ARCHIWUM ODLEWNICTWA

40/19

Rok 2006, Rocznik 6, Nr 19
Archives of Foundry
Year 2006, Volume 6, Book 19
PAN - Katowice PL ISSN 1642-5308

OCENA PROCESU ODLEWANIA I OBRÓBKI CIEPLNEJ STOPOWEGO STALIWA KONSTRUKCYJNEGO METODĄ ANALIZY TERMICZNEJ I DERYWACYJNEJ

A. STUDNICKI[1], J.KILARSKI[2], M. PRZYBYŁ[3],
Zakład Odlewnictwa
Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych
Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej
44-100 Gliwice ul. Towarowa 7

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono fragment badań wytopów stopowego staliwa konstrukcyjnego (G32NiCrMo12-4) przeznaczonego na wielkogabarytowe elementy rurociągów tj. kolana, trójniki. Celem badań było określenie parametrów odlewania i obróbki cieplnej staliwa ułatwiające optymalny dobór technologii wytwarzania odlewów w warunkach wybranej odlewni staliwa.

Key words: cast steel, cooling curve, solidification, heat treatment

1. WPROWADZENIE

Metoda analizy termicznej i derywacyjnej znajduje coraz szersze zastosowanie w doskonaleniu technologii wytwarzania odlewów z różnych materiałów. Informacje zebrane podczas tej analizy umożliwiają optymalizację procesu wytapiania i odlewania a przez to znacznie przyczyniają się do poprawy jakości odlewów. Przykładem może być wiele wdrożeń w przemyśle wprowadzonych przez S. Jurę i S. Pietrowskiego, których prace były wielokrotnie publikowane w kolejnych zeszytach Krzepnięcie Metali i Stopów oraz Archiwum Odlewnictwa [np. 1, 2, 3, 4].
Rejestracja procesu stygnięcia odlewu poniżej temperatur typowych dla obróbki cieplnej może wzbogacić informacje pomocne przy doborze parametrów obróbki cieplnej.

[1] *dr inż,. Andrzej.Studnicki@polsl.pl*
[2] *dr inż,. Jerzy.Kilarski@polsl.pl*
[3] *dr inż., Marian.Przybyl@polsl.pl*

Najnowsza aparatura rejestrująca umożliwia już takie działania. Jeszcze bogatszy zbiór informacji o procesie odlewania daje nowa metoda analizy termicznej i derywacyjnej z serią próbników o różnych modułach krzepnięcia, która umożliwia badanie wpływu szybkości stygnięcia na charakterystyczne parametry przemian podczas całego procesu stygnięcia odlewu. W Zakładzie Odlewnictwa Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Politechniki Śląskiej opracowano metodę kilku próbników (np. metoda ATD-K3 – trzy próbniki ϕ30, ϕ60 i ϕ100 mm) umożliwiającą realizację powyższego zadania [5].

2. CEL BADAŃ, MATERIAŁ I ICH PRZEBIEG

Celem badań było opracowanie wytycznych do optymalizacji technologii wytwarzania wielkogabarytowych odlewów staliwnych w warunkach jednej z odlewni staliwa. Zakres badań obejmował analizę procesu wytapiania, odlewania i obróbki cieplnej oraz wybranych własności, tj. twardości i odporności na ścieranie. W artykule skupiono się tylko na analizie procesu stygnięcia odlewu i jego obróbki cieplnej.
Badaniom poddane zostało stopowe staliwo konstrukcyjne przeznaczone na elementy pracujące w warunkach udarowo-ściernych. Wymogi dotyczące elementów roboczych wykonanych z tego staliwa to: struktura bainityczna odlewu, twardość w zakresie 30 – 35 HRC przy zachowaniu własności plastycznych określonych normą.
Przeprowadzone badania składały się z dwóch etapów:

Etap I – wykonanie wytopów z różną zawartością Ni i Cr, odlewanie z rejestracją procesu stygnięcia, badania struktury i twardości w stanie lanym,

Etap II – zabiegi obróbki cieplnej z rejestracją procesu chłodzenia, badania struktury i twardości po obróbce cieplnej, badanie odporności na zużycie ścierne.

W tabeli 1 przedstawiono analizę składu chemicznego badanych staliw.

Tabela 1. Analiza chemiczna badanych staliw[% wag.]
Table 1. Chemical analysis of research cast steel [% weight]

wytop	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	Cu	Al.
1	0.34	0.37	0.64	1.29	2.93	0.32	0.023	0.015	0.09	0.039
2	0.34	0.39	0.60	1.55	3.32	0.31	0.023	0.013	0.09	0.047
3	0.31	0.17	0.38	1.13	2.27	0.30	0.025	0.016	0.08	0.019

Do analizy procesu odlewania wykorzystano metodę ATD-K2 (próbniki ϕ30 i ϕ60 mm) oraz ATD-C, co pozwoliło scharakteryzować wpływ szybkości stygnięcia odlewu na parametry przemian zachodzące podczas krzepnięcia jak i w stanie stałym. W drugim etapie badań dobór parametrów obróbki cieplnej prowadzono również w oparciu o metodę analizy termicznej i derywacyjnej. Takie rozwiązanie umożliwiło precyzyjniejszy dobór parametrów obróbki cieplnej przy opracowywaniu przemysłowej technologii tej obróbki. Obróbkę cieplną przeprowadzono również na specjalnych odlewach - próbek w kształcie belki o przekroju kwadratowym 40 mm i długości 150 mm. Po każdym

zabiegu obróbki cieplnej wykonano pomiar twardości i obserwację struktur. W tabeli 3 przedstawiono zestaw przeprowadzonych w pracy obróbek cieplnych.

3. ANALIZA PROCESU ODLEWANIA

Analizę procesu krystalizacji przeprowadzono w oparciu o metodę ATD prof. Jury. W tabeli 2 przedstawiono charakterystyczne temperatury krzepnięcia badanych staliw oraz temperatury przemian w stanie stałym. Temperatura likwidus wyznaczona w próbniku ATD-C wynosi około 1470 ^{o}C, zaś w przypadku zastosowania próbnika ϕ60x90, gdzie proces stygnięcia zachodzi znacznie wolniej, wynosi około 1500 ^{o}C. Jest to prawidłowe, gdyż przy wolniejszym chłodzeniu temperatury przemian zbliżają się do temperatur równowagowych stopu. Na rys.1a przedstawiono przykładowo dla wytopu 3 przebieg krzywych stygnięcia i krystalizacji w różnych próbnikach.
Podobne zjawisko obserwuje się też w przypadku przemian w stanie stałym. Tutaj szybkość stygnięcia determinuje początek i koniec przemian zgodnie z przebiegiem krzywych CTPc. Na rys.1b pokazano obszar zachodzących przemian w stanie stałym dla wytopu 3. Można zauważyć, że podczas wolniejszego stygnięcia (próbnik ϕ60) zakres temperaturowy przemiany jest szerszy.

Tabela 2. Charakterystyczne temperatury krzepnięcia i przemian fazowych
Table 2. Characteristic temperatures of solidification and phase transformations

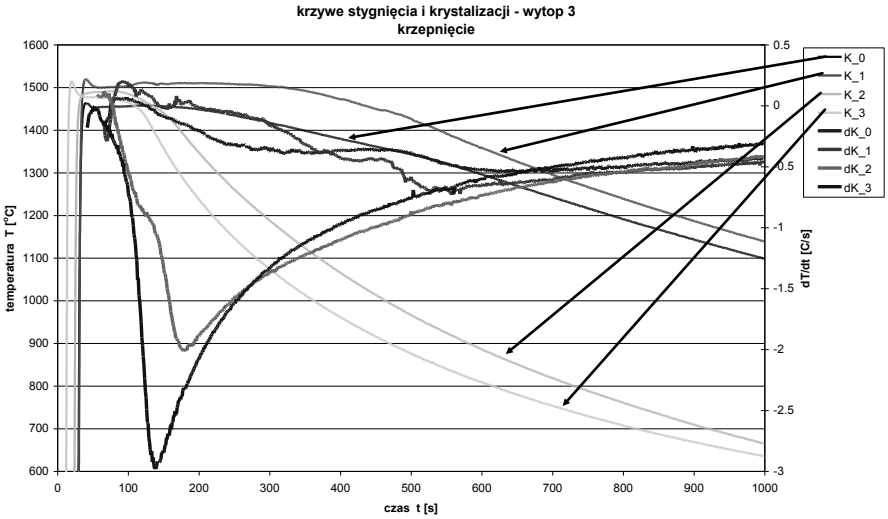
wytop	krzepnięcie				przemiana fazowa (bainityczna)			
	próbnik ATD-C		próbnik ϕ60		próbnik ATD-C		próbnik ϕ60	
	start	stop	start	stop	start	stop	start	stop
	temperatura ^{o}C							
1	**1452**	**1338**	**1492**	**1363**	**460**	**420**		
2	**1470**	**1352**	**1501**	**1382**	**430**	**400**		
3	**1475**	**1340**	**1502**	**1386**	**540**	**390**	**560**	**360**

4. ANALIZA PROCESU OBRÓBKI CIEPLNEJ

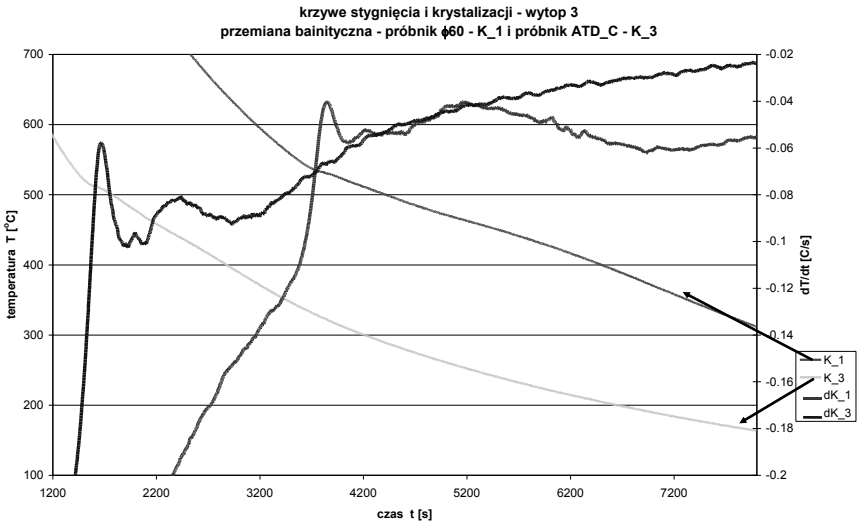
Zasadnicze zabiegi obróbki cieplnej badanych staliw obejmowały:
- normalizowanie,
- hartowanie w strumieniu powietrza,
- odpuszczanie z chłodzeniem w powietrzu.

Wykonano też cykl obróbki cieplnej z hartowaniem w wodzie. Jednak dla badanych stopów ten sposób wydaje się nieodpowiedni a zarazem zbyt niebezpieczny w przypadku masywnych odlewów, które mogą ulec pęknięciu podczas hartowania. Badane staliwa należą do grupy staliw o wysokiej hartowności, więc krytyczne szybkości chłodzenia nie są wysokie.
Dokładny opis przeprowadzonych obróbek cieplnych oraz uzyskane twardości zestawiono w tabeli 3. Dla zmniejszenia szybkości chłodzenia niektóre próbki umieszczano w pojemniku z piaskiem kwarcowym.

a)



b)



Rys.1. Krzywe stygnięcia i krystalizacji dla wytopu 3 - a) tylko krystalizacja pierwotna, b) tylko przemiana bainityczna (wytop 1 próbnik ϕ60 K_0 i K_1, próbnik ϕ30 K_2, próbnik ATD-C K_3)

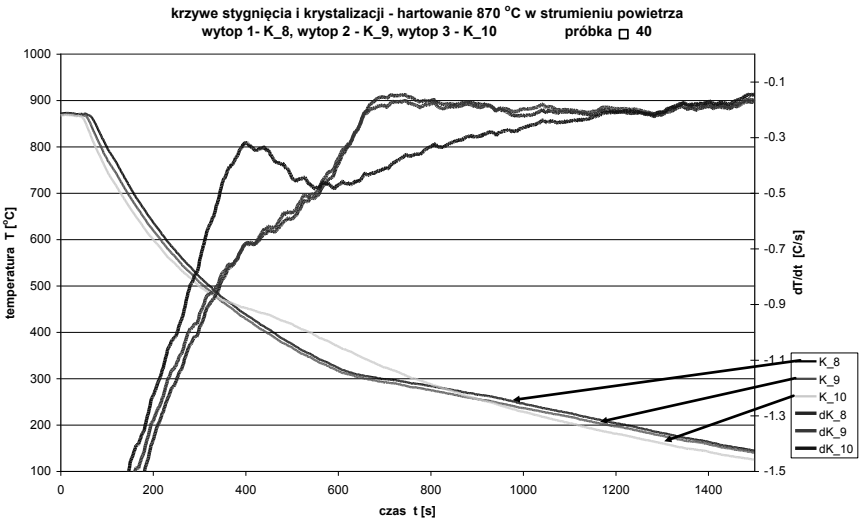
Fig.1. Cooling and derivative curves for melt 3 - a) only primary crystallization process, b) only bainitic process (melt 3 tester ϕ60 K_0 and K_1, ϕ30 tester K_2, tester ATD-C K_3)

Na wykresie (rys.2) pokazano przebieg krzywych chłodzenia i ich pochodne podczas hartowania w strumieniu powietrza próbek □ 40 dla wszystkich wytopów. Struktury wybranych wytopów w stanie surowym i po obróbce cieplnej pokazano na rys.3 i rys.4.

Tabela 3. Twardość badanych staliw (stan surowy i po obróbce cieplnej)
Table 3. Hardness of research cast steel (as-cast and after heat treatment)

numer wytopu	obróbka cieplna	oznaczenie próbki	średnia twardość HRC		
			ATD-C ϕ33	ϕ60	□ 40
1	stan surowy	**1.0**	**42**	**40**	**40**
2		**2.0**	**43**	**43**	**46**
3		**3.0**	**32**	**29**	**30**
1	normalizowanie 900°C/1.5h/pow	**1.1**	**54**		**55**
2		**2.1**	**53**		**53**
3		**3.1**			
1	normalizowanie 900°C/1.5h/pow odpuszczanie 480°C/1.5h/pow	**1.1.1**			**47**
2		**2.1.1**			**44**
3		**3.1.1**			
1	normalizowanie 900°C/1.5h/pow hartowanie 880°C/1.5h/woda/5min	**1.2**		**56**	**58**
2		**2.2**		**51**	**54**
3		**3.2**			
1	normalizowanie 900°C/1.5h/pow hartowanie 880°C/1.5h/woda/5min odpuszczanie 480°C/1.5h/pow	**1.2.1**	**44**	**43**	**43**
2		**2.2.1**	**46**	**45**	**45**
3		**3.2.1**			
1	normalizowanie 900°C/1.5h/pow hartowanie 870°C/1.5h/ strum. pow	**1.3**			**53**
2		**2.3**			**54**
3		**3.3**			**42**
1	normalizowanie 900°C/1.5h/pow hartowanie 870°C/1.5h/ strum. pow odpuszczanie 540°C/1.5h/pow	**1.3.2**			**44**
2		**2.3.2**			**44**
3		**3.3.2**			**39**
1	normalizowanie 900°C/1.5h/pow hartowanie 870°C/1.5h/ strum. pow odpuszczanie 540°C/1.5h/pow odpuszczanie 610°C/1.5h/pow	**1.3.2.3**			**34**
2		**2.3.2.3**			**34**
3		**3.3.2.3**			**29**
1	normalizowanie 900°C/1/h/pow	**1.4**	**50**		
2		**2.4**	**52**		
3		**3.4**	**41**		
1	normalizowanie 900°C/1h/pow hartowanie 870°C/1h/ strum. pow	**1.5**	**53**	**51***	
2		**2.5**	**52**	**52***	
3		**3.5**	**40**	**36***	
1	normalizowanie 900°C/1h/pow hartowanie 870°C/1h/strum. pow odpuszczanie 600°C/1h/pow	**1.5.3**	**34**	**33***	
2		**2.5.3**	**35**	**34***	
3		**3.5.3**	**33**	**26***	

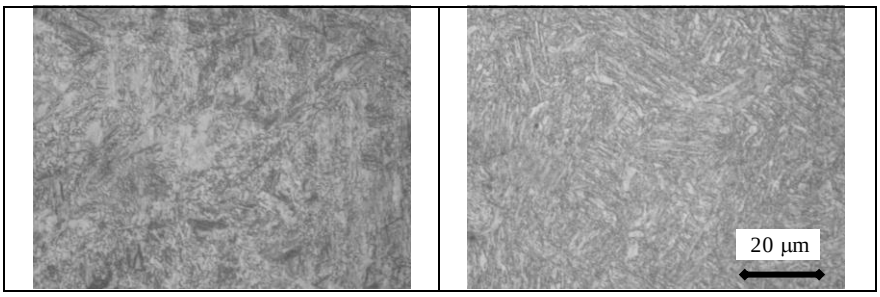
* - próbki były w skrzynce z piaskiem (wolniejsze stygnięcie)
* - samples were in sand box (slowly cooling)



Rys.2. Hartowanie w strumieniu powietrza - wytopy 1, 2 i 3 (próbka □40)
Fig.2. Hardening in airstream – melts 1, 2 and 3 (samples □40)

stan surowy

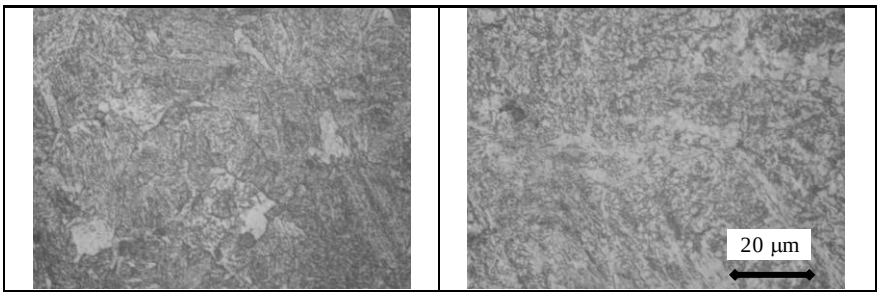
normalizowanie 900°C/1h/powietrze
hartowanie 870°C/1h/strumień powietrza
odpuszczanie 600°C/1h/powietrze



Rys.3. Mikrostruktura staliwa (wytop 1) – w stanie lanym (bainit, ferryt) i po obróbce cieplnej (sorbit) - trawienie Nital 3%
Fig.3. Microstructure of cast steels (melt 1) – as-cast (bainite, ferrite) and after heat treatment (sorbite) - etching Nital 3%

stan surowy

normalizowanie 900°C/1h/powietrze
hartowanie 870°C/1h/strumień powietrza
odpuszczanie 600°C/1h/powietrze



Rys.4. Mikrostruktura staliwa (wytop 3) – w stanie lanym (bainit, ferryt) i po obróbce cieplnej (sorbit, ferryt) - trawienie Nital 3%
Fig.4. Microstructure of cast steels (melt 3) – as-cast (bainite, ferrite) and after heat treatment (sorbite, ferrite) - etching Nital 3%

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W tabeli 3 zestawiono wyniki pomiarów twardości badanych staliw dla różnych odlewów (odpowiada to różnym szybkościom stygnięcia) i różnych obróbek cieplnych przeprowadzonych w ramach pracy. Analiza wyników badań prowadzi do ciekawych praktycznych wniosków, które zapisano poniżej. Wnioski te wykorzystano przy optymalizacji technologii wytwarzania w jednej z odlewni staliwa.

Wnioski z badań:

1. Analiza krzywych stygnięcia i krystalizacji (ATD) wykazała, że badane stopy bez względu na zastosowane szybkości stygnięcia (różne próbniki ATD) charakteryzują się występowaniem przemiany bainitycznej, co potwierdzają badania metalograficzne struktury w stanie lanym.
2. Wyższa zawartość Ni i Cr wpływa na obniżenie charakterystycznych temperatur przemiany bainitycznej.
3. Staliwo 3 o najmniejszej zawartości Ni, Cr i C charakteryzuje się większą wrażliwością na szybkość stygnięcia odlewu niż staliwa 1 i 2. Jednocześnie staliwo to posiada najniższą twardość (o około 10 jednostek HRC) w stosunku do staliwa 1 i 2.
4. Staliwom 1 i 2 do osiągnięcia twardości rzędu 50 HRC wystarcza proces hartowania w strumieniu powietrza (austenityzowanie w temperaturze 870°C przez 1 godzinę na 25 mm grubości odlewu).
5. Zapewnienie twardości staliwom 1 i 2 rzędu 30 – 35 HRC wymaga przeprowadzenia po hartowaniu odpuszczania w temperaturze 600°C z chłodzeniem w powietrzu.
6. W celu otrzymania jednorodnej struktury bainitycznej (sorbitycznej) preferowanej jako odpornej na zużycie ścierne najlepiej byłoby przeprowadzić obróbkę cieplną

z izotermicznym wygrzewaniem w temperaturze około 400°C, czyli w zakresie przemiany bainitycznej.

7. Zalecany skład chemiczny staliwa G32NiCrMo12-4 powinien być uzależniony od grubości ścianki odlewu:C=0.30÷0.34 %; Cr=0.80÷1.20%, Ni=2.80÷3.20%, Mo=0.25÷0.35%, Mn=0.50÷0.80%. Wyższa zawartość Ni, Cr i Mo w przypadku grubszych ścianek odlewów.
8. Obróbka cieplna:
   normalizowanie 900°C / 1h/25 mm / powietrze
   hartowanie:
   wariant A: 870°C / 1h/25 mm / strumień powietrza
   wariant B: 870°C /1h/25 mm / chłodzenie w powietrzu do 400°C / izotermiczne wytrzymanie w 400°C min 1h/25 mm / powietrze
   odpuszczanie – w zależności od twardości po hartowaniu
   np. HRC > 50 odpuszczanie 600°C / 1h/25 mm / powietrze

LITERATURA

[1] Jura S., *Istota metody ATD*. Nowoczesne metody oceny jakości stopów. PAN-Katowice, Instytut Odlewnictwa Pol. Śl. 1985, s.5.

[2] Kilarski J., Studnicki A., Jura S., *Zastosowanie metody ATD do jakościowej oceny staliwa chromowego przeznaczonego na wykładziny młynów cementowych*, Krzepnięcie Metali i Stopów, Katowice 2000, v. 2, nr 44, s. 191-196.

[3] Jura S., *Szkoła Krystalizacji Profesora Wacława M. Sakwy po 10 latach*, Przegląd Odlewnictwa, nr 3, vol. 52, 2002.

[4] Pietrowski S., Władysiak R., Meksa W., Woźnicki G.: *Ocena krystalizacji staliwa metoda ATD*, Archiwum Odlewnictwa, PAN-Katowice, nr 8, 2003.

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

THE ASSESSMENT OF CASTING AND HEAT TREATMENT PROCESS OF CONSTRUCTIONAL ALLOY CAST STEEL BY THERMICAL AND DERIVATIVE ANALYSIS METHOD

SUMMARY

In this paper the research fragment of constructional alloy cast steel (G32NiCrMo12-4) for large-size parts of pipelines (elbows, T-pipes) has been presented. The goal of research was definition of casting and heat treatment parameters which facilitated the optimum choice of process production under conditions in selected cast steel foundry.

Recenzował: prof. zw. dr hab. inż. Stanisław Pietrowski