48/15

Archives of Foundry,
Year 2005, Volume 5, № 15
Archiwum Odlewnictwa,
Rok 2005, Rocznik 5, Nr 15
PAN – Katowice PL ISSN 1642-5308

TEMPERATURY KRYSTALIZACJI ŻELIWA CHROMOWEGO W FUNKCJI SZYBKOŚCI STYGNIĘCIA ODLEWU

A. STUDNICKI[1]
Zakład Odlewnictwa
Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych
Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej
44-100 Gliwice ul. Towarowa 7

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono analizę charakterystycznych temperatur krystalizacji żeliwa chromowego w funkcji szybkości stygnięcia odlewu. Proces odlewania przeprowadzono na stanowisku (ATD-K3) do eksperymentalnego modelowania stygnięcia odlewów o różnych modułach krzepnięcia w formie odlewniczej.

Key words: chromium cast iron, cooling rate, crystallization

1. WPROWADZENIE

Kształtowanie struktury w tym szczególnie fazy węglikowej w żeliwie chromowym następuje głównie w procesie krzepnięcia odlewu. W stanie stałym mogą również zachodzić istotne zmiany w strukturze, szczególnie w osnowie żeliwa.

Podstawą interpretacji struktury wszystkich stopów są układy równowagi fazowej, które łączą w sobie przemiany fazowe począwszy od stanu ciekłego poprzez krzepnięcie, kończąc na przemianach w stanie stałym. Dla poprawnej interpretacji zmian zachodzących w strukturze żeliwa chromowego [1] podczas stygnięcia odlewu niezbędna jest analiza układu potrójnego Fe-C-Cr [2,3]. Należy jednak pamiętać o innych pierwiastkach w żeliwie, gdyż ich obecność w stopie oddziaływuje na strukturę. Czynnikiem równie istotnym dla powstającej w czasie krystalizacji struktury jest szybkość chłodzenia odlewu. W przypadku chłodzenia żeliwa chromowego w warunkach odbiegających od równowagowych, co jest właściwe praktyce odlewniczej austenit, przesyca się węglem i chromem, co może znacznie obniżyć temperaturę jego

[1] *dr inż., andrzej.studnicki@polsl.pl*

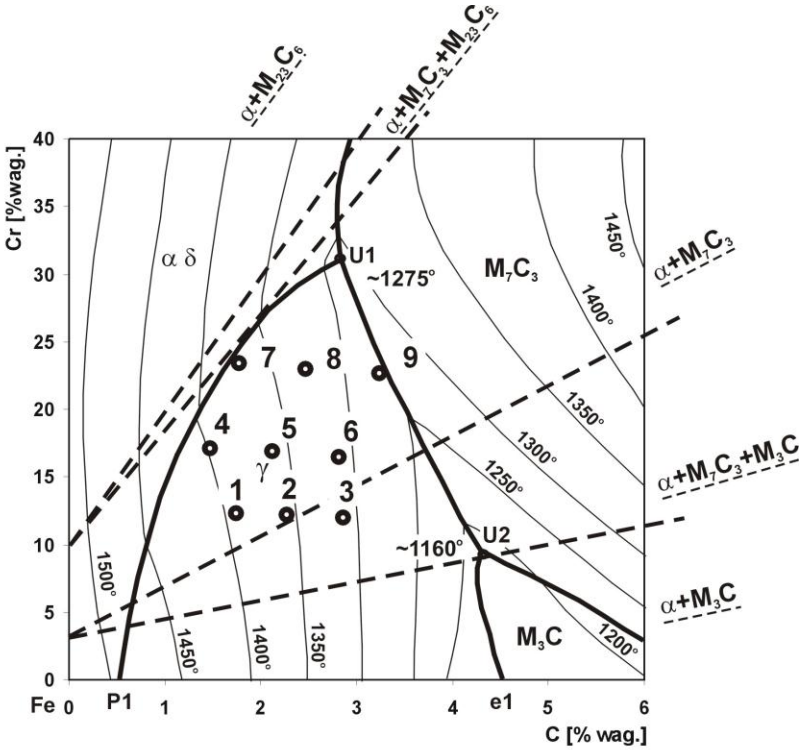
przemiany. Uzyskuje się wówczas w temperaturze pokojowej osnowę austenityczną lub austenityczno-perlityczną, a w przypadkach szczególnych nawet martenzytyczną.
W Zakładzie Odlewnictwa Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Politechniki Śląskiej prowadzone są badania wpływu szybkości stygnięcia odlewu na strukturę żeliwa chromowego odpornego na ścieranie. Do tych badań stosuje się metodę (ATD-K3 [4]) pozwalającą na ocenę wpływu wielkości odlewu na strukturę stopu.

2. CEL BADAŃ, MATERIAŁ I ICH PRZEBIEG

Celem pracy przedstawionej w niniejszym artykule było określenie wpływu szybkości stygnięcia odlewu w formie piaskowej na charakterystyczne temperatury przemian fazowych w stanie ciekło-stałym (krzepnięcie) i stałym do temperatury rejestrowanej podczas badań, czyli do 500 ^{o}C. Badania przeprowadzono na 9 wytopach żeliwa chromowego odpornego na ścieranie o składzie chemicznym przedstawionym w tabeli 1. Na rys.1 przedstawiono projekcje powierzchni likwidus układu równowagi Fe-C-Cr na tle wykresu strukturalnego żeliwa chromowego, na którym zaznaczono wykonane wytopy. Oprócz wytopu 9 (żeliwo eutektyczne), wszystkie badane żeliwa należy zaliczyć do stopów podeutektycznych. W żeliwie chromowych podeutektycznym najpierw z cieczy krystalizuje austenit a następnie eutektyka węglikowa.
Wytopy wykonano w Zakładzie Odlewnictwa Politechniki Śląskiej w piecu indukcyjnym o wyłożeniu obojętnym. Zestaw próbników ATD-K3 [4] zalewano przegrzanym ciekłym metalem i rejestrowano krzywe stygnięcia w odlewie modelowym przez około 3 godz., tj. do czasu osiągnięcia temperatury poniżej 500 ^{o}C w próbniku ϕ100 mm.

Tabela 1 Skład chemiczny badanego żeliwa chromowego
Table 1 Chemical composition of chromium cast iron

	oznaczenie wytopu	zawartość pierwiastków w % wag.						**Cr/C**
		C	**Cr**	P	S	Mn	Si	
1	1812	**1.75**	**11.65**	0.061	0.020	0.18	0.72	**6.66**
2	2412	**2.25**	**11.37**	0.059	0.020	0.17	0.86	**5.05**
3	3312	**2.92**	**10.79**	0.062	0.021	0.23	1.15	**3.70**
4	1818	**1.49**	**16.86**	0.033	0.023	0.20	0.45	**11.32**
5	2418	**2.09**	**16.48**	0.039	0.020	0.21	0.50	**7.89**
6	3318	**2.89**	**15.71**	0.036	0.019	0.32	1.47	**5.44**
7	1825	**1.95**	**23.28**	0.057	0.030	0.12	0.43	**11.94**
8	2425	**2.45**	**22.93**	0.050	0.029	0.18	0.74	**9.36**
9	3325	**3.21**	**22.92**	0.049	0.029	0.20	0.74	**7.14**



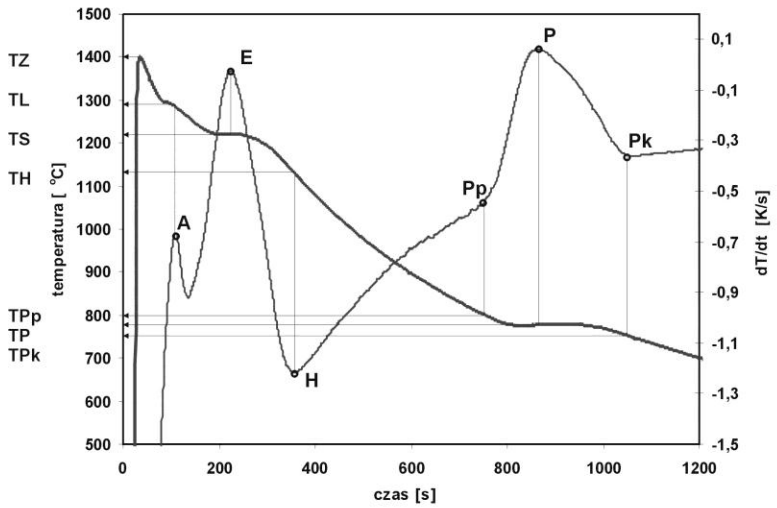
Rys.1. Projekcje powierzchni likwidus układu równowagi Fe-C-Cr – linia ciągła [3] na tle wykresu strukturalnego żeliwa chromowego – linia przerywana [2]
Fig.1. Liquidus surfaces of Fe-C-Cr equilibrium system – solid line[3] and structural diagram of chromium cast iron – broken line [2]

3. CHARAKTERYSTYCZNE TEMPERATURY PRZEMIAN FAZOWYCH ŻELIWA CHROMOWEGO W UKŁADZIE METASTABILNYM

Odlewy przemysłowe stygną w układach metastabilnych, podobnie jak w metodzie ATD-K3, gdzie w kolejnych odlewach ϕ30, ϕ60 i ϕ100 mm różne szybkości stygnięcia wpływają na stopień odchylenia od warunków równowagowych (układu stabilnego). Ogólnie wiadomo, że parametry krystalizacji w układach metastabilnych różnią się od parametrów w układach stabilnych. Temperatury przemian fazowych są jednymi z podstawowych parametrów charakteryzujących krystalizację.

W prezentowanej pracy charakterystyczne temperatury przemian fazowych krystalizacji żeliwa chromowego zostały określone na podstawie krzywych stygnięcia zarejestrowanych najbliżej centrum cieplnego odlewów ϕ30, ϕ60 i ϕ100 mm. Parametry te odczytywano zgodnie z zasadami stosowanymi w tradycyjnej metodzie ATD.

Przebieg krzywych stygnięcia odlewów w poszczególnych próbnikach jest bardzo zróżnicowany. Zasadnicze znaczenie ma tutaj szybkość stygnięcia układu forma-odlew. Na rys.2 przedstawiono krzywe stygnięcia i krystalizacji w odlewie ϕ60 mm dla jednego z wytopów. Na tym rysunku pokazano również sposób odczytu charakterystycznych temperatur.



Rys.2. Krzywe stygnięcia i krystalizacji do przemiany eutektoidalnej odlew ϕ60 – wytop 3, odczyt temperatur
Fig.2. Cooling and crystallization curves to eutectoid transformation cast ϕ60 – melt 3, read-out of temperature

W każdym układzie, w którym zmienne przybierają różne wartości interesujące jest badanie efektów ich wpływu na inne zmienne.
Ilościowe ujęcie wpływu poszczególnych czynników, zwanych zmiennymi niezależnymi na inne, zwane zmiennymi zależnymi możliwe jest jedynie przy zastosowaniu metod analizy statystycznej. W przypadku znacznej liczby zmiennych niezależnych najkorzystniejszą i często zalecaną przez literaturę tematu jest metoda regresji krokowej. W pracy zastosowano procedurę regresji krokowej. Obliczenia, których rezultatem są równania regresji wyznaczone w pracy, wykonano na podstawie wyników badań zestawionych w tabeli 2. W obliczeniach poszukiwano funkcyjnej zależności pomiędzy zawartością węgla C%, chromu Cr%, średnią szybkością stygnięcia odlewu VZH w zakresie krzepnięcia i średnią szybkością stygnięcia odlewu w stanie stałym VHP a charakterystycznymi temperaturami krystalizacji żeliwa chromowego. Do analizy wprowadzono wprowadzono również stosunek zawartości chromu do węgla (Cr/C), który w żeliwie chromowym w dużej mierze decyduje o rodzaju osnowy.

Tabela 2. Charakterystyczne temperatury krystalizacji badanych żeliw chromowych.
Table 2. Characteristic temperatures of crystallization of chromium cast iron

numer wytopu	oznaczenie wytopu	d	TZ	TL	TS	TH	TPp	TP	TPk	VZH	VHP	KH	tH	tPk
		mm	°C							°C/s			s	
1	**1812**	**ϕ100**	1546	1400	1254	1207	787	776	742	0.17	0.15	0.40	2031	6554
		ϕ60	1559	1394	1254	1201	797	763	751	0.32	0.26	0.66	1106	3399
		ϕ30	1510	1386	1249	1199	770	705	681	1.28	0.79	2.22	243	996
2	**2412**	**ϕ100**	1464	1366	1249	1199	826	784	744	0.12	0.14	0.38	2226	6743
		ϕ60	1448	1355	1242	1162	786	766	735	0.26	0.25	0.49	1099	3302
		ϕ30	1416	1345	1232	1186	761	747	723	0.8	0.81	1.80	289	1040
3	**3312**	**ϕ100**	1450	1308	1229	1150	859	788	736	0.11	0.11	0.31	2722	6852
		ϕ60	1453	1300	1222	1102	847	782	763	0.29	0.24	0.44	1214	3106
		ϕ30	1401	1294	1220	1148	803	777	754	0.74	0.72	1.89	344	1046
4	**1818**	**ϕ100**	1548	1400	1283	1236	-	-	-	0.13	-	0.33	2488	-
		ϕ60	1568	1400	1282	1230	735	703	663	0.29	0.22	0.61	1212	4154
		ϕ30	1501	1394	1278	1213	b	b	b	0.89	b	1.58	345	b
5	**2418**	**ϕ100**	1573	1358	1275	1215	785	770	755	0.15	0.13	0.36	2509	7130
		ϕ60	1544	1356	1276	1219	760	754	690	0.32	0.25	0.66	1042	3502
		ϕ30	1524	1353	1275	1209	728	704	677	0.78	0.44	1.13	419	1794
6	**3318**	**ϕ100**	1453	1281	1261	1155	887	833	789	0.11	0.14	0.30	2820	6028
		ϕ60	1473	1274	1256	1144	856	820	783	0.23	0.24	0.48	1459	3184
		ϕ30	1444	1263	1250	1142	817	802	781	0.67	0.55	0.97	460	1168
7	**1825**	**ϕ100**	1409	1376	1301	1258	b	b	b	0.08	b	0.54	1977	b
		ϕ60	1453	1356	1282	1166	b	b	b	0.30	b	0.55	1012	b
		ϕ30	1480	1325	1288	1170	b	b	b	1.31	b	1.44	298	b
8	**2425**	**ϕ100**	1495	1366	1291	1239	782	746	712	0.12	0.14	0.60	2273	6765
		ϕ60	1470	1348	1286	1193	734	673	628	0.27	0.22	0.64	1085	3150
		ϕ30	1439	1290	1279	1195	b	b	b	0.95	b	2.27	301	b
9	**3325**	**ϕ100**	1343	1292	1292	1221	804	774	720	0.05	0.15	0.52	2523	6900
		ϕ60	1411	1283	1283	1189	756	741	707	0.19	0.25	0.53	1227	3471
		ϕ30	1454	1250	1250	1160	b	b	b	1.46	b	1.92	247	b

gdzie:
TZ,TL,TS,TH,–temperatura zalewania, likwidus, solidus, końca krzepnięcia, TPp,TP,TPk - temperatury przemiany eutektoidalnej; VZH,VHP –średnie szybkości stygnięcia w odpowiednich zakresach temperatur; KH –szybkość stygnięcia na końcu krzepnięcia; tH –czas końca krzepnięcia; tPk –czas zakończenia przemiany eutektoidalnej; b –przemiana eutektoidalna nie występuje; - -brak pomiaru.

1) Wpływ C, Cr i VZH na temperaturę likwidus TL

$$\mathbf{TL=1532 - 78\cdot C\% - 27.6\cdot VZH} \quad (1)$$

parametry statystyczne równania 1: R=0.95; F(2,24)=104.85; $p<<0.05$; błąd std=15.7.

2) Wpływ C, Cr i VZH na temperaturę solidus TS

$$\mathbf{TS=1242 - 18\cdot C\% + 4\cdot Cr\% - 14.4\cdot VZH} \quad (2)$$

parametry statystyczne równania 2: R=0.96; F(3,23)=81.03; $p<<0.05$; błąd std=7.2.

3) Wpływ C, Cr i VZH na temperaturę końca krzepnięcia TH

$$\mathbf{TH=1242 - 42\cdot C\% + 3.3\cdot Cr\% - 24.2\cdot VZH} \quad (3)$$

parametry statystyczne równania 3: R=0.76; F(3,23)=10.8; $p<0.00013$; błąd std=24.8.

4) Wpływ C, Cr, VZH i VHP na temperaturę przemiany eutektoidalnej TP

$$\mathbf{TP=765 + 41.2\cdot C\% - 5.6\cdot Cr\% + 69.8\cdot VZH - 21.2\cdot VHP} \quad (4)$$

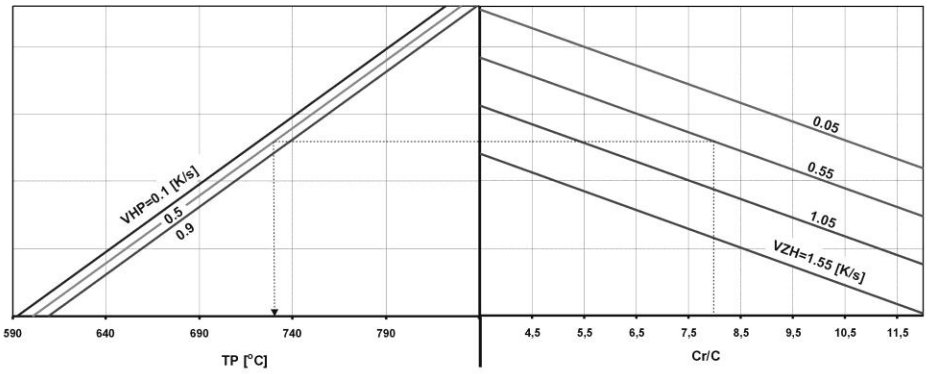
parametry statystyczne równania 4: R=0.80; F(4,15)=6.83; $p<0.00244$; błąd std=27.1.

5) Wpływ Cr/C, VZH i VHP na temperaturę przemiany eutektoidalnej TP

$$\mathbf{TP=870 - 13.9\cdot Cr/C - 71.8\cdot VZH + 21.1\cdot VHP} \quad (5)$$

parametry statystyczne równania 4: R=0.81; F(3,16)=9.86; $p<0.00064$; błąd std=26.3.

Opracowane równania można graficznie przedstawić w postaci nomogramów. Dla przykładu na rys.3 przedstawiono nomogram do określania temperatury przemiany eutektoidalnej w zależności od szybkości stygnięcia w czasie krzepnięcia i po zakrzepnięciu oraz stosunku chromu do węgla Cr/C.



Rys.3. Nomogram do określania temperatury przemiany eutektoidalnej (TP) żeliwa chromowego w funkcji Cr/C, szybkości stygnięcia VZH i VHP.

Fig.3. Nomogram for temperature of eutectoid process (TP) of chromium cast iron determination in function of Cr/C, cooling rate VZH and VHP

Analiza statystyczna dobitnie wykazała znaczący wpływ szybkości stygnięcia odlewu na parametry krystalizacji. Zwiększenie szybkości odprowadzenia ciepła z odlewu w fazie krzepnięcia obniża wszystkie temperatury przemian fazowych. Stwierdzono natomiast przeciwny wpływ szybkości stygnięcia odlewu po zakrzepnięciu na temperaturę przemiany eutektoidalnej TP. Przy dużym stosunku Cr/C > 7 oraz dużej szybkości stygnięcia odlewu w stanie stałym przemiana eutektoidalna całkowicie zanika, co świadczy o wystąpieniu w strukturze tego żeliwa osnowy austenitycznej.

Przeanalizowane temperatury krystalizacji żeliwa chromowego były określone w momencie wystąpienia na krzywej krystalizacji (pierwsza pochodna krzywej stygnięcia) maksymalnych efektów cieplnych zachodzących przemian. Wynika z tego, że temperatury przemian fazowych w układach metastabilnych znacząco różnią się od temperatur w układach stabilnych, z których często korzysta się w programach symulacyjnych. Czy fakt ten może przyczyniać się do znacznych błędów przy analizie procesu stygnięcia odlewu? Przecież nie jest to zwykle równoległe przesunięcie w stosunku do układów stabilnych.

LITERATURA

[1] Sakwa W., Jura S., Sakwa J.: Odporne na ścieranie stopy żelaza. Część I i II . Wyd. ZG STOP, Kraków 1980.

[2] Podrzucki Cz.: Żeliwo. Struktura Właściwości Zastosowanie. T.1 i 2, Wyd. ZG STOP, Kraków 1991.

[3] Chicco B., Thorpe W.R.: On the solidification of pure C-Cr-Fe alloys. Cast Metals 1973, T.5, nr 4.

[4] Studnicki A.: Eksperymentalne modelowanie stygnięcia odlewu w formie. Archiwum Odlewnictwa, PAN-Katowice, rocznik 4, nr 14, 2004,

CRYSTALLIZATION TEMPERATURES OF CHROMIUM CAST IRON IN FUNCTION COOLING RATE

SUMMARY

In this paper casting analysis of chromium cast iron in sand mould has been presented. Presented range of work covers: research of chromium cast iron crystallization with DTA-K3 method which makes possible determination of cooling rate influence on tested temperatures of phase change.

Recenzował Prof. Józef Gawroński