2/15

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

WPŁYW SZYBKOŚCI STYGNIĘCIA NA WŁASNOŚCI TERMOFIZYCZNE STALIWA W STANIE STAŁYM

D. BARTOCHA[1]
Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych
Zakład Odlewnictwa Politechniki Śląskiej
ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono analizę wyników badań wpływu szybkości stygnięcia na charakterystyki temperaturowe fizycznych własności staliwa w stanie stałym. Wyznaczono własności termofizyczne sześciu staliw, chłodzonych w trzech ośrodkach o różnej zdolności odbierania ciepła, metodą opisaną w pracy [1], następnie wyznaczono funkcyjne zależności współczynnika przewodzenia ciepła, ciepła właściwego i ciepła przemiany od temperatury i szybkości stygnięcia.

Key words: cast steel, thermo-physical properties, cooling rate.

1. WSTĘP

Podstawą poprawności komputerowej symulacji przepływu ciepła jest poprawne zdefiniowanie modelu numerycznego, czyli użyta metoda dyskretyzacji (siatkowania), definiowanie geometrii i materiałów, warunki początkowe i brzegowe, własności cieplne materiałów. Na większość tych elementów w systemach symulacyjnych użytkownik nie ma w ogóle wpływu lub jego wpływ jest bardzo ograniczony. Większość obecnie stosowanych kodów symulacyjnych posiada „otwarte" bazy danych materiałowych, dostępne do edycji przez użytkownika, takie podejście w połączeniu z coraz bardziej rozwiniętymi narzędziami służącymi do post – procesingu dane termofizyczne materiałów mogą być wyznaczane poprzez rozwiązanie klasycznego zagadnienia odwrotnego. Uzyskane w ten sposób parametry są nazywane efektywnymi bądź zastępczymi [2] i nie mogą stanowić uniwersalnych danych termofizycznych danego materiału. W pracy podjęto próbę funkcyjnego opisu danych fizycznych staliwa

[1] *dr inż. dariusz.bartocha@polsl.pl*

w zależności od temperatury i szybkości stygnięcia, co pozwoli zwiększyć uniwersalność danych materiałowych, nawet tych wyznaczonych w prostym eksperymencie połączonym z rozwiązaniem zagadnienia odwrotnego.

2. BADANIA WŁASNE

W ramach pracy wykonano badania sześciu staliw, o składzie chemicznym przedstawionym w tabeli 1, wyznaczając, metodą opisaną w pracy [1], charakterystyki temperaturowe podstawowych właściwości cieplnych badanych stopów tj. ciepła właściwego, współczynnika przewodzenia ciepła i ciepła przemiany w stanie stałym. Charakterystyki te wyznaczone zostały dla trzech różnych warunków chłodzenia wymuszonych zastosowaniem mediów chłodzących w postaci wody, oleju hartowniczego i powietrza. W rezultacie otrzymano zestaw trzech charakterystyk temperaturowych każdej właściwości cieplnej charakteryzujący daną właściwość dodatkowo w funkcji warunków chłodzenia, a po prostym przeliczeniu krzywych stygnięcia w funkcji szybkości stygnięcia. Otrzymane zbiory danych w postaci:

wartość właściwości cieplnej – temperatura – szybkość stygnięcia

charakteryzujące każdą z trzech właściwości cieplnych badanych staliw. Zbiory średnio zawierające ok. 5000 przypadków, poddano analizie statystycznej poszukując metodą regresji wielokrotnej postaci i wartości parametrów funkcji:

właściwość cieplna = f(T,VS).

Tabela 1. Skład chemiczny badanych staliw
Table 1. Chemical composition of tested cast steels

Lp.	Oznaczenie	C[%]	Cr[%]	Si[%]	Ni[%]	Mn[%]	Cu[%]	P[%]	S[%]	Al[%]	Mo[%]
1	GS30Mn5	0,31	0,24	0,42	0,24	1,27	0,18	0,013	0,008	0,025	0,04
2	L35GSM	0,3	0,08	0,7	0,01	1,32	0,08	0,022	0,021	0,01	0,28
3	L35HM	0,33	1	0,45	0,24	0,66	0,17	0,013	0,007	0,032	0,25
4	L70H2GNM	0,66	1,7	0,53	0,73	0,9	0,17	0,021	0,009	0,029	0,35
5	L35GSM-1	0,35	0,21	0,6	0,02	1,28	0,06	0,075	0,024	0,06	0,34
6	L47HNM	0,48	2,17	0,47	2,11	0,64	0,20	0,010	0,005	0,036	0,34

3. WYNIKI

W wyniku przeprowadzonej analizy uzyskano dla współczynnika przewodzenia ciepła funkcję o następującej ogólnej postaci:

$$\lambda = B0 + B1 \cdot T + B2 \cdot VS + B3 \cdot T^2 + B4 \cdot VS^2$$

o parametrach statystycznych dla poszczególnych staliw przedstawionych w tabeli 2. Szczególne przypadki funkcji i wartości współczynników, dla każdego z badanych staliw przedstawiono poniżej w postaci równań o numerach od (1) do (6).

Tabela 2. Parametry statystyczne funkcji λ=f(T,VS)
Table 2.Staistical parameters of λ=f(T,VS) function

Staliwo	p B0	p B1	p B2	p B3	p B4	R	p	Y	F
GS35Mn5	<<0,05	<<0,05	<<0,05	<<0,05	<<0,05	0,612	<<0,05	5,4	755,43
L35GSM-1	<<0,05	<<0,05	<<0,05	<<0,05	<<0,05	0,872	<<0,05	3,9	2665,8
L35GSM	<<0,05	<<0,05	<<0,05	<<0,05	<<0,05	0,732	<<0,05	7,3	1612,6
L35HM	<<0,05	-	<<0,05	<<0,05	<<0,05	0,431	<<0,05	11,3	434,8
L47HMN	<<0,05	<<0,05	-	<<0,05	$2{,}7\cdot10^{-7}$	0,609	<<0,05	12,3	658,7
L70H2GNM	<<0,05	<<0,05	<<0,05	<<0,05	<<0,05	0,974	<<0,05	0,7	32204
gdzie: p – poziom istotności, R – współczynnik korelacji, Y – odchylenie standardowe, F – test Fischer'a.									

GS35Mn5 — $\lambda(T,VS) := 46.509 - 0.049\cdot T - 1.152\cdot VS + 4.1\cdot 10^{-5}\cdot T^2 + 0.042\cdot VS^2$ (1)

L35GSM-1 — $\lambda(T,VS) := 31.081 - 0.089\cdot T + 1.021\cdot VS + 1.09\cdot 10^{-4}\cdot T^2 - 0.009\cdot VS^2$ (2)

L35GSM — $\lambda(T,VS) := 54.389 - 0.132\cdot T - 1.046\cdot VS + 1.33\cdot 10^{-4}\cdot T^2 + 0.035\cdot VS^2$ (3)

L35HM — $\lambda(T,VS) := 36.058 + 0\cdot T - 1.834\cdot VS - 2.8\cdot 10^{-5}\cdot T^2 + 0.051\cdot VS^2$ (4)

L47HMN — $\lambda(T,VS) := 35.859 - 0.031\cdot T - 0\cdot VS + 8.03\cdot 10^{-5}\cdot T^2 + 0.003\cdot VS^2$ (5)

L70H2GNM — $\lambda(T,VS) := 24.167 + 0.017\cdot T + 0.205\cdot VS + 3.48\cdot 10^{-6}\cdot T^2 - 0.004\cdot VS^2$ (6)

Dla ciepła właściwego uzyskano funkcję o następującej ogólnej postaci:

$$Cp = B0 + B1\cdot T + B2\cdot VS$$

o parametrach statystycznych dla poszczególnych staliw przedstawionych w tabeli 3. Szczególne przypadki funkcji i wartości współczynników, dla każdego z badanych staliw przedstawiono poniżej w postaci równań o numerach od (7) do (12).

Tabela 3. Parametry statystyczne funkcji Cp=f(T,VS)
Table 3.Staistical parameters of Cp=f(T,VS) function

Staliwo	p B0	p B1	p B2	R	p	Y	F
GS35Mn5	<<0,05	<<0,05	$2{,}3\cdot10^{-5}$	0,922	<<0,05	73,7	14442
L35GSM-1	<<0,05	$2\cdot10^{-13}$	$1{,}3\cdot10^{-13}$	0,167	<<0,05	28,7	48,3
L35GSM	<<0,05	<<0,05	<<0,05	0,941	<<0,05	4,8	21624
L35HM	<<0,05	<<0,05	<<0,05	0,988	<<0,05	1,4	117400
L47HMN	<<0,05	<<0,05	$4{,}9\cdot10^{-40}$	0,935	<<0,05	8,9	11754
L70H2GNM	<<0,05	<<0,05	<<0,05	0,945	<<0,05	1,2	28581
gdzie: p – poziom istotności, R – współczynnik korelacji, Y – odchylenie standardowe, F – test Fischer'a.							

GS35Mn5 — $Cp(T,VS) := 584.641 - 0.35\cdot T + 0.022\cdot VS$ (7)

L35GSM-1 — $Cp(T,VS) := 503.89 + 0.014\cdot T - 0.561\cdot VS$ (8)

L35GSM — $Cp(T,VS) := 472.422 + 0.071 \cdot T + 0.656 \cdot VS$ (9)

L35HM — $Cp(T,VS) := 498.663 + 0.054 \cdot T - 0.118 \cdot VS$ (10)

L47HMN — $Cp(T,VS) := 469.218 - 0.099 \cdot T + 0.291 \cdot VS$ (11)

L70H2GNM — $Cp(T,VS) := 479.079 + 0.023 \cdot T - 0.136 \cdot VS$ (12)

Dla ciepła przemiany uzyskano funkcję o następującej ogólnej postaci:

$$Qp = \left(B1 \cdot T + B2 \cdot T^2 + B3 \cdot T^3 + B4 \cdot VS^2\right)^2$$

o parametrach statystycznych dla poszczególnych staliw przedstawionych w tabeli 4. Szczególne przypadki funkcji i wartości współczynników, dla każdego z badanych staliw przedstawiono poniżej w postaci równań o numerach od (13) do (18).

Tabela 4. Parametry statystyczne funkcji Qp=f(T,VS)
Table 4.Staistical parameters of Qp=f(T,VS) function

Staliwo	p B1	p B2	P B3	p B4	R	p	Y	F
GS35Mn5	$2{,}2 \cdot 10^{-16}$	0,04	$1{,}8 \cdot 10^{-5}$	$2{,}9 \cdot 10^{-15}$	0,4672	<<0,05	6,02	345,8
L35GSM-1	$9{,}3 \cdot 10^{-8}$	$1{,}4 \cdot 10^{-14}$	$1{,}8 \cdot 10^{-11}$	$9{,}8 \cdot 10^{-7}$	0,4663	<<0,05	4,3	225,6
L35GSM	$1{,}7 \cdot 10^{-36}$	$2{,}2 \cdot 10^{-8}$	$6{,}9 \cdot 10^{-31}$	$8{,}9 \cdot 10^{-17}$	0,6238	<<0,05	6,2	874,9
L35HM	<<0,05	-	-	$4{,}5 \cdot 10^{-6}$	0,3025	<<0,05	3,7	282,2
L47HMN	<<0,05	<<0,05	-	-	0,5183	<<0,05	5,3	608,6
L70H2GNM	<<0,05	<<0,05	<<0,05	0,0009	0,6684	<<0,05	7,2	1302,2
gdzie: p – poziom istotności, R – współczynnik korelacji, Y – odchylenie standardowe, F – test Fischer'a.								

GS35Mn5 — $Qp(T,VS) := \left(0.011 \cdot T + 1.16 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 2.3 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 - 0.006 \cdot VS^2\right)^2$ (13)

L35GSM-1 — $Qp(T,VS) := \left(-0.008 \cdot T + 3.86 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 2.8 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 - 0.0011 \cdot VS^2\right)^2$ (14)

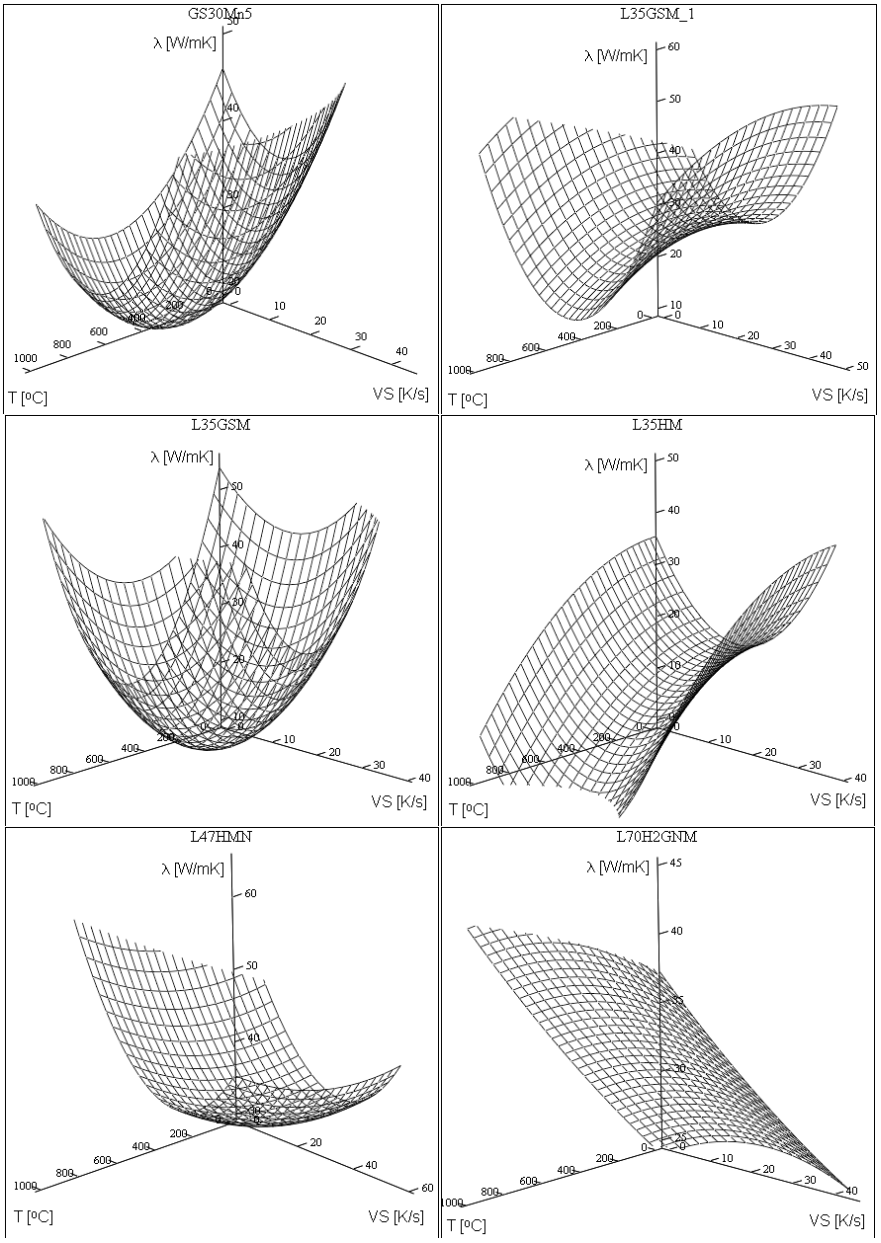
L35GSM — $Qp(T,VS) := \left(0.017 \cdot T + 3.37 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 6.8 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 - 0.0059 \cdot VS^2\right)^2$ (15)

L35HM — $Qp(T,VS) := \left(0.004 \cdot T + 0 \cdot T^2 + 0 \cdot T^3 - 0.002 \cdot VS^2\right)^2$ (16)

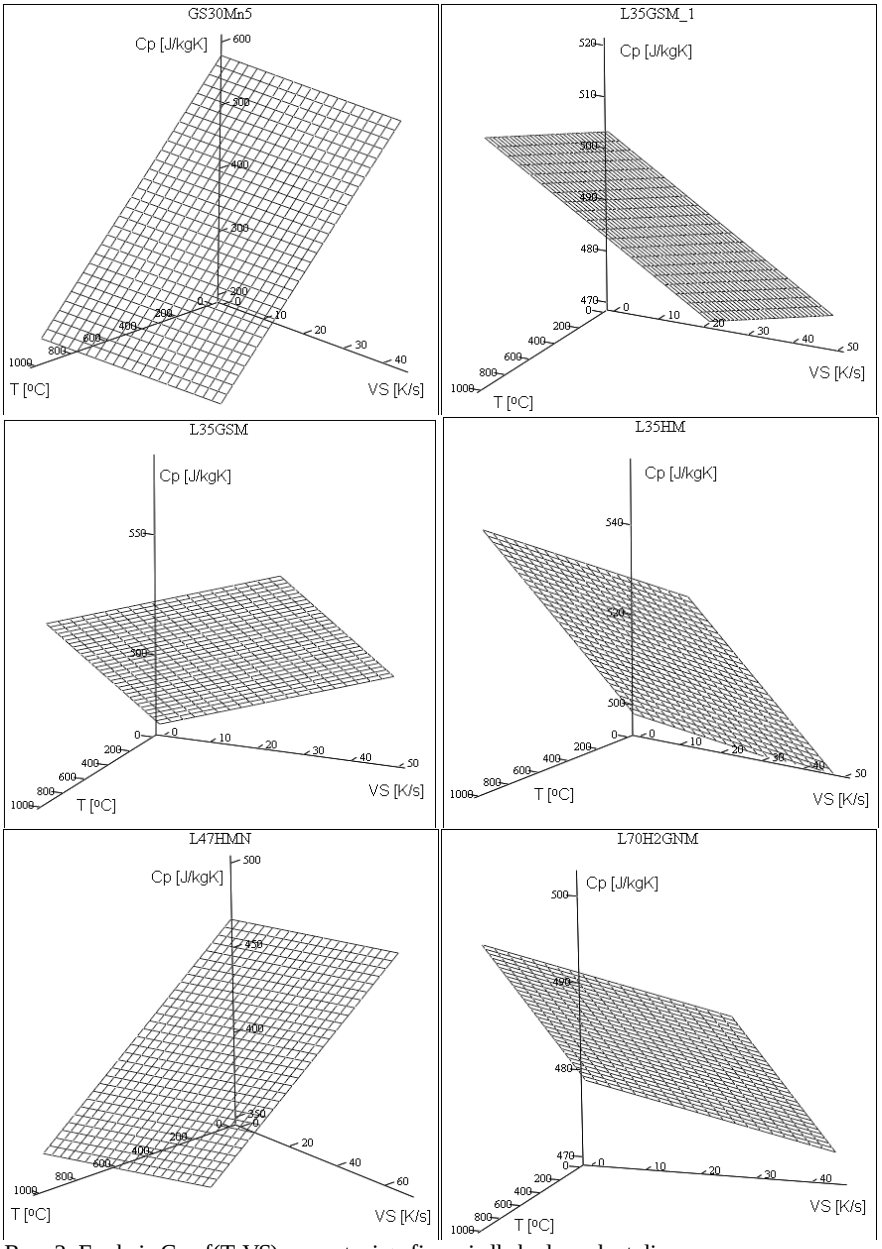
L47HMN — $Qp(T,VS) := \left(0.026 \cdot T - 3.8 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 0 \cdot T^3 + 0 \cdot VS^2\right)^2$ (17)

L70H2GNM — $Qp(T,VS) := \left(0.097 \cdot T - 0.00036 \cdot T^2 + 2.94 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 - 0.0017 \cdot VS^2\right)^2$ (18)

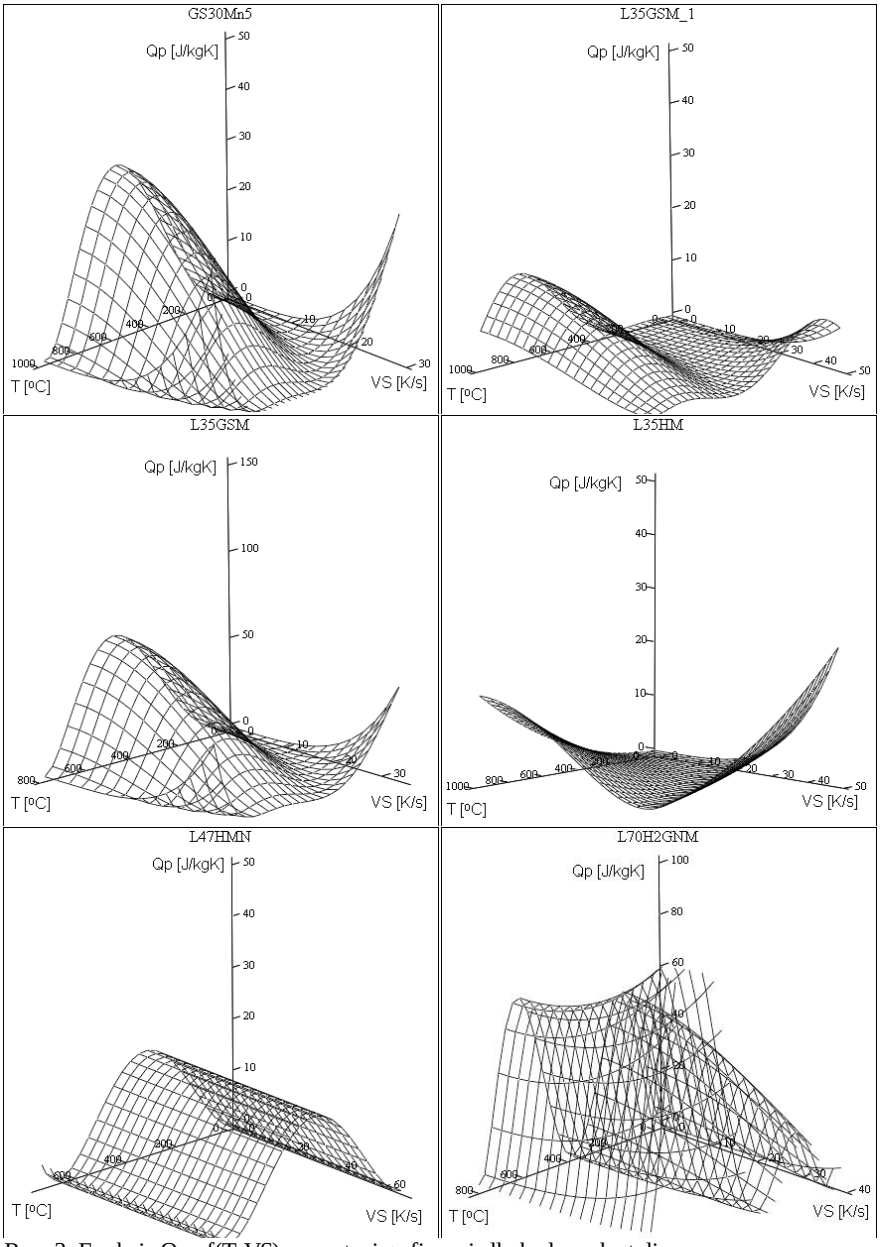
Wszystkie przedstawione powyżej zależności zaprezentowano w postaci graficznej na trójwymiarowych wykresach składających się na rysunki 1 – 3.



Rys. 1. Funkcja λ=f(T,VS) w postaci graficznej dla badanych staliw.
Fig. 1. Graphic form of function λ=f(T,VS) for tested cast steels.



Rys. 2. Funkcja Cp=f(T,VS) w postaci graficznej dla badanych staliw.
Fig. 2. Graphic form of function Cp=f(T,VS) for tested cast steels.



Rys. 3. Funkcja Qp=f(T,VS) w postaci graficznej dla badanych staliw.
Fig. 3. Graphic form of function Qp=f(T,VS) for tested cast steels.

4. PODSUMOWANIE

Parametry statystyczne wyznaczenia funkcji λ=f(T,VS), Cp=f(T,VS) i Qp=f(T,VS) wskazują na silną zależność właściwości fizycznych staliwa od temperatury i szybkości stygnięcia. Dopasowanie dla wszystkich badanych staliw, o zróżnicowanym składzie chemicznym, zależności o jednakowej postaci świadczy o zbliżonym charakterze wpływu temperatury i szybkości stygnięcia na poszczególne właściwości fizyczne. Zastanawiające natomiast są duże różnice w wartościach i charakterze wpływu („+" „-") poszczególnych współczynników wyznaczonych zależności, czego wynikiem są duże różnice widoczne na trójwymiarowych wykresach będących graficznymi obrazami wyznaczonych funkcji. W wyjaśnieniu tych różnic pomocne mogą być dalsze badania staliw o bardziej zróżnicowanym składzie chemicznym i analiza wpływu poszczególnych pierwiastków wchodzących w skład staliw na zaistniałe różnice, czyli wartości współczynników funkcji λ=f(T,VS), Cp=f(T,VS) i Qp=f(T,VS).

LITERATURA

[1] D. Bartocha: *Zależność własności termofizycznych od szybkości stygnięcia*. Archiwum Odlewnictwa rocznik 3, nr 9, Gliwice 2003.
[2] Ignaszak Z.: *Virtual prototyping w odlewnictwie. Bazy danych i walidacja*. Wyd. Pol. Pozn., Poznań 2002.
[3] D. Bartocha, S. Jura: *Cechy ogólne charakterystyk temperaturowych własności fizycznych staliwa*. Archiwum Odlewnictwa rocznik 3, nr 9, Gliwice 2003.

INFLUENCE OF COOLING RATE ON THERMO-PHYSICAL PROPERTIES OF CAST STEEL IN SOLID STATE

SUMMARY

Analysis of research results of cooling rate influence on thermo-physical properties of cast steel in solid has been presented. Thermo-physical properties for six cast steels cooling in three mediums with different cooling power have been determined with method described in work [1], next dependences of thermal conductivity coefficient, specific heat and heat of transition from temperature and cooling rate have been also determined.

Recenzował prof. Jan Szajnar