poza typowymi dla grupy stopów Fe-C-Cr fazami, twarde krzemki typu  $M_5Si_3$  i  $M_3Si$  oraz węglikokrzemki typu  $M_7X_3$ ,  $M_5X_3$  i  $M_3X_2$  zapewniające badanym stopom dodatkowo korzystne właściwości użytkowe takie jak odporność na zużycie, korozję i utlenianie (rys. 2) [16].



Rys. 2. Mikrostruktura stopów 12SL (a) i 10SL (b).Naparowano ZnSe; pow. 500x  
Fig. 2. The mikrostruktura of the alloys 12SL (a) and 10SL (b); (vapour-deposited with ZnSe; 500x)

#### 4. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ I WNIOSKI

Badania możliwości wytwarzania odlewów ze stopów Fe-C-Cr z dodatkiem krzemu przeprowadzono na materiałach wytopionych w indukcyjnym piecu średniej częstotli-

wości lub oporowym piecu Tammana zgodnie z opracowaną, przedstawioną w pracy procedurą.

Stwierdzono, że ze względu na silnie grafityzujące oddziaływanie krzemu należy już w procesie doboru składu wsadu metalowego zestawiać go tak, aby możliwym było wyeliminowanie z mikrostruktury niekorzystnych z punktu widzenia odporności na zużywanie ściernie, korozję czy utlenianie, wydzielen grafitu. Osiągnąć to można poprzez obniżenie do niezbędnego minimum dodatku nawęglacza w postaci grafitu we wsadzie metalowym zastępując go węglikiem chromu  $Cr_3C_2$  oraz posłużenie się, sporządzonymi na podstawie proponowanych w literaturze równań maksymalnej rozpuszczalności węgla w stopach Fe-C-Cr-Si, nomogramami. Takie postępowanie pozwala na dobór optymalnego składu chemicznego stopu gwarantujący całkowite rozpuszczenie węgla i w efekcie wyeliminowanie niekorzystnych, z punktu widzenia odporności na zużycie, wydzielen grafitu z mikrostruktury stopu.

Wprowadzenie do badanych materiałów, wytapianych zgodnie z opisaną procedurą, określonej zawartości krzemu powoduje, że krystalizuje w nich większa ilość twardych węglików  $M_7C_3$  oraz poza typowymi dla grupy stopów Fe-C-Cr fazami, twarde krzemki typu  $M_5Si_3$  i  $M_3Si$  i węglikokrzemki typu  $M_7X_3$ ,  $M_5X_3$  i  $M_3X_2$  zapewniające badanym stopom dodatkowe, korzystne właściwości użytkowe takie jak odporność na zużycie, korozję i utlenianie.

Na podstawie przedstawionych wyników badań stwierdzono, że można w ten sposób, już podczas projektowania stopów Fe-C-Cr-S, sterować ich właściwościami i wytwarzać materiały konstrukcyjne o zamierzonych korzystnych właściwościach użytkowych.

## LITERATURA

- [1] BREUER F., *Untersuchungen über das System Chrom-Eisen-Silizium-Kohlenstoff und ihre Nutzenanwendung im Bereich der technischen Silikochrom-Legierungen*. Praca doktorska, RWTH Aachen, 1961.
- [2] DRZENIEK H., GRANAT K., KOWALSKI M., LUGSCHEIDER E., *Gefügebeurteilung eines Fe-Cr-Si-C-Schweißgutes*. Sonderband der Praktischen Metallographie Nr 18, 1987, s. 377–387.
- [3] DRZENIEK H., GRANAT K., LUGSCHEIDER E., *Eisen - Chrom - Silizium - Kohlenstoff-Legierungen für das Metalllichtbogenauftragsschweißen zum Schutz gegen abrasiven Verschleiß*. Schweißen und Schneiden, 1990, (42), Z. 11, s. 560-563.
- [4] FEHLNER F.P., *Low-temperature Oxidation. The Role of Vitreous Oxides*. New York-Chichester-Brisbane-Toronto-Singapore, John Wiley and Sons Inc. 1986.
- [5] GRÄFEN H., *Die Praxis des Korrosionsschutzes*. Grafenau, Kontakt und Studium Bd. 64, Expert-Verlag 1981.
- [6] GRANAT K., *Rola krzemu w odlewniczych stopach typu Fe-Cr-C*. Acta Metallurgica Slovaca, 1999, nr 2, s. 322-326.
- [7] GRANAT K., DRZENIEK H., DUDZIŃSKI W., HAIMANN K., LUGSCHEIDER E., *Gefüge und einige Eigenschaften von hochchromhaltigen Fe-Cr-Si-C-Legierungen*. Sonderband der Praktischen Metallographie, 1991, Nr 22, s. 157-166.

- [8] GRANAT K., DRZENIEK H., LUGSCHEIDER E., *Identifizierung von Gefügebestandteilen in Legierungen vom Typ Fe-Cr-Si-C*. Sonderband der Praktischen Metallographie, Nr 21, 1990, s. 45-54
- [9] HABIG K.-H., *Verschleiß und Härte von Werkstoffen*. München-Wien, Carl Hanser Verlag 1980.
- [10] JURA S., STUDNICKI A., *Badania porównawcze zużycia erozyjnego niektórych stopów żelaza*. Krzepnięcie Metali i Stopów 1997, 34, s.41-48.
- [11] PODRZUCKI C., *Żeliwo. Struktura, właściwości i zastosowanie*. T. 1,2, Wyd. ZG STOP Kraków, 1991.
- [12] PRZYBYŁ M., STUDNICKI A., JURA S., *Wpływ węgla i chromu na ilość fazy węglkowej w żeliwie chromowym*. Krzepnięcie Metali i Stopów 2 (2000) 44, s. 305-310.
- [13] SAKWA W., JURA S., SAKWA J., *Odporne na ścieranie stopy żelaza Część I. Żeliwo. Część II. Staliwo*. ZG STOP Kraków 1980.
- [14] UETZ H., *Abrasion und Erosion*. München - Wien, Carl Hanser Verlag 1986, s. 30-57.
- [15] ZUM GAHR K.-H., *Reibung und Verschleiß bei metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen*. Düsseldorf, DGM Informationsgesellschaft Verlag 1986.
- [16] GRANAT K., *Wieloskładnikowe stopy Fe-C-Cr-Si odporne na zużycie, przeznaczone na odlewy i warstwy napawane*. Monografia, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.

## MANUFACTURING OF Fe-C-Cr ALLOYS WITH HIGH SILICON CONTENT BY CASTING METHOD

### SUMMARY

In the paper the results of investigations concerned with the manufacturing by the casting method of Fe-C-Cr alloys containing high silicon content were shown. It was ascertained, that by applying of the manufacturing procedure, selection of alloying elements and applying of special nomographs it is possible the manufacturing of alloys characterized by the assumed functional properties. Discussed properties are achieved according to the silicon effect on the formation of the high amount of silicon carbides of  $M_7X_3$ ,  $M_5X_3$  and  $M_3X_2$  type.

Recenzował: Prof. Zdzisław Samsonowicz