

Jan SZYMSZAL, Eugeniusz KRZEMIEN¹, Marian MALIŃSKI

WYSOKOŻAROODPORNE, NIEMODYFIKOWANE, CHROMOWOALUMINIOWE
STOPY ŻELAZA O ZWIĘKSZONEJ ZAWARTOŚCI WĘGLA

Streszczenie. W artykule określono wpływ składu chemicznego na właściwości żaroodporne i podstawowe właściwości odlewnicze niemodyfikowanych stopów Fe-C-Cr-Al (Si, Mn) o zwiększonej zawartości węgla. Przedstawiono wyniki badań lejułości, skurczu i odporności na utlenianie przy cyklicznych zmianach temperatury i w warunkach izotermicznych. Przeprowadzono również badania struktury stopów przed badaniami żaroodporności i po ich przeprowadzeniu. W badaniach wykorzystano plan eksperymentu oparty na planowaniu dwupoziomowym.

1. Wprowadzenie

Zabezpieczenie tworzyw metalowych przed działaniem wysokotemperaturowego środowiska utleniającego stanowi w chwili obecnej jeden z ważniejszych problemów współczesnej techniki.

Odlewnicze stopy żelaza z węglem, jako najtańsze ze stopów, budzą szerokie zainteresowanie technologów i konstruktorów. Stopy te jednak charakteryzują się małą żaroodpornością i praktycznie odlew ze zwykłego żeliwa lub staliwa może pracować do temperatury około 400-500°C. Wprowadzenie do tych stopów chromu, aluminium, niklu itd. pozwala na znaczne zwiększenie ich żaroodporności [6, 7, 8, 9, 10, 11].

Odlewy pracujące w podwyższonej temperaturze narażone są na działanie obciążeń o różnym charakterze i natężeniu. Głównie są to obciążenia cieplne, które są niejednokrotnie połączone z obciążeniami chemicznymi i mechanicznymi.

Najczęściej przyspieszonemu zużyciu się i niszczeniu elementów pracujących w wysokiej temperaturze sprzyja atmosfera utleniająca właściwa ich miejscu pracy, dlatego też od elementów tych wymaga się głównie wysokiej odporności na utlenianie.

W ostatnich latach obserwuje się duże zainteresowanie odlewniczymi stopami żelaza z węglem i z dodatkami chromu i aluminium. Są to stopy, których skład chemiczny spełnia wymagania techniczne stawiane materiałom konstrukcyjnym oraz spełnia kryteria ekonomiczne. Te względy między innymi były przyczyną podjęcia w Instytucie Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej badań stopów żelaza z węglem, zawierających chrom i aluminium jako podstawowe pierwiastki stopowe [1, 2, 3, 4]. Ponadto za celowością prowadzenia badań tych stopów przemawiał fakt ogólnej dostępności w warunkach

krajowych chromu i aluminium oraz ich niska cena w stosunku do innych pierwiastków stopowych, wpływających istotnie na podwyższenie odporności na utlenianie stopów Fe-C.

Interesujące wyniki badań właściwości odlewniczych i odporności na utlenianie w różnych warunkach skłoniły do podjęcia dalszych badań właściwości stopów Fe-C-Cr-Al.

Przebieg realizacji tych badań oraz podstawowe ich wyniki przedstawiono w niniejszym artykule.

2. Cel, zakres i założenia do badań

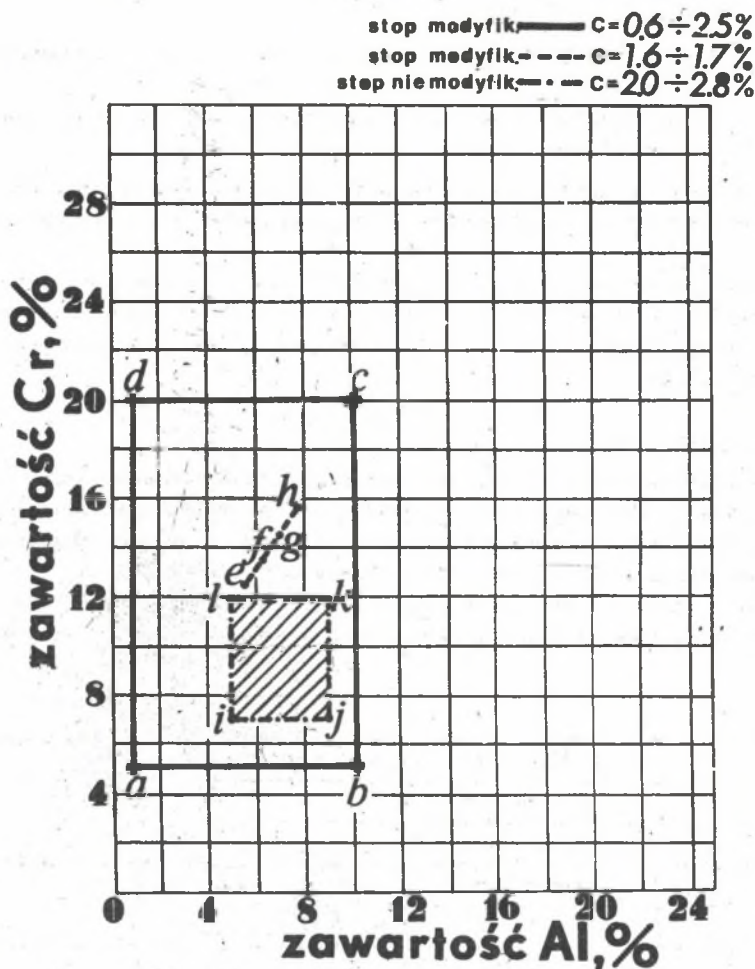
Podstawowym celem badań własnych było opracowanie nowych, niedeficytowych, odlewniczych i wysokożaroodpornych stopów żelaza o zwiększonej zawartości węgla, zawierających jako podstawowe pierwiastki stopowe chrom i aluminium.

Obok powyższego celu realizowano również cel poznawczy polegający na określeniu kinetyki utleniania niemodyfikowanych stopów Fe-C-Cr-Al.

Zakres badań obejmował: wybór obszaru badań, wybór metody planowania eksperymentu, przeprowadzenie wytopów zgodnie z planem eksperymentu, badania podstawowych właściwości odlewniczych (lejności i skurczu), badania żaroodporności (termograwimetryczne, izotermiczne nieciągłe i w warunkach cyklicznych zmian temperatury), badania struktury (metalograficzne, na mikroskopie skaningowym, na dyfraktometrze rentgenowskim) zarówno po odlaniu, jak i po badaniach żaroodporności oraz określenie wpływu poszczególnych czynników zmienności.

Podstawową tezę przyjętą w badaniach określającą dużą żaroodporność wysokowęglowych stopów Fe-C-Cr-Al ustalono w oparciu o bardzo dużą odporność na utlenianie niskowęglowych stopów Fe-C-Cr-Al [10, 14, 15, 16, 17] oraz o wyniki wcześniejszych badań własnych [1-5]. Postanowiono, że stopy nie będą poddawane procesowi modyfikacji. Na podstawie najnowszych danych literaturowych podających informacje na temat wpływu Cr i Al na własności żaroodporne stopów Fe [10, 25, 26], jak również na podstawie wstępnego założenia maksymalnej temperatury pracy stopów równej ok. 1000°C dokonano wyboru zakresu zawartości poszczególnych pierwiastków stopowych. Zakres ten przedstawiał się następująco: zawartość aluminium - 5-9%, chromu - 7-12%, węgla - 2-2,8%. Zawartość manganu i krzemu ustalono na stałym poziomie; 1% Mn, 2,2% Si.

W stosunku do optymalnego składu modyfikowanego stopu Fe-C-Cr-Al [3] postanowiono zwiększyć zawartość węgla z 1,6% do 2,0-2,8%, gdyż pierwiastek ten bardzo korzystnie wpływa na poprawę właściwości odlewniczych [6, 8, 12]. Zawartość krzemu zmniejszono w stosunku do składu optymalnego z poziomu 3,8% do 2,2%, gdyż zwiększona zawartość krzemu (pow. 3%) wpływa znacznie na powiększenie kruchości stopów Fe-C-Cr-Al.



Rys. 1. Obszar badań (pole zakreskowane)

Fig. 1. Tests area (marked field)

Na rys. 1 w układzie współrzędnych zawartości Cr i Al przedstawiono obszar badań przyjęty w badaniach własnych oraz obszary dotychczas przebadane [1, 2, 3].

Założono, iż badane właściwości (lejnosc, skurcz, odpornosc na utlenianie) przy zachowaniu stałej technologii wytwarzania są w dużym przybliżeniu funkcją składu chemicznego. Założono więc, że charakterystykę rozważanego obiektu (stop Fe-C-Cr-Al) można opisać wzorem:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, z),$$

(1)

gdzie:

- y - wartości wynikowe (lejność, skurcz, odporność na utlenianie),
 x_1, x_2, x_3 - wartości wejściowe, tj. odpowiednio: zawartość aluminium, chromu i węgla.

Funkcję tę można z wystarczającą dla wykorzystania praktycznego dokładnością aproksymować stosując liniową funkcję regresji w postaci standaryzowanej [20÷22].

Otrzymane wartości współczynników funkcji w układzie standaryzowanym mogą stanowić podstawę do wnioskowania o kierunku i sile wpływu poszczególnych cech objaśniających na cechy objaśniane, a więc stanowić podstawę do dalszej optymalizacji.

Materiał do badań

Uwzględniając wnioski wypływające z analizy danych literaturowych, dotyczących metod planowania eksperymentu [20÷23], w badaniach własnych postanowiono wykorzystać macierz planowania opartą na planie dwupoziomowym o krotności powtórzenia równej jeden (plan połówkowy).

Zaplanowany zgodnie z przyjętym planem eksperymentu skład chemiczny oraz rzeczywisty skład chemiczny uzyskanych stopów przedstawiono w tabelicy 1.

Tablica 1

Skład chemiczny, temperatura odlewania i likwidus oraz wyniki badań lejności i skurczu niemodyfikowanych stopów Fe-C-Cr-Al

Rodzaj stopu	Skład chemiczny ‰					Temp. odlewania °C	Temp. likwidus °C	Lejność cm	Skurcz ‰
	planowany								
	rzeczywisty								
	Al	Cr	C	Mn	Si				
1	$x_1^0 \pm \Delta x_1 = 9$ 9,38	$x_2^0 \pm \Delta x_2 = 7$ 7,12	$x_3^0 \pm \Delta x_3 = 2$ 1,88	1 0,84	2,2 1,97	1470	1392	35	1,67
2	$x_1^0 \pm \Delta x_1 = 5$ 4,95	$x_2^0 + \Delta x_2 = 12$ 12,8	$x_3^0 \pm \Delta x_3 = 2$ 1,82	1 1,19	2,2 2,02	1465	1369	30	1,50
3	$x_1^0 \pm \Delta x_1 = 5$ 4,76	$x_2^0 \pm \Delta x_2 = 7$ 6,57	$x_3^0 \pm \Delta x_3 = 2,8$ 2,98	1 1,07	2,2 2,26	1330	1224	62,5	1,23
4	$x_1^0 \pm \Delta x_1 = 9$ 8,76	$x_3^0 \pm \Delta x_3 = 12$ 11,42	$x_3^0 \pm \Delta x_3 = 2,8$ 2,76	1 0,92	2,2 2,29	1340	1235	55	1,31

Wytopy wykonano w elektrycznym piecu indukcyjnym bezrdzeniowym IM SK-50A o częstotliwości 8 kHz. W celu zapewnienia stałości technologii wytwarzania stopów, wszystkie formy dla każdego z wytopów wykonano z tej samej masy formierskiej oraz starano się zapewnić jednakowy w przybliżeniu stopień przegrzania wszystkich stopów, wynoszący ok. 100 K (tabl. 1).

Z każdego stopu odlewano: próbki do wyznaczenia przebiegu krzepnięcia za pomocą termicznej analizy różniczkowej, próbki do analizy składu chemicznego, pręty skurczowe, spirale do określenia lejności oraz próbki do badań żaroodporności.

Metodyka badań

Wszystkie uzyskane stopy poddano badaniom podstawowych właściwości odlewniczych, badaniom struktury oraz żaroodporności.

Badania podstawowych właściwości odlewniczych obejmowały oznaczenie lejności przeprowadzane zgodnie z normą PN-61/H-04677 oraz skurczu odlewniczego niehamowanego. Z każdego wytopu odlewano 2 spirale do określenia lejności oraz 3 pręty zaopatrzone po obu końcach w ostro zakończone stożkowe nadlewy. Skurcz S_o obliczano wg wzoru:

$$S_o = \frac{l_o - l_1}{l_o} \times 100\%, \quad (2)$$

gdzie:

l_o - długość modelu pręta,

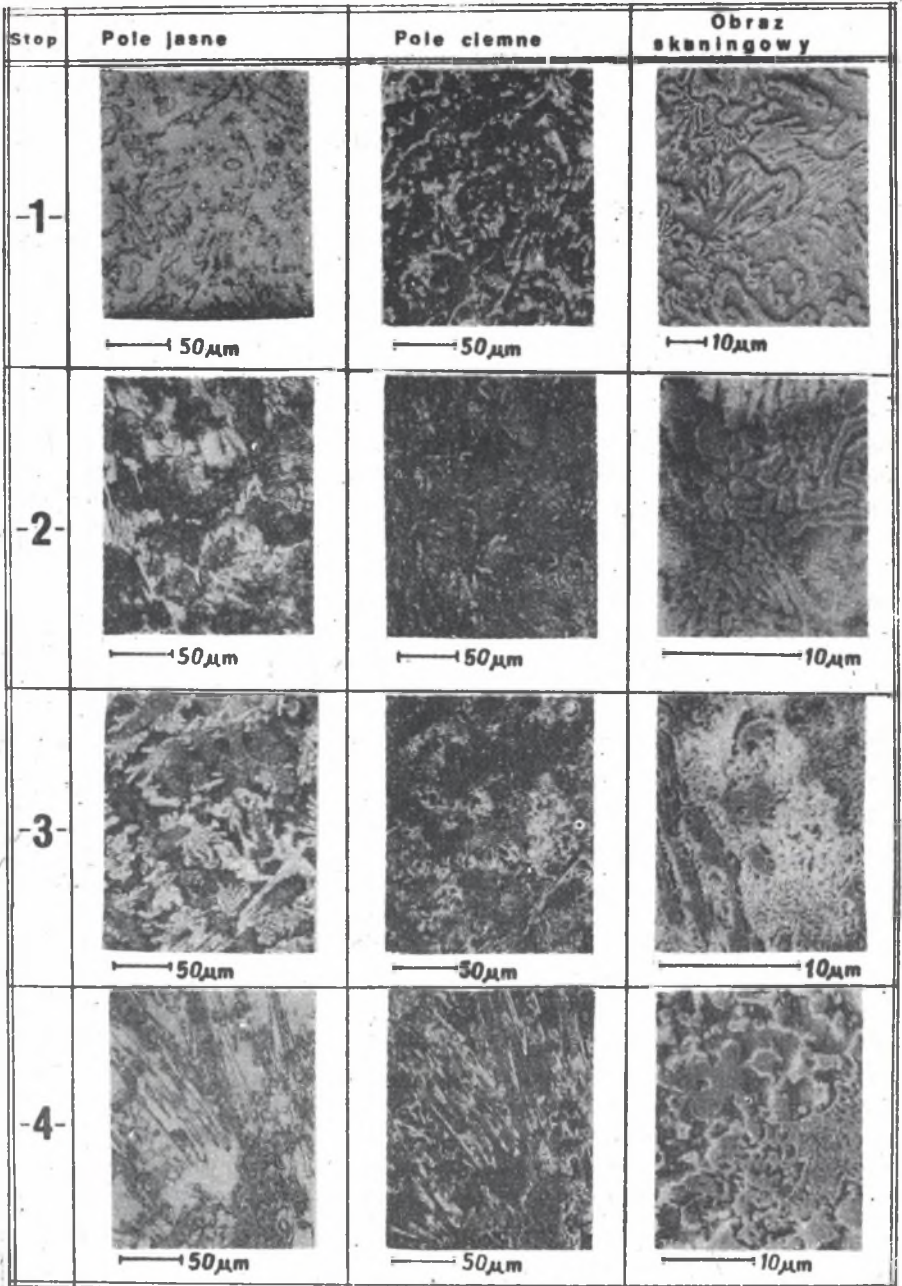
l_1 - długość odlewu pręta.

Badania struktury obejmowały: badania metalograficzne na mikroskopie świetlnym MeF-2 firmy Reichert, badania na mikroskopie skaningowym JSN-51 firmy JEOL oraz rentgenowską analizę fazową na dyfraktometrze rentgenowskim JDS-75 firmy JEOL. Stopy do badań metalograficznych trawiono w odczynniku składającym się z 3 cz. HF, 2 cz. HNO₃ i 5 cz. H₂O.

Badaniom struktury poddano zarówno stopy po odlaniu, jak i po badaniach żaroodporności określając skład fazowy osnowy metalowej oraz zgorzeliń powstałych na tych stopach.

Ze względu na dużą złożoność zjawisk zachodzących w czasie wysokotemperaturowego utleniania tworzyw metalowych w badaniach własnych w celu jednoznacznej oceny odporności na utlenianie badanych stopów zastosowano połączenie kilku metod pomiarowych, a mianowicie: badania termograwimetryczne, badania izotermiczne nieciągle i badania w warunkach cyklicznych zmian temperatury.

Badania termograwimetryczne przeprowadzono w temperaturze 1100°C przez 6 h, stosując termowagę firmy "Setaram". Użyto próbek w kształcie dysku o wysokości ok. 3 mm i średnicy ok. 11 mm. Próbki nagrzewano do temperatury badań w próżni, a następnie w atmosferze złożonej z 5% tlenu i 95% helu.



Rys. 2. Struktura stopów Fe-C-Cr-Al po odlaniu. Forma piaskowa - próbka \square 10 mm. Oznaczenia stopów wg tablicy 1

Fig. 2. Structure of the Fe-C-Cr+Al alloys after casting. Dry-sand mold-sample - 10 mm. Marking of the alloys according to table 1

Badania izotermiczne nieciągłe polegały na 100-godzinym wyżarzaniu w atmosferze utleniającej szeregu próbek w stałej temperaturze. W badaniach tych użyto próbki odlane na gotowo i oszlifowane o wymiarach 10 x 10 x 20 mm. Po upływie: 10, 25, 50, 75 i 100 h wyjmowano z pieca po 3 próbki z każdego badanego stopu i ważono je w temperaturze otoczenia wraz z odprysniętą zgorzeliną. Badania izotermiczne nieciągłe prowadzono w temperaturze 1000°C i 1100°C.

Pomiar żaroodporności w warunkach cyklicznych zmian temperatury przeprowadzono w oparciu o metodę zaproponowaną przez E. Kaliszewskiego i S. Mrowca [24]. Metoda ta pozwala na określenie stopnia żaroodporności tworzyw metalowych w warunkach cyklicznych zmian temperatury na podstawie ilości odprysniętej zgorzeliny, co pozwala uniknąć kłopotliwego usuwania pozostałości zgorzeliny, a przez to popełnienia znacznych błędów pomiarowych. Próbki o wymiarach 10 x 10 x 70 mm po 2 sztuki z każdego badanego stopu wyżarzano w temperaturze 900°C i 1000°C w atmosferze utleniającej, stosując dwadzieścia cztery 5-godzinowe cykle grzania i następnego chłodzenia na powietrzu.

Wyniki badań i ich analiza

B a d a n i a l e j n o ś c i i s k u r c z u

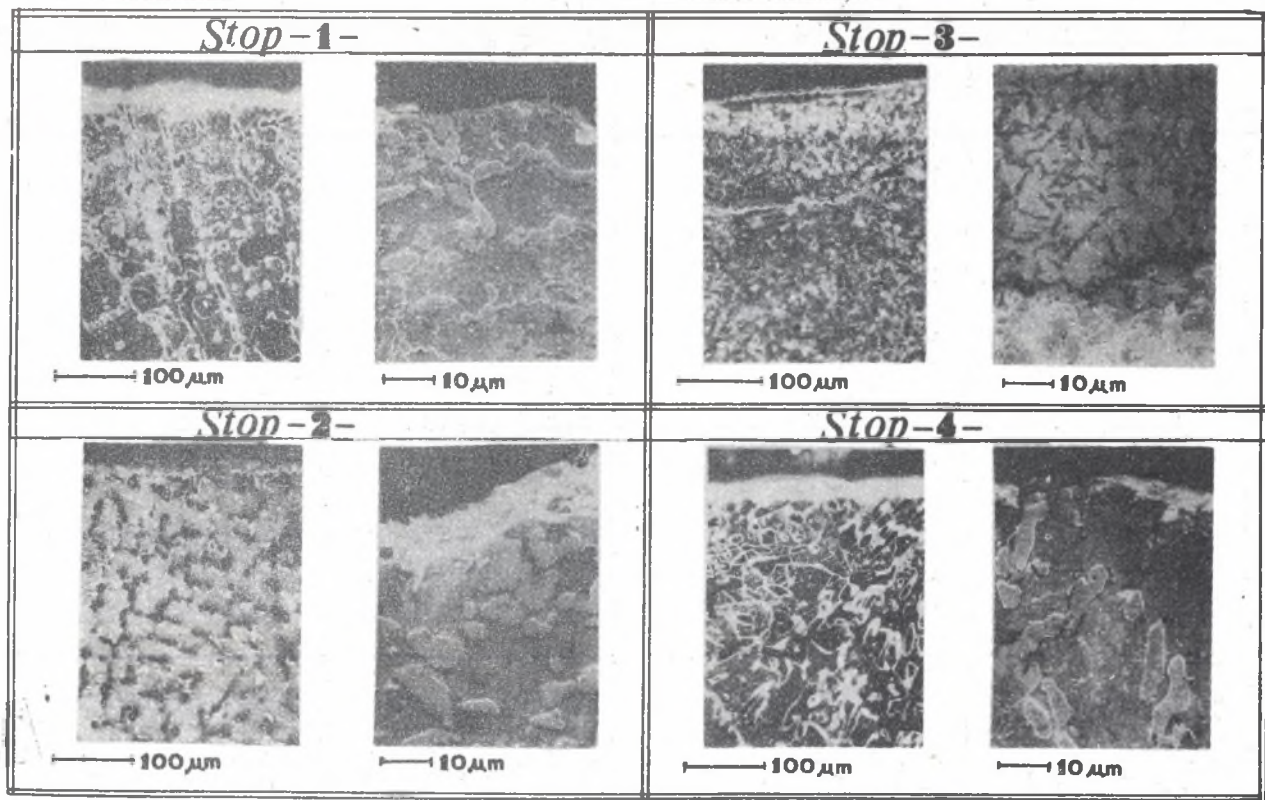
Wyniki pomiarów lejności i skurczu odlewniczego stopów Fe-C-Cr-Al przedstawiono w tablicy 1, w której podano również wartości temperatury odlewania i temperatury likwidus tych stopów. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że wszystkie badane stopy charakteryzują się średnimi wartościami skurczu. Stopy o większej zawartości węgla (stopy 3 i 4) charakteryzowały się ponadto dobrą lejnością. Stopy te mogą być zatem wykorzystane przy wykonywaniu nawet skomplikowanych odlewów.

B a d a n i a s t r u k t u r y

Biorąc pod uwagę wyniki badań metalograficznych na mikroskopie świetlnym, na mikroskopie skaningowym (rys. 2) oraz wyniki badań uzyskane przy zastosowaniu dyfraktometru rentgenowskiego, stwierdzono, że struktura stopów Fe-C-Cr-Al po odlaniu składa się z ferrytu stopowego oraz z wydzielen węgla typu $(Cr,Fe)_7C_3$. W strukturze stopów 2, 3, 4 stwierdzono ponadto obecność węgla typu $(Cr,Fe)_3C$.

Po badaniach żaroodporności nie stwierdzono w strukturze stopów istotnych zmian (rys. 3), niewielkiemu powiększeniu uległy jedynie wydzielenia węglików chromu.

Stwierdzono, że zgorzelina (warstwa nalotowa) powstająca na stopie 2 składa się prawie wyłącznie z $\alpha-Al_2O_3$, natomiast w skład zgorzeliny powstałej na stopach 1 i 4 obok tego związku wchodzi jeszcze Cr_2O_3 i spinel $FeO \cdot Al_2O_3$.



Rys. 3. Struktura stopów Fe-C-Cr-Al po badaniach żarodporności w warunkach cyklicznych zmian temperatury. Oznaczenia stopów wg tablicy 1. Pole ciemne i obraz skaningowy

Fig. 3. Structure of the Fe-C-Cr-Al alloys after the heat resistance investigations by cycle changes of the temperature. Dark field and scanning image

W przypadku stopu 3 w zgorzelinie stwierdzono obecność tlenków żelaza: FeO , Fe_2O_3 i Fe_3O_4 . Ten typ zgorzeliiny w odróżnieniu od zgorzeliiny powstałych na stopach 1, 2 i 4 nie zapewnia odpowiedniej ochrony rdzenia metalowego przed intensywnym utlenianiem w wysokich temperaturach.

B a d a n i a ż a r o o d p o r n o ś c i

a. Badania termogravimetryczne

W wyniku badań termogravimetrycznych uzyskano zarejestrowane na taśmie rejestratora wyniki zmian masy utlenianej próbki w zależności od czasu badań.

Po obliczeniu jednostkowych zmian masy próbek ($\frac{\Delta m}{S}$) i wyznaczeniu zależności $\frac{\Delta m}{S} = f(t)$ stwierdzono, że zależności te dla stopów 1, 2 i 4 mają charakter odpowiadający funkcji parabolicznej, a dla stopu 3 charakter odpowiadający funkcji liniowej.

Na podstawie empirycznych wyników jednostkowych zmian masy w zależności od czasu utleniania dokonano oszacowania parametrów modelu liniowej ($\frac{\Delta m}{S} = a + bt$), parabolicznej ($\frac{\Delta m}{S} = a + b\sqrt{t}$) i parabolicznej ($\frac{\Delta m}{S} = a + b\sqrt{t} + ct$) funkcji regresji metodą najmniejszych sumy kwadratów [23]. W wyniku obliczeń stwierdzono, że najbardziej zbliżonymi do jedności współczynnikami korelacji dla stopu 3 charakteryzował się liniowy model kinetyki utleniania, natomiast dla wszystkich pozostałych stopów paraboliczny model kinetyki utleniania. Uzyskane modele funkcji opisującej kinetykę utleniania pozwoliły na wykreślenie zależności obrazującej jednostkowe przyrosty masy w funkcji czasu utleniania.

W oparciu o otrzymane krzywe kinetyki utleniania stwierdzono, że charakter przebiegu procesu utleniania stopów 1, 2 i 4 jest analogiczny, w miarę upływu czasu szybkość tego procesu maleje. Wskazuje to na fakt, iż elementarnym procesem cząstkowym determinującym szybkość utleniania jest proces dyfuzji reagentów przez powstałą warstwę stałych produktów utleniania. W przypadku tych stopów nie stwierdzono więc efektów "przebiccia zgorzeliiny" [10, 11]. Jak wykazały badania strukturalne, zgorzeliina utworzona na tych stopach była ciągła, zwarta i bardzo dobrze przylegała do powierzchni rdzenia metalowego. Odmiennym charakterem kinetyki utleniania w stosunku do stopów 1, 2 i 4 charakteryzował się stop 3. Kinetyka utleniania miała przebieg najbardziej zbliżony do funkcji liniowej. Można więc stwierdzić (co potwierdziły wyniki badań strukturalnych), że na stopie tym nie tworzy się zgorzeliina, która w dostateczny sposób chroniłaby osnowę metalową przed ciągłym intensywnym utlenianiem. Zgorzeliina utworzona na tym stopie słabo przylegała do powierzchni rdzenia metalowego i charakteryzowała się dużą nieciągłością. Sądzić należy, że przyczyną małej żaroodporności stopu 3 jest zawartość chromu i aluminium mniejsza od ich wartości "krytycznych" (granicznych) [11], powyżej których tworzą się tlenki Cr_2O_3 i Al_2O_3 lub związki typu spineli oraz duża zawartość węgla ($C = \text{ok. } 2,8\%$).

b. Badania izotermiczne nieciągłe

W oparciu o obliczone wartości jednostkowego przyrostu masy badanych stopów po 10, 25, 50, 70 i 100 h utleniania wykonano graficzne wykresy zależności jednostkowego przyrostu masy w funkcji czasu utleniania. Charakter uzyskanych krzywych dla wszystkich badanych stopów pozwolił stwierdzić, że odpowiadają one najbardziej funkcji parabolicznej. W celu potwierdzenia słuszności tego stwierdzenia zastosowano metodę Levisa [19] oraz metodę analizy regresji [23]. W metodzie analizy regresji zastosowano modele funkcji liniowej, potęgowej, parabolicznej i parabolicznej. Obie metody potwierdziły wniosek o parabolicznym przebiegu kinetyki utleniania wszystkich badanych stopów Fe-C-Cr-Al.

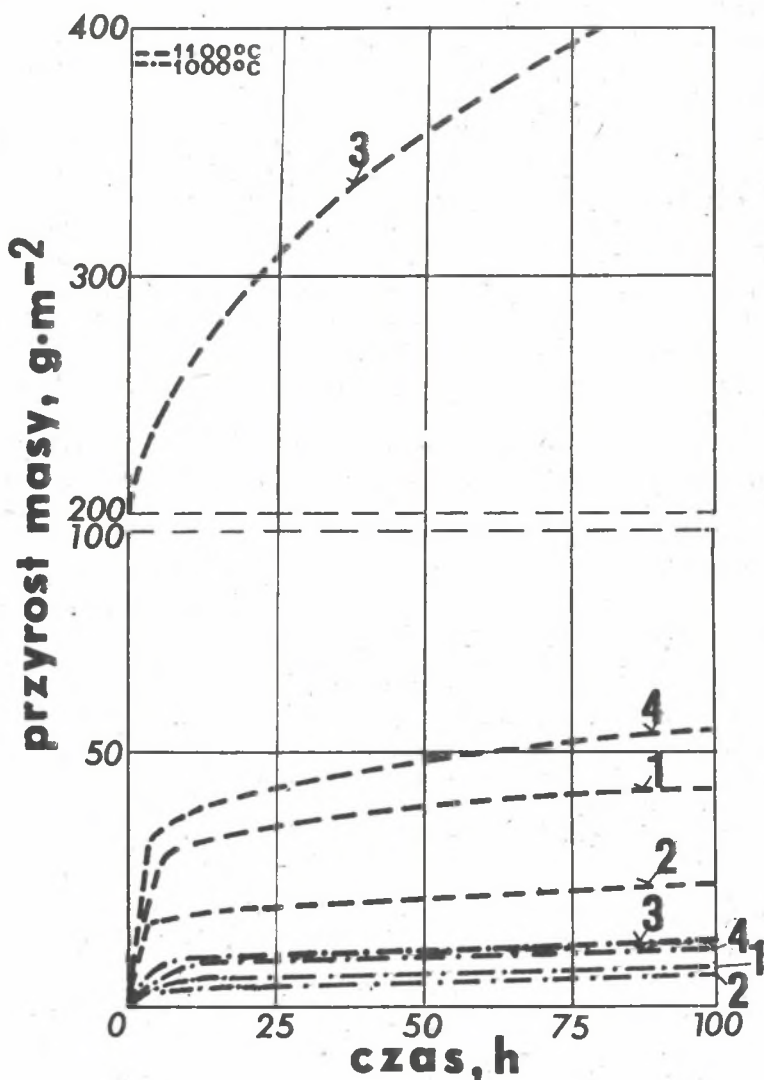
Uzyskane modele parabolicznych funkcji kinetyki utleniania pozwoliły na przedstawienie ich w formie zależności jednostkowego przyrostu masy od czasu utleniania (rys. 4). Z zależności tych wynika, że szybkość procesu utleniania w miarę upływu czasu maleje. Elementarnym procesem cząstkowym wpływającym najistotniej na tę szybkość jest więc dyfuzja reagentów przez powstałą zgorzelinę. Fakt parabolicznego przebiegu kinetyki procesu utleniania jest zrozumiały, gdy uwzględnimy fakt, iż w skład zgorzeliny wchodzi tlenek chromu (CrO_3) wykazujący znaczną lotność w temperaturze ponad 900°C [10, 19].

Z wykresów zależności jednostkowych zmian masy stopów Fe-C-Cr-Al (rys. 4) wynika, że największą odpornością na utlenianie zarówno w temp. 1000°C , jak i w temp. 1100°C charakteryzuje się stop 2. Uzyskana dla tego stopu w temp. 1000°C wartość przyrostu masy po 100 h utleniania wynosząca około 4 g/m^2 stawia ten stop w gronie stopów o bardzo wysokich właściwościach żaroodpornych. Również pozostałe stopy (1, 2 i 4) charakteryzują się w temp. 1000°C dobrą odpornością na utlenianie (jednostkowy przyrost masy po 100 h utleniania był mniejszy od 12 g/m^2).

Najniższą żaroodpornością w temp. 1100°C charakteryzował się stop 3. W skład tworzącej się na jego powierzchni zgorzeliny wchodziły tlenki żelaza. Zgorzelina taka nie zapewnia ciągłej ochrony rdzenia metalowego przed intensywnym utlenianiem. Porównując otrzymane wartości parabolicznych stałych szybkości narastania zgorzeliny k_p (współczynnik "b" we wzorze regresyjnym) oraz wartości liniowych stałych szybkości parowania zgorzeliny a (współczynnik "c" we wzorze regresyjnym) badanych stopów Fe-C-Cr-Al z podobnymi wartościami uzyskanymi dla stopów N50H18S oraz Nikrothal 80 [19] można stwierdzić, że stopy 1, 2 i 4 charakteryzują się bardzo wysoką żaroodpornością w temp. 1100°C (rys. 4).

c. Badania w warunkach cyklicznej zmiany temperatury

W oparciu o pomiar masy próbek po kolejnych cyklach utleniania (bez odprysniętej zgorzeliny) obliczono wartości jednostkowej zmiany masy i wykonano wykresy zależności zmian masy od liczby pięciogodzinnych cykli utle-



Rys. 4. Wyniki zmian masy stopów Fe-C-Cr-Al w badaniach grawimetrycznych nieciągłych. Oznaczenia krzywych - wg tablicy 1

Fig. 4. Results of the mass change of the Fe-C-Cr-Al alloys in after the gravimetric noncontinuous investigations. Marking of the curves according to table 1

niania w temp. 900°C i 1000°C i chłodzenia na powietrzu. Na podstawie tych zależności stwierdzono, że w temp. 900°C wszystkie badane stopy Fe-C-Cr-Al charakteryzowały się bardzo dobrą przyczepnością zgorzeliny do podłoża rdzenia metalowego. Zaobserwowano jedynie niewielki przyrost masy (lub ubytek w przypadku stopu 1) w początkowych cyklach utleniania i praktycznie nie zmieniającą się masę w czasie dalszych cykli.

Stwierdzony końcowy przyrost masy mniejszy od 7 g/m^2 po zakończeniu procesu cyklicznego utleniania w temp. 900°C stawia te stopy w gronie stopów charakteryzujących się bardzo dużą przyczepnością zgorzeliny do podłoża i bardzo dużą żaroodpornością w warunkach cyklicznych zmian temperatury.

Analizując wykres zmian zależności jednostkowej zmiany masy próbek ze stopów Fe-C-Cr-Al, utlenianych w temp. 1000°C od ilości cykli utleniania stwierdzono, że dużą żaroodpornością i dobrą przyczepnością zgorzeliny do podłoża rdzenia metalowego charakteryzują się stopy 1, 2 i 4 (rys. 3).

Krzywa charakteryzująca stop 3 wskazuje, że jest to stop charakteryzujący się złą przyczepnością zgorzeliny do podłoża metalowego w warunkach cyklicznych zmian temperatury 1000°C. W trakcie pierwszych cykli wskutek gwałtownego utleniania następuje dość znaczny przyrost masy. Po odprysnięciu powstałej zgorzeliny, co objawia się gwałtownym spadkiem masy próbki, następuje odpadanie kolejnych warstw zgorzeliny i po zakończeniu procesu cyklicznego utleniania sumaryczny ubytek masy jest znaczny. W przypadku stopu 3 ubytek ten wynosił około 110 g/m^2 .

O s z a c o w a n i e w s p ó ł c z y n n i k ó w f u n k c j i r e g r e s j i

Oszacowania współczynników funkcji regresji w układzie standaryzowanym dokonano na minikomputerze HP9110 firmy Packard.

Wartość dodatnia danego współczynnika funkcji regresji w układzie standaryzowanym (k_s) daje informacje, że zwiększenie wartości danego czynnika wejścia ponad poziom centralny (podstawowy) wpłynie na powiększenie analizowanej wartości czynnika wyjścia.

Wartości bezwzględne współczynników k_s dają informację o sile oddziaływania danego czynnika wejścia, przy którym stoja i można je bezpośrednio porównywać ze sobą.

Jako cechy wynikowe (czynniki wyjścia) przyjęto: długość zalanej spirali lejności (cm), wartość skurczu odlewniczego (%), jednostkowy przyrost masy po 100 h badań izotermicznych i po 6 h badań termograwimetrycznych (g/m^2).

Analizując obliczone wartości współczynników funkcji regresji w układzie standaryzowanym (tabl. 2), można stwierdzić, że najistotniej w kierunku zwiększenia lejności i zmniejszenia skurczu oddziałuje węgiel. Węgiel wpływa jednak również bardzo istotnie na zmniejszenie żaroodporności.

Oddziaływanie chromu i aluminium na lejność i skurcz jest o wiele słabsze od oddziaływania węgla na te właściwości i oddziaływanie to można pominąć. Pierwiastki te jednak istotnie wpływają na zwiększenie żaroodporności,

Tablica 2

Wyniki oszacowania współczynników funkcji regresji
w układzie standaryzowanym

	Badana właściwość				
	Lejność cm	Skurcz %	$\frac{\Delta m}{s}(100h, 1000^{\circ}C)$	$\frac{\Delta m}{s}(100h, 1100^{\circ}C)$	$\frac{\Delta m}{s}(6h, 1100^{\circ}C)$
k_1 (Al)	-0,625	0,062	-0,225	-95,65	-44,177
k_2 (Cr)	-3,125	-0,022	-0,925	-100,7	-47,707
k_3 (C)	13,125	-0,157	3,02	103,25	47,92
k_0	45,62	1,427	8,375	120,4	58,892

przy czym wpływ chromu jest nieznacznie większy od wpływu aluminium (w przyjętym obszarze zawartości tych pierwiastków).

W dalszych badaniach dotyczących optymalizacji składu chemicznego niemodyfikowanych stopów Fe-C-Cr-Al należy wystartować z poziomu centralnego zmniejszając w kolejnych doświadczeniach zawartość węgla oraz zwiększając zawartość chromu, i aluminium, pozostawiając natomiast na poziomie odpowiadającym wartości poziomu centralnego.

Wartość "kroków roboczych" można obliczyć posługując się metodą "ścieżki największego wzrostu" podaną przez W. Volka [27].

Wnioski

W oparciu o wyniki badań własnych można sformułować następujące wnioski:

1. Badane, niemodyfikowane, chromowo-aluminiowe stopy o zwiększonej zawartości węgla charakteryzują się średnią lejnością i średnimi wartościami skurczu odlewniczego.

2. Analiza statystyczna wyników badań podstawowych właściwości odlewniczych pozwoliła stwierdzić, iż najistotniej w kierunku zwiększenia lejności i zmniejszenia skurczu będzie oddziaływać zwiększenie zawartości węgla ponad poziom podstawowy. Oddziaływanie zawartości chromu i aluminium na te właściwości można pominąć.

3. Stwierdzono, że badane stopy 1, 2 i 4 charakteryzują się bardzo dużą żaroodpornością zarówno w stałej temperaturze (do 1100°C), jak i w warunkach cyklicznych zmian temperatury (do 1000°C). Duża żaroodporność tych stopów może być tłumaczona faktem powstawania na powierzchni tych stopów dobrze przylegającej do rdzenia metalowego ochronnej warstwy zgorzeli, z

zbudowanej - w zależności od rodzaju stopu - z $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, Cr_2O_3 lub $\text{FeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ oraz trwałej, nieulegającej przemianom strukturalnym osnowie metalowej złożonej z ferrytu stopowego z wydzieleniami węgla chromu. Stwierdzono, że kinetyka utleniania tych stopów ma charakter najbardziej zbliżony do przebiegu paralinowego.

4. Analiza statystyczna wyników badań żaroodporności pozwoliła stwierdzić, że istotnie w kierunku zwiększenia odporności na utlenianie oddziałuje zmniejszenie zawartości węgla oraz zwiększenie zawartości chromu, a w mniejszym stopniu aluminium w stosunku do poziomu centralnego.

LITERATURA

- [1] Szymaszal J.: Praca doktorska. Katowice 1982. Wydział Metalurgiczny Politechniki Śląskiej.
- [2] Szymaszal J. i inni: Wpływ składu chemicznego chromowo-aluminiowych stopów żelaza o podwyższonej zawartości węgla na żaroodporność i własności odlewnicze. Inżynieria Materiałowa, 1983, nr 2, s. 41.
- [3] Szymaszal J. i inni: Optymalizacja składu chemicznego chromowo-aluminiowych stopów żelaza o podwyższonej zawartości węgla pod względem żaroodporności i własności odlewniczych. Inżynieria Materiałowa, 1983, nr 4, s. 102.
- [4] Sprawozdanie z pracy badawczej 9/82 w ramach Problemu Międzyresortowego I-22, Politechnika Śląska, Instytut Inżynierii Materiałowej, Katowice 1982.
- [5] Szymaszal J., Krzemień E., Maliński M.: Żaroodporne chromowo-aluminiowe stopy żelaza o zwiększonej zawartości węgla. Prz. Odlewn. 1984, nr 4, s. 80.
- [6] Kosowski A., Podrzucki C.: Żeliwo stopowe. Wyd. 2. Skrypt AGH nr 825, Kraków 1981.
- [7] Bobro J.G.: Legirowanyje cuguny. Metalurgija, Moskwa 1976.
- [8] Podrzucki C., Kalata C.: Metalurgia i odlewnictwo żeliwa. Wyd. 2. Wydawnictwo "Śląsk". Katowice 1976.
- [9] Bobro J.G.: Aluminiowyje cuguny. Izd. Ch.G.U. Charkow 1964.
- [10] Mrowec S., Werber T.: Nowoczesne materiały żaroodporne. WNT, Warszawa 1982.
- [11] Mrowec S., Werber T.: Korozja gazowa metali. Wydawnictwo "Śląsk". Katowice 1977.
- [12] Gierek A., Bajka L.: Żeliwo stopowe jako tworzywo konstrukcyjne. Wydawnictwo "Śląsk", Katowice 1976.
- [13] Aleksandrow M.N., Kłoczniw N.J.: Technologieja połucenija i swojstwa żarostojkich spławow. Izd. "Maszynostrojenije", Moskwa 1964.
- [14] Bryniarska J. i inni: Wysokożaroodporne stopy żelazo-aluminiowo-chromowe. Prz. Odlewn. 1974, nr 1, s. 2.
- [15] Beketow B.J., Maksimow: O wlijanii chroma i aluminja na żarostojkost. Zascita Metalłow 1977, t. 13 nr 5, s. 587.
- [16] Stott F.H., Golightly F.A., Wood G.C.: The influence of Thermal Cycling on the Oxidation Behaviour of Fe-Cr-Al and Fe-Cr-Al-Y Alloys at 1200°C. Corrosion Science 1979 t. 19, s. 889.
- [17] Stott F.H., Wood G.C., Golightly F.A.: The Isothermal Oxidation Behaviour of Fe-Cr-Al and Fe-Cr-Al-Y Alloys at 1200°C. Corrosion Science T. 19. 1979 s. 869.

- [18] Riabczenkow A. i inni: Wlijanije ugleroda na zarostojkost, fazowij so-
staw i mechanicskije swojstwa stali. Zascita Mietałłow T. 9, 1973,
nr 2, s. 27.
- [19] Kaczor J. i inni: Badania kinetyki utleniania w warunkach izotermicz-
nych wytopów gatunku N50H18S. Ochrona przed korozją 1978, nr 7, s. 171.
- [20] Manczak K.: Technika planowania eksperymentu. WNT, Warszawa 1979.
- [21] Mańczak K.: Metody identyfikacji wielowymiarowych obiektów sterowania.
WNT, Warszawa 1979.
- [22] Kacprzyński B.: Planowanie eksperymentu. WNT, Warszawa 1974.
- [23] Greń J.: Statystyka matematyczna - modele i zadania. PWN, Warszawa
1982.
- [24] Kaliszewski E., Mrowec S.: Nowa metoda określania żaroodporności two-
rzyw metalicznych. Arch. Hutn. T. VIII, 1973, z. 3, s. 274.
- [25] Wozdwiżenskij W.M. i inni: Wlijanije procesa obezuglerozhivaniya na
zarostojkost chromoaluminiewo cuguna. Litiejn. Proizw. 1981, nr 3, s. 6.
- [26] Wozdwiżenskij W.M. i inni: Puti ulucseniya struktury i mechanicskich
swojstw żarostojkich chromoaluminiewych cugunnow. Litiejn. Proizw.
1982, nr 5, s. 3.
- [27] Volk W.: Statystyka stosowana dla inżynierów. WNT, Warszawa 1973.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Czesław Podrzucki

Wpłynęło do Redakcji: 1.06.1985 r.

ВЫСОКОЖАРОСТОЙКИЕ НЕМОДЕФИЦИРОВАННЫЕ ХРОМОАЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ ЖЕЛЕЗА
С УВЕЛИЧЕННЫМ КОЛИЧЕСТВОМ УГЛЯ

Р е з ю м е

В статье определено влияние химического состава на характеристики жаро-
стойкости и основные литейные свойства немодифицированных сплавов Fe-Cr-Al
(Si, Mn) с увеличенным количеством угля. Представлены результаты исследо-
ваний жидкотекучести, усадки и стойкости перед окислением при циклических
изменениях температуры и в условиях изотермических. Приведены также иссле-
дования структуры сплавов перед исследованиями жаростойкости и после них.
В исследованиях использован метод планового эксперимента на базе двухуров-
невого планирования.

HIGH- HEAT - RESISTING, NONMODIFICATED, CHROMIUM-ALUMINIUM FERROUS ALLOYS
WITH THE INCREASED CONTENTS OF CARBON

S u m m a r y

The paper defines the influence of the chemical composition on heat resistance properties and the basic cast properties of the nonmodifyficated Fe-C-Cr-Al (Si,Mn) alloys with the increased contents of carbon.

The article also presents the results of the tests of the castability, shrinkage and oxidation resistance at the cyclic changes of temperature and in isothermal conditions.

The tests of the alloy structure before and after heat resistance investigations have also been carried out.

The investigations used the advantages of the factorial design.