

ZALEŻNOŚCI PARAMETRÓW FUNKCJI $HRC=F(S)$ I WŁASNOŚCI TERMOFIZYCZNYCH OD SKŁADU CHEMICZNEGO STALIWA

D. BARTOCHA¹, S. JURA²

Katedra Odlewnictwa, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska
ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice

STRESZCZENIE

W niniejszej pracy opisano próbę opracowania zależności umożliwiających wyznaczenie danych (własności termofizycznych i wartości parametrów funkcyjnej zależności twardości od kinetyki stygnięcia) na podstawie składu chemicznego staliwa. Dane te umożliwiają symulację pola twardości hartowanych odlewów staliwnych.

Key words: heat treatment, quenching, computer simulation, Jominy test.

1. WPROWADZENIE

Poprawa własności mechanicznych odlewów staliwnych poprzez obróbkę cieplną najczęściej po zgrubnej obróbce mechanicznej jest typowym zabiegiem stosowanym w technologii wytwarzania odlewanych staliwnych elementów maszyn realizowanym w odlewni. W projektowaniu technologii odlewania znalazło zastosowanie i stałe miejsce kilka ciągle ulepszanych i rozwijanych systemów symulacyjnych, niestety nie można tego powiedzieć o projektowaniu parametrów obróbki cieplnej. Wśród programów symulacyjnych przeznaczonych do wspomagania projektowania technologii obróbki cieplnej można wymienić: Hearts [1], PPS [2], Tech[3], Predict[3] oraz aplikacja systemu MagmaSoft do symulacji obróbki cieplnej. Programy powyższe mają mniej lub bardziej złożoną budowę jednak w każdym można wyróżnić dwa podstawowe moduły obliczeniowe pierwszy to moduł obliczeń cieplnych drugi to moduł obliczeń efektów cieplnych. Algorytmy obliczeniowe stosowane w drugim z wymienionych modułów w

¹ mgr inż. .dariusz2@zeus.polsl.gliwice.pl

² prof. dr hab. inż. sekrm13@zeus.polsl.gliwice.pl

tego typu programach bazują na zależnościach opracowanych na podstawie wykresów CTP. Wykresy te wykorzystywane są w dwojaki sposób: pierwszy to wyznaczanie funkcyjnych zależności wiążących kinetykę stygnięcia z udziałem objętościowym poszczególnych składników struktury austenitu, perlitu, ferrytu, bainitu, martenzytu i następnym oszacowaniem na tej podstawie własności materiałowych. Drugi to odczytanie konkretnych wielkości bezpośrednio z wykresu CTP, pociąga to za sobą wymóg opracowania wykresów CTP dla każdego materiału, z którego wykonywany jest element poddawany wirtualnej obróbce cieplnej.

Tabela 1. Skład chemiczny badanych staliw
Table 1. Chemical composition of researched cast steel.

Nr próbki	Oznaczenie	Zawartość pierwiastka % wag.									
		C	Cr	Si	Ni	Mn	Cu	P	S	Al	Mo
3	L35GSM	0,3	0,08	0,7	0,01	1,32	0,08	0,022	0,021	0,01	0,28
4	L35GSM	0,3	0,08	0,7	0,01	1,32	0,08	0,022	0,021	0,01	0,28
5	L30H	0,26	0,67	0,21	0,06	0,75	0,08	0,038	0,038	0,01	0,02
6	L30H	0,26	0,67	0,21	0,06	0,75	0,08	0,038	0,038	0,01	0,02
10	270-480	0,31	0,19	0,41	0,1	0,68	0,1	0,025	0,014	0,01	0,03
11	270-480	0,31	0,19	0,41	0,1	0,68	0,1	0,025	0,014	0,01	0,03
13	340-550	0,43	0,18	0,52	0,1	0,58	0,12	0,015	0,014	0,07	0,1
14	L18HM	0,17	1,03	0,5	0,1	0,67	0,12	0,015	0,01	0,03	0,45
15	L18HM	0,17	1,03	0,5	0,1	0,67	0,12	0,015	0,01	0,03	0,45
16	L35GSM	0,37	0,16	0,61	0,1	1,3	0,12	0,015	0,01	0,04	0,32
17	L35GSM	0,37	0,16	0,61	0,1	1,3	0,12	0,015	0,01	0,04	0,32
18	L30GS	0,28	0,1	0,7	0,1	1,21	0,1	0,011	0,01	0,04	0,04
19	L30GS	0,28	0,1	0,7	0,1	1,21	0,1	0,011	0,01	0,04	0,04
20	L35GSM	0,35	0,21	0,6	0,02	1,28	0,06	0,025	0,024	0,06	0,34
21	L35GSM	0,35	0,21	0,6	0,02	1,28	0,06	0,025	0,024	0,06	0,34
22	L35GSM	0,35	0,07	0,63	0,05	1,36	0,13	0,024	0,017	0,056	0,3
23	L35GSM	0,35	0,07	0,63	0,05	1,36	0,13	0,024	0,017	0,056	0,3
24	L47HNM	0,48	2,17	0,47	2,11	0,64	0,2	0,01	0,005	0,026	0,34
26	L70H2GNM	0,66	1,7	0,53	0,73	0,9	0,17	0,021	0,009	0,029	0,35
27	L70H2GNM	0,66	1,7	0,53	0,73	0,9	0,17	0,021	0,009	0,029	0,35
28	GS52	0,31	0,12	0,42	0,14	0,82	0,13	0,013	0,009	0,023	0,04
29	GS52	0,31	0,12	0,42	0,14	0,82	0,13	0,013	0,009	0,023	0,04
30	GS30Mn5	0,31	0,24	0,42	0,24	1,27	0,18	0,013	0,008	0,025	0,04
31	GS30Mn5	0,31	0,24	0,42	0,24	1,27	0,18	0,013	0,008	0,025	0,04
32	L35HM	0,33	1,0	0,45	0,24	0,66	0,17	0,013	0,007	0,032	0,25
33	L35HM	0,33	1,0	0,45	0,24	0,66	0,17	0,013	0,007	0,032	0,25
34	GS32NiCrMo14,4	0,29	0,73	0,31	2,63	0,82	0,19	0,012	0,011	0,022	0,22
35	GS32NiCrMo14,4	0,29	0,73	0,31	2,63	0,82	0,19	0,012	0,011	0,022	0,22
36	GS-C25	0,18	0,1	0,39	0,1	0,37	0,12	0,014	0,013	0,04	0,05
37	GS-C25	0,18	0,1	0,39	0,1	0,37	0,12	0,014	0,013	0,04	0,05
38	GS-C25	0,18	0,1	0,39	0,1	0,37	0,12	0,014	0,013	0,04	0,05

Do przeprowadzenia komputerowej symulacji procesu obróbki cieplnej potrzebne są dwojakiemu rodzajowi dane materiałowe: dane termo – fizyczne materiałów do obliczeń cieplnych i dane wiążące kinetykę stygnięcia z własnościami danego materiału. Uwagę zwrócić należy na dwudrożność pozyskiwania tych danych, to znaczy dane do obliczeń cieplnych oraz dane do obliczeń własności materiału po obróbce cieplnej pochodzą z dwu różnych źródeł, a wyznaczenie ich odbywa się dwoma różnymi drogami (różne próby, różne algorytmy obliczeniowe), które nie mają ze sobą nic wspólnego. Na dzień

dzisiejszy jedynym jednoźródłowym sposobem generowania danych obu typów jest zmodyfikowana próba Jominy – M, co umożliwia symulację pól twardości hartowanych elementów stalowych przez wykorzystanie zaadoptowanego programu do symulacji procesów cieplnych ColdCAST.

W celu opracowania zależności umożliwiających szybkie obliczanie danych niezbędnych do symulacji efektów obróbki cieplnej przeprowadzono 36 prób Jominy – M dla 18 stali o różnym składzie chemicznym tabela.1, po wstępnej weryfikacji wyników prób wybrano wyniki 31 prób wyznaczając dla tych materiałów dane termofizyczne oraz wartości parametrów zależności twardości w funkcji szybkości stygnięcia.

2. WŁASNOŚCI TERMO – FIZYCZNE.

Własności termofizyczne badanych stali wyznaczano w dwojaki sposób: obliczając je według semiempirycznych zależności zaproponowanych przez J.Miettinen'a do obliczania danych termofizycznych dla symulacji krzepnięcia i stygnięcia staliwa [4,5,6] tabela 2., następnie traktując wyniki tych obliczeń jako wartości startowe rozwiązywano zadanie odwrotne wykorzystując uproszczony (jednowymiarowy) model próby Jominy – M [7,8].

Tabela 2. Własności termofizyczne badanych stali obliczone wg zależności Miettinen'a.

Table 2. Thermal-physical properties of testing steel cast calculated from Miettinen's equations.

Nr próbki	Oznaczenie	Tp [°C]	Qs [J/kgK]	ΔT [°C]	λ ₀ [W/mK]	λ _{TP} [W/mK]	λ ₁₀₀₀ [W/mK]	ρ ₀ [kg/m ³]	ρ ₁₀₀₀ [kg/m ³]	Cp ₀ [J/kgK]	Cp ₁₀₀₀ [J/kgK]
3	L35GSM	643	645.1	76	43	25	28	7780	7508	31	688
4	L35GSM	643	645.1	76	43	25	28	7780	7508	31	688
5	L30H	680	163.7	68	63	26	29	7793	7543	1.37	690
6	L30H	680	163.7	68	63	26	29	7793	7543	1.37	690
10	210-480	679	695.5	72	53	25	28	7781	7527	3.81	686
11	210-480	679	695.5	72	53	25	28	7781	7527	3.81	686
13	340-550	665	1473.4	44	52	25	28	7754	7508	5.14	685
14	L18HM	699	853.6	115	60	26	29	7817	7537	6.42	692
15	L18HM	699	853.6	115	60	26	29	7817	7537	6.42	692
16	L35GSM	629	1081.9	53	43	25	28	7767	7506	28	686
17	L35GSM	629	1081.9	53	43	25	28	7767	7506	28	686
18	L30G3	656	547.8	83	46	25	28	7776	7508	26	688
19	L30GS	656	547.8	83	46	25	28	7776	7508	26	688
20	L35GSM	634	1034	59	44	25	28	7772	7509	28.38	686
21	L35GSM	634	1034	59	44	25	28	7772	7509	28.38	686
22	L35GS M	629	981.1	59	42	25	28	7771	7507	31.37	688
23	L35GSM	629	981.1	59	42	25	28	7771	7507	31.37	688
24	L47HNM	591	5640.5	46	60	24	28	7731	7505	59.33	697
26	L70H2GNM	626	22444.4	17	52	23	26	7692	7477	41	694
27	L70H2GNM	626	22444.4	17	52	23	26	7692	7477	41	694
28	G352	671	739.3	71	53	25	28	7786	7526	10.11	686
29	GS52	671	739.3	71	53	25	28	7786	7526	10.11	686
30	G330Mn5	636	131.7	76	50	25	28	7776	7523	25.36	691
31	GS30Mn5	636	131.7	76	50	25	28	7776	7523	25.36	691
32	L35HM	660	726.2	72	58	25	28	7775	7521	15.91	691
33	L35HM	660	726.2	72	58	25	28	7775	7521	15.91	691
34	GS32NiCrMo14.4	578	111.9	75	53	24	28	7787	7542	19	697
35	GS32NiCrMo14.4	578	111.9	75	53	24	28	7787	7542	19	697
36	GS-C25	734	402	108	60	26	29	7815	7545	6.5	686
37	GS-C25	734	442	108	60	26	29	7815	7545	6.5	686
38	GS-C25	734	402	108	60	26	29	7815	7545	6.5	686

Wyniki obliczeń oraz wartości średnich modułów różnic temperatury w próbkowaniu co 1 sekundę krzywych zarejestrowanych i obliczonych przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Własności termo-fizyczne badanych staliw wyznaczone w zadaniu odwrotnym.

Table 3. Thermal-physical properties of testing steel cast determined in converse problem.

Nr próbki	Oznaczenie	Tp [°C]	Qs [J/kgK]	ΔT [°C]	λ ₀ [W/mK]	λ _{TP} [W/mK]	λ ₁₀₀₀ [W/mK]	ρ ₀ [kg/m ³]	ρ ₁₀₀₀ [kg/m ³]	Cp ₀ [J/kgK]	Cp ₁₀₀₀ [J/kgK]
3	L35GSM	690	180	180	22	20	23	7780	7623	630	637
4	L35GSM	690	180	180	22	20	23	7780	7623	630	637
5	L30H	700	260	260	26	20	23	7793	7638	620	627
6	L30H	700	260	260	26	20	23	7793	7638	620	627
10	210-480	650	280	280	25	20,5	23	7781	7625	600	607
11	210-480	650	280	280	25	20,5	23	7781	7625	600	607
13	340-550	650	230	300	27	20	22	7754	7599	660	669
14	L18HM	760	100	200	20	20	23	7817	7660	590	597
15	L18HM	760	100	200	20	20	23	7817	7660	590	597
16	L35GSM	690	180	180	23	20	24	7767	7612	630	637
17	L35GSM	690	180	180	23	20	24	7767	7612	630	637
18	L30G3	630	300	240	19	21	24	7776	7621	620	627
19	L30GS	630	300	240	20	21	24	7776	7621	620	627
20	L35GSM	730	180	180	23	20	24	7772	7617	630	637
21	L35GSM	730	180	180	23	20	24	7772	7617	630	637
22	L35GS M	690	180	180	23	20	24	7771	7616	630	637
23	L35GSM	690	180	180	23	20	24	7771	7616	630	637
24	L47HNM	720	100	100	18	22	24	7731	7576	600	607
26	L70H2GNM	-	-	-	14	-	25	7692	7538	580	587
27	L70H2GNM	-	-	-	14	-	25	7692	7538	580	587
28	G352	680	200	240	26	21	23	7786	7631	640	647
29	GS52	680	200	240	26	21	23	7786	7631	640	647
30	G330Mn5	630	260	320	24	22	5	7776	7620	640	647
31	GS30Mn5	630	260	320	24	22	5	7776	7620	640	647
32	L35HM	670	180	180	20	20	25	7775	7620	650	657
33	L35HM	670	180	180	20	20	23	7775	7620	650	657
34	GS32NiCrMo14.4	410	210	320	14	20	27	7787	7631	580	587
35	GS32NiCrMo14.4	410	210	320	16	20	27	7787	7631	600	607
36	GS-C25	680	200	300	29	21	23	7815	7659	620	627
37	GS-C25	680	200	300	29	21	23	7815	7659	620	627
38	GS-C25	680	200	300	29	21	23	7815	7659	620	627

Porównując wartości z obu zbiorów danych widać, że wartości własności termo-fizycznych obliczone wg zależności Miettinen'a są porównywalne z wartościami tych danych znajdujących się w plikach materiałowych większości kodów symulacyjnych, niestety różnią się znacznie od wartości wyznaczonych w zadaniu odwrotnym na podstawie zarejestrowanych krzywych stygnięcia próbki Jminy-M. Stwierdzić można, że służące do symulacji cieplnej procesów odlewniczych dane termo-fizyczne nie nadają się do symulacji cieplnej stygnięcia z dużymi prędkościami w przedziale temperatur 1000 – 20°C. Dlatego też dalszej analizie poddano zbiór danych wyznaczonych w zadaniu odwrotnym.

3. TWARDOŚĆ W FUNKCJI KINETYKI STYGNIECIA.

Druga grupa danych wyznaczanych na podstawie próby Jominy-M to parametry funkcyjnej zależności twardości od szybkości stygnięcia.

Wartości tych parametrów wyznaczono analizując statystycznie krzywe hartowności poszczególnych próbek oraz wartości siecznej S (parametru jednoznacznie opisującego prędkość stygnięcia próbki w danej odległości od chłodzonego czoła) [8, 9].

Jako najbardziej odpowiednią, przyjęto następującą postać matematyczną tej zależności:

$$HRC = B_0 + B_1S + B_2S^2 + B_3 \ln(S) \quad (1)$$

Wartości parametrów zależności (1) oraz wartości parametrów statystycznych ich wyznaczenia przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Parametry B_i zależności (1) i parametry statystyczne ich wyznaczenia.
Table 4. B_i parameters of equation (1) and statistical parameters their determined.

Nr próbki	Oznaczenie	Parametry funkcji HR=f(S)				Wsp. korelacji R
		B0	B1	B2	B3	
3	L35GSM	22,462528	0,014497	-0,000002	4,773033	R=0,98904
4	L35GSM	22,621115	-0,010553	0,000001	5,866089	R=0,98931
5	L30H	9,323689	-0,015119	0,000001	5,481698	R=0,99673
6	L30H	8,730911	0,000433	0,000001	5,513809	R=0,99856
10	210-480	5,526217	0,041307	-5,18E-06	5,102412	R=0,99887
11	210-480	5,902952	0,106501	-1,31E-05	4,226874	R=0,99874
13	B40-550	13,871677	0,020801	-0,000003	3,751831	R=0,99079
14	L18HM	16,183894	-0,039938	0,000005	4,126572	R=0,98854
15	L18HM	18,076472	-0,021919	0,000002	3,647611	R=0,99608
16	L35GSM	24,054449	-0,014260	0,000001	6,088648	R=0,98986
17	L35GSM	20,837900	0,008995	-0,000002	5,173196	R=0,98948
18	L30G3	11,167378	0,012948	-0,0000019	6,176168	R=0,99778
19	L30GS	12,745205	0,022302	-0,0000030	4,623790	R=0,99885
20	L35GSM	12,607872	0,045752	-0,000006	4,222909	R=0,98831
21	L35GSM	13,269641	0,064702	-0,000008	2,896016	R=0,99685
22	L35GS M	22,864999	-0,000426	0,000000	4,667715	R=0,99456
23	L35GSM	21,343357	-0,008870	0,000001	5,171973	R=0,99184
24	L47HNM	50,343809	-0,058374	0,0000069	0,072988	R=0,98956
26	L70H2GNM	43,752232	-0,049466	0,0000056	4,670320	R=0,98956
27	L70H2GNM	45,912122	-0,044186	0,0000050	4,003319	R=0,98731
28	G352	4,092239	0,049874	-0,000006	3,115796	R=0,99775
29	GS52	4,881659	0,042914	-0,000005	2,160897	R=0,99476
30	G330Mn5	11,427163	-0,010759	0,000001	4,583394	R=0,99454
31	GS30Mn5	6,742249	0,004386	-0,000001	5,212156	R=0,99806
32	L35HM	22,835469	-0,001691	-0,0000001	4,047715	R=0,99794
33	L35HM	24,370892	-0,012099	0,0000012	4,234559	R=0,99802
34	GS32NiCrMo14,4	28,943000	-0,014498	0,000002	2,962822	R=0,98838
35	GS32NiCrMo14,4	28,924016	-0,062536	0,000007	5,137094	R=0,98467
36	GS-C25	6,663764	0,126114	-0,000015	0,004289	R=0,98846
37	GS-C25	7,359382	0,037180	-0,000004	0,342571	R=0,99167
38	GS-C25	6,916578	0,136493	-0,000016	0,093343	R=0,99606

4. ANALIZA STATYSTYCZNA OTRZYMANYCH WYNIKÓW.

Otrzymane wyniki badań: dane termo-fizyczne tabela 3, wartości parametrów funkcji twardość – kinetyka stygnięcia tabela 4 oraz składy chemiczny poszczególnych próbek tabela 1 i parametry obróbki cieplnej (temperatura austenizacji, czas austenizacji) poddano analizie statystycznej w celu wyznaczenia zależności wiążących skład chemiczny staliwa z własnościami termo-fizycznymi do obliczeń stygnięcia z dużymi szybkościami i wartościami parametrów zależności twardości w funkcji kinetyki stygnięcia.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano następujące zależności:

$$T_p = 734,28 + 54,98Cr^2 - 78,26Si^2 - 107,59Ni - 390,53Cu + 324Al + 123,01Mo \quad (1)$$

$$R=0,9543 \quad W=8,40 \quad Y=18,617452 \quad F=30,60$$

$$Q_s = 16,74 + 0,00019T_{obr} - 0,0008t_{obr} + 120,05Si + 19,96Ni + 59,17Mn + 47955,66P^2 - 405,75Mo \quad (2)$$

$$R=0,9543 \quad W=8,40 \quad Y=18,61752 \quad F=30,60$$

$$\Delta T = 409,82 + 0,16T_{obr} - 338,33C - 48,61Cr - 332,61Si + 29,63Ni + 82,60Mn - 318,09Cu - 3377,29S - 165,87Mo \quad (3)$$

$$R=0,9955 \quad W=71,84 \quad Y=7,374138 \quad F=197,78$$

$$\lambda_0 = 26,87 + 9673,54T_{obr}^{-1} - 9,93t_{obr}^{-1} + 4,42C^2 - 7,55Cr - 18,78Si - 3,86Ni - 3,85Mn + 18,99Al + 6,41Mo \quad (4)$$

$$R=0,9924 \quad W=45,55 \quad Y=0,625893 \quad F=144,56$$

$$\lambda_{T_p} = 21,68 + 0,000066t_{obr}^2 - 8,21C^2 - 3,05Si^2 - 0,13Ni^2 + 1,59Mn - 62,48P + 9,09Al - 2,63Mo \quad (5)$$

$$R=0,9854 \quad W=24,23 \quad Y=0,127771 \quad F=79,39$$

$$\lambda_{1000} = 48,74 - 0,000024T_{obr}^2 + 28,28Si^2 + 5,67Ni - 15,15Mn - 299,5Cu^2 + 5647,41P^2 - 0,00031Al^2 + 9,07Mo \quad (6)$$

$$R=0,9021 \quad W=3,83 \quad Y=2,540974 \quad F=10,92$$

$$\rho_0 = 7874,21 - 0,024t_{obr} - 221,05C - 11,32Cr - 35,92Si - 1,48Ni - 7,96Mn - 121,84P - 35,1Al - 37,85Mo \quad (7)$$

$$R=0,9993 \quad W=513,71 \quad Y=1,295902 \quad F=1710,03$$

$$\rho_{1000}=7722,13-214,99C-10,08Cr-42,02Si-1,5Ni-5,95Mn-25,64Cu-186,83P+35,01Mo \quad (8)$$

$$R=0,9990 \quad W=347,15 \quad Y=3406,4951 \quad F=1484,5$$

$$C_{p0}=830,01-0,17T_{obr}+0,0039t_{obr}-23,22Cr-68,46Si^2-5,19Ni^2-9,88Mn^{-1}-192,64P+26444,79S^2+5715,43Mo \quad (9)$$

$$R=0,9789 \quad W=15,99 \quad Y=5,216065 \quad F=45,96$$

$$C_{p1000}=921,73-0,34T_{obr}+0,0054t_{obr}^2-124,64C^2-13,40Ni+519,17Cu^2-455,09P+8896,8Al^2+0,324Mo^{-1} \quad (10)$$

$$R=0,9593 \quad W=8,68 \quad Y=7,120947 \quad F=25,95$$

$$B0=11,50-0,000029T_{obr}^2+10,29Cr+35,67Si^2+3,38Ni+106,94Cu+11471,74P^2-0,252Mo^{-1} \quad (11)$$

$$R=0,9863 \quad W=27,87 \quad Y=2,304567 \quad F=112,32$$

$$B1=-0,027-0,014Cr-0,108Si^2-0,0043Ni^2+0,01Cu^{-1}-64,74S^2+0,27Al-0,2Mo^2 \quad (12)$$

$$R=0,9318 \quad W=5,62 \quad Y=0,014059 \quad F=18,82$$

$$B2=0,0000027-0,000014C^2+0,0000048Cr+0,000015Si^2+0,0000062Ni^2-0,0000098Cu^{-1}+0,00032P \quad (13)$$

$$R=0,9138 \quad W=4,71 \quad Y=0,00000018 \quad F=17,71$$

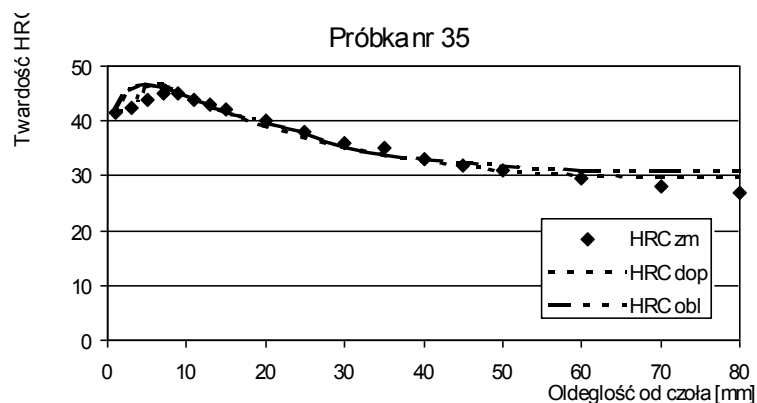
$$B3=-2,43+22,27t_{obr}^{-1}-11,4C^2+2,68Cr+6,05Mn+8029,78P^2-6670,55S^2-398,34Al^2-6,14Mo^2 \quad (14)$$

$$R=0,9220 \quad W=4,70 \quad Y=0,687819 \quad F=13,47$$

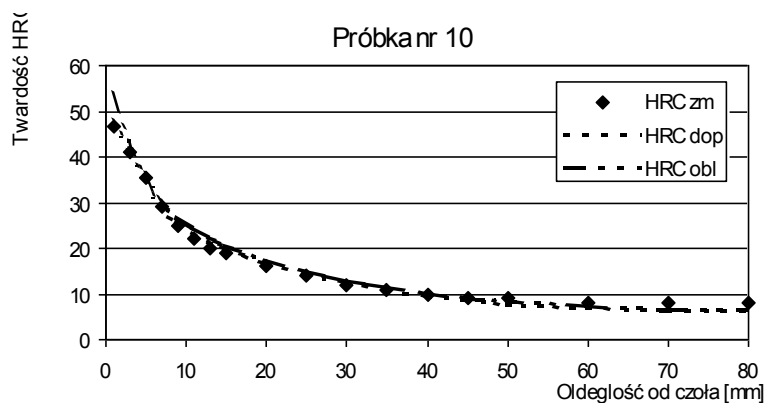
5. WNIOSKI

Spośród wyników uzyskanych dla 31 próbek wybrano dwie, dla których wyniki zostały przedstawione graficznie. Rys 1 przedstawia krzywe hartowności próbki, dla której uzyskano największą różnicę pomiędzy zmierzoną krzywą hartowności i krzywą hartowności wyznaczoną na podstawie opracowanych zależności i obliczeń

symulacyjnych. Rys 2 przedstawia krzywe hartowności próbki, dla której różnica ta była najmniejsza.



Rys. 1. Krzywe hartowności próbki 35
Fig. 1. Hardness curve of test piece no 35



Rys. 2. Krzywe hartowności próbki 10
Fig. 2. Hardness curve of test piece no 10

Podstawowymi danymi materiałowymi niezbędnymi do przeprowadzenia symulacji rozkładu pól twardości po hartowaniu, na przekroju dowolnego staliwnego odlewu grubościennego są:

- dane termofizyczne materiału, użyte do obliczeń cieplnych,
- zależności jednoznacznie wiążące twardość z kinetyką stygnięcia.

Na podstawie wyników badań można wyciągnąć następujące wnioski:
Postać funkcyjnej zależności twardości od kinetyki stygnięcia została prawidłowo dobrana, o czym świadczą wysokie wartości współczynników korelacji doboru wartości jej parametrów Tabela 4.

Wprowadzone uproszczenia obliczeniowe w procesie wyznaczania parametrów termofizycznych nie generują żadnych grubszych błędów.

Uzyskane w wyniku próby uogólnienia wyników badań, zależności od (2) do (14) posiadają bardzo wysokie parametry statystyczne ich wyznaczenia pkt. 4. Co przemawia za kontynuacją badań i rozwojem opracowanej metody. Dodatkowo przemawiają za tym wyniki weryfikacji tych zależności rysunki 1 i 2.

Zastosowane oznaczenia:

T_p	- temperatura środka przedziału wydzielania ciepła przemany,
Q_s	- jednostkowe ciepło przemiany w temperaturze T_p ,
ΔT	- temperaturowy przedział wydzielania ciepła przemany,
λ_0	- wsp. przewodzenia ciepła w temperaturze 0°C ,
λ_{T_p}	- wsp. przewodzenia ciepła w temperaturze T_p ,
λ_{1000}	- wsp. przewodzenia ciepła w temperaturze 1000°C ,
ρ_0	- gęstość w temperaturze 0°C ,
ρ_{1000}	- gęstość w temperaturze 1000°C ,
C_{p0}	- ciepło właściwe w temperaturze 0°C ,
C_{p1000}	- ciepło właściwe w temperaturze 1000°C ,
R	- wsp. korelacji,
W	- test wiarygodności,
Y	- odchylenie standardowe,
F	- test Fischera.

LITERATURA

- [1] T. Inoune, K. Arimoto: *Development and implementation of CAE system "HEARTS" for heat treatment simulation based on metallo - thermo - mechanics.* JMEP vol. 6, No. 1, 1997, 51.
- [2] T. Reti, L. Horvath, A. Süttyö, J. Felde, R. Kohlheb, T. Bell, D. Duchateau: *Comparative analysis of quenching performance of quenchants using computer simulation.* Mat. Konf. EUROMAT'94 Balatonszeplak vol. 4, 1994, 1315.
- [3] M. Gergely, S. Somogyi: *Computers in steel selection and heat treatment.* Mat. Konf. EUROMAT'94 Balatonszeplak vol. 4, 1994, 1291.
- [4] J. Miettinen: *Calculation of solidification related thermophysical properties for steels.* Metallurgical and Materials Transactions vol. 28B, 1997, 281.
- [5] J. Miettinen: *Simple semiempirical model for prediction of austenite decomposition and related heat release during cooling of low alloyed steels.* Ironmaking and Steelmaking vol. 23 no 4 1996, 346.

- [6] J. Miettinen, S. Louhenkirpi: *Calculation of thermophysical properties of carbon and low alloyed steels for modeling of solidification processes*. Metallurgical And Materials Transaction, vol. 25B, 1994, 909.
- [7] D. Bartocha, S. Jura: *Computer simulation of field of hardened steel casting*. M²E'2000, Gliwice 2000, 39.
- [8] D. Bartocha, S. Jura: *A simply method determination data indispensably for computer simulation of hardened*. KMiS vol. 2, no 44, 2000, 23.
- [9] S. Jura i in.: *Zmodyfikowana próba Jominy "J-M."* KMiS 32, PAN Katowice, 1997, 178

**DEPENDENCE OF HRC=F (S) FUNCTION'S PARAMETERS AND THERMO
PHYSICAL PROPERTIES ON CHEMICAL COMPOSITIONS
OF CAST STEEL**

SUMMARY

In this study the try of work out the equations, which make possibility data determination (thermal and physical properties and parameters of cooling kinetic dependent hardness function) based on cast steel's chemical composition has been described. These data make possibility computer simulation of hardness field in quenched cast steel casting.

Recenzował Prof. Józef Gawroński