



POLISH ACADEMY OF SCIENCES - COMMITTEE OF MATERIALS SCIENCE
SILESIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY OF GLIWICE
INSTITUTE OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
ASSOCIATION OF ALUMNI OF SILESIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Conference
Proceedings

12th INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE

ACHIEVEMENTS IN MECHANICAL & MATERIALS ENGINEERING

Własności fizyczne staliwa w stanie stałym w funkcji temperatury i szybkości stygnięcia

D. Bartocha

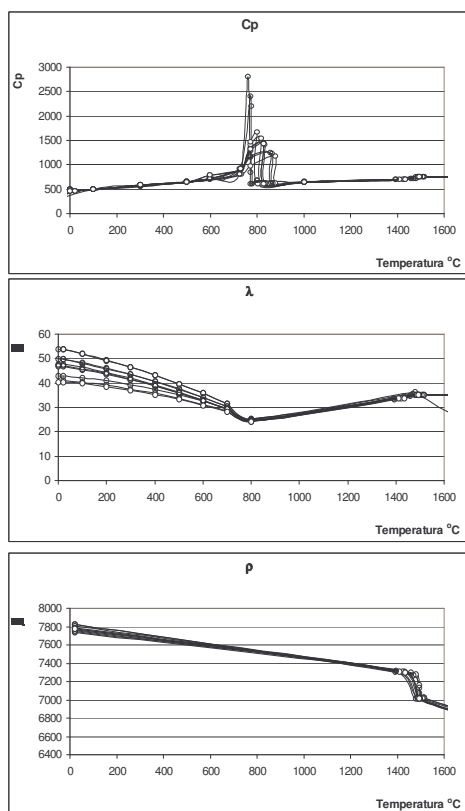
Zakład Odlewnictwa Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych. Wydział Mechaniczny Technologiczny Politechniki Śląskiej
ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice, Polska

W artykule opisano wstępne badania wpływu szybkości stygnięcia na wartości własności fizycznych staliwa w stanie stałym i kształt ich charakterystyk temperaturowych. Na podstawie analizy danych termofizycznych staliwa wykorzystywanych w programach symulacyjnych określono ich cechy charakterystyczne oraz zaproponowano prosty i jednolity sposób definiowania charakterystyk temperaturowych własności fizycznych w zakresie temperatur 0 – 1000°C. Zaproponowany model stał się podstawą do próby określenia wpływu szybkości stygnięcia na wartości i przebieg charakterystyk temperaturowych własności fizycznych staliwa.

1. CECHY OGÓLNE CHARAKTERYSTYK TEMPERATUROWYCH DANYCH FIZYCZNYCH STALIWA

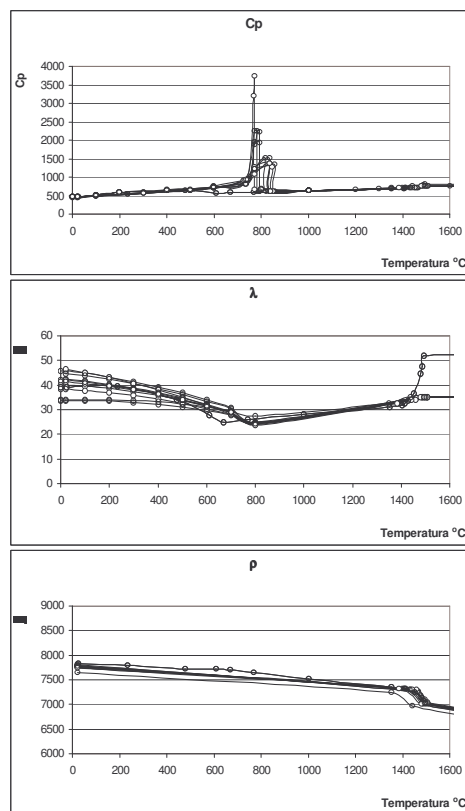
Większość odlewniczych programów symulacyjnych posiada „otwarte” bazy danych materiałowych. Pozwala to użytkownikowi na edytowanie istniejących danych, a także na wprowadzanie własnych danych termofizycznych zarówno metali (tworzyw odlewniczych) jak i materiałów pomocniczych (masa formierska, materiały izolacyjne, egzotermiczne, materiały ochładzalników itp.). Bazy danych materiałowych uzupełniane są zazwyczaj danymi pochodzącymi z rozwiązań zadań odwrotnych na podstawie zarejestrowanych przebiegów procesów cieplnych zachodzących w rzeczywistych odlewach. Im bardziej złożony obiekt badań i skromniejszy aparat badawczy tym większe prawdopodobieństwo wyedytowania „sztucznych” danych sprawdzających się jedynie w symulacji tego szczególnego przypadku. Przykładem tego rodzaju danych może być zbiór danych termofizycznych zgromadzony w programie ColdCast w ciągu kilku lat użytkowania programu w Zakładzie Odlewnictwa Politechniki Śląskiej. Najczęściej generatorem błędów jest użytkownik programu, zwykle popełniając błędy wynikające z niezajomości zakresu wartości w jakim może się poruszać.

W niniejszej pracy podjęto próbę określenia wspólnych cech własności termofizycznych staliwa i zaproponowano proste i jednolite definiowanie ich charakterystyk temperaturowych oraz określono granice w jakich można przypisywać wartości poszczególnym własnościom termofizycznym.



Rys. 1. Własności termo – fizyczne dziesięciu staliw węglowych – CastCAE

Fig. 1. Thermo-physical properties of ten carbon cast steel – CastCAE

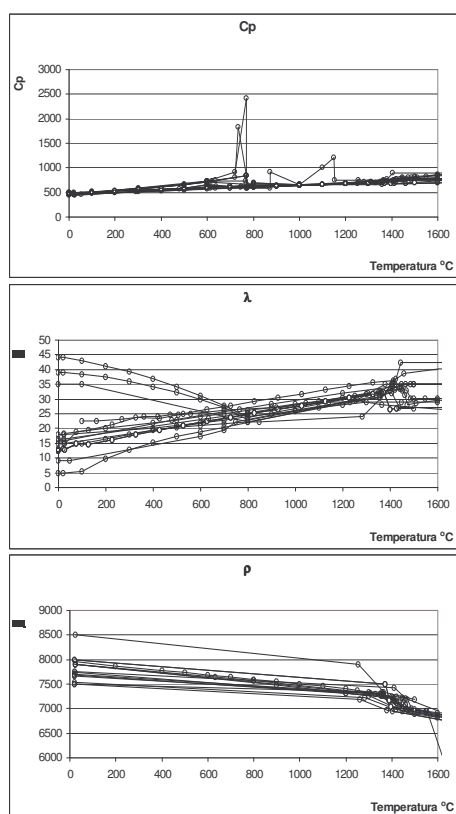


Rys. 2. Własności termo – fizyczne dwunastu staliw stopowych – CastCAE

Fig. 2. Thermo-physical properties of twelve carbon cast steel – CastCAE

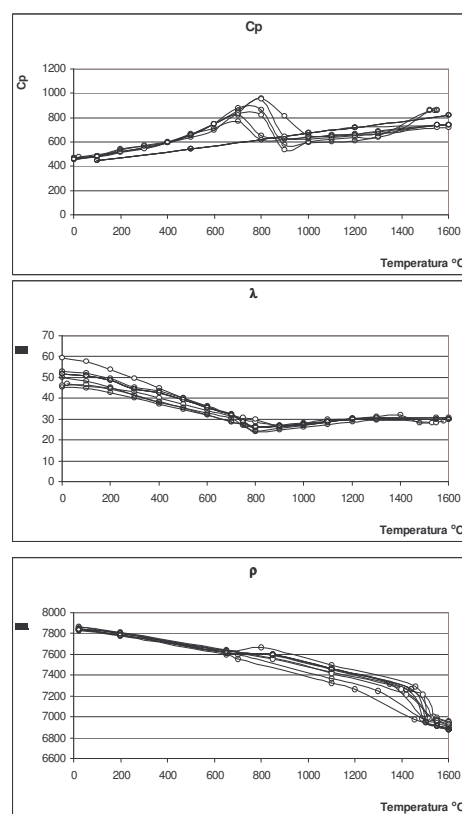
2. ANALIZA DANYCH MATERIAŁOWYCH

W celu określenia ogólnych cech charakterystyk temperaturowych własności fizycznych staliw, zebrano dane termofizyczne z baz danych materiałowych programów Novacast Flow&Solid, CastCAE i ColdCast.



Rys. 3. Własności termo – fizyczne piętnastu staliw odpornych na korozję – CastCAE

Fig. 3. Thermo-physical properties of fifteen corrosion resistant cast steel – CastCAE

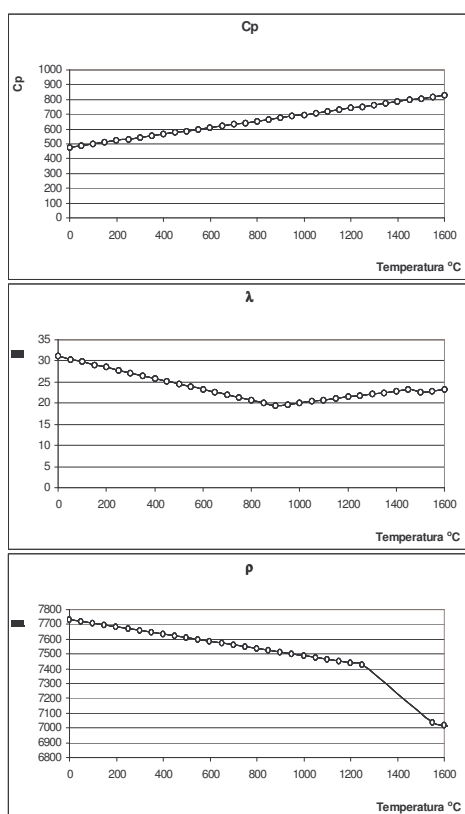


Rys. 4. Własności termo – fizyczne dziesięciu staliw węglowych – NOVA Flow&Solid

Fig. 4. Thermo-physical properties of ten carbon cast steel – NOVA Flow&Solid

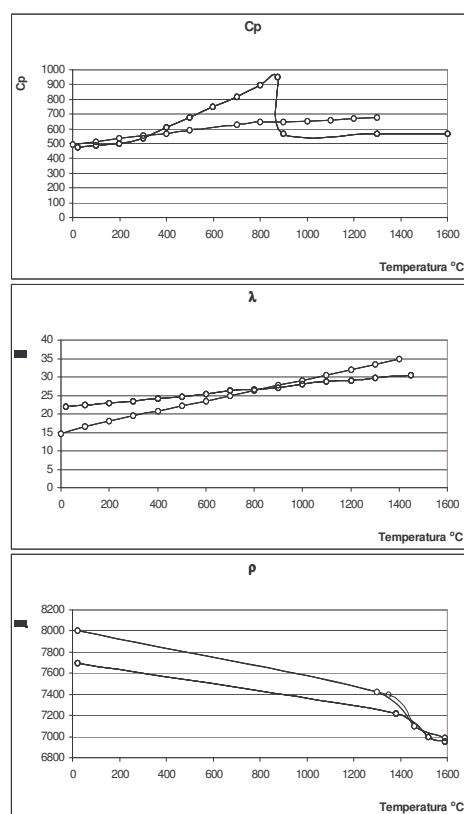
Po analizie szeregu przedstawionych na rysunkach 1 – 6 charakterystyk temperaturowych własności fizycznych staliw o różnym składzie chemicznym założono: liniowy przebieg charakterystyki temperaturowej zmian gęstości, liniowy przebieg zmian współczynnika przewodzenia ciepła w funkcji temperatury od temperatury 0°C do temperatury przemiany, w temperaturze tej założono punkt zmiany monotoniczności charakterystyki i dalszą liniową zmianę współczynnika przewodzenia ciepła od temperatury przemiany do temperatury 1000°C. Charakterystykę zmian wartości ciepła właściwego w zależności od temperatury rozbito na dwie składowe: liniową charakterystykę temperaturową zmian ciepła właściwego oraz charakterystykę wydzielania się ciepła przemiany w funkcji temperatury. Jako najbardziej optymalny przyjęto „trójkątny” charakter wydzielania się ciepła przemiany. Jednocześnie zakres wartości na osi wartości jest zakresem wartości jakie mogą przyjmować poszczególne dane z zachowaniem ogólnych cech charakterystyk.

Powyższe założenia dotyczące wartości charakterystycznych i przebiegu charakterystyk temperaturowych danych fizycznych staliwa zaimplementowano w autorskim programie symulacyjnym (rysunek 10) używanym do wyznaczania kompletu danych termofizycznych staliwa w rozwiązaniu klasycznego zadania odwrotnego.



Rys. 5. Własności termo – fizyczne sześciu stali stopowych – NOVA Flow&Solid

Fig. 5. Thermo-physical properties of six alloy cast steel – NOVA Flow&Solid



Rys. 6. Własności termo – fizyczne ośmiu stali chromowych – NOVA Flow&Solid

Fig. 6. Thermo-physical properties of eight chromium cast steel – NOVA Flow&Solid

3. DANE TERMOFIZYCZNE STALIWA W FUNKCJI SZYBKOŚCI STYGNIĘCIA

Dane termofizyczne wykorzystywane do symulacji komputerowych procesów przepływu ciepła to najczęściej proste charakterystyki temperaturowe. Całkowicie pomija się w nich (z wyjątkiem specjalistycznych programów do obróbki cieplnej) wpływ szybkości stygnięcia na własności fizyczne, które ściśle związane są ze strukturą, a ta jak wiadomo zmienia się w trakcie przemian fazowych determinowanych szybkością stygnięcia. Wpływ szybkości stygnięcia na kształt charakterystyk danych termofizycznych w swoich algorytmach obliczeniowych przedstawia Miettinen [1,2,3] Algorytmy te bazują na modelach IDS i ADC i służą do obliczeń własności termofizycznych stali, wykorzystywanych do symulacji krzepnięcia i stygnięcia odlewów. Pozwalają jednak wyznaczyć własności termofizyczne staliwa w bardzo szerokim zakresie temperatury $<25;1600>^{\circ}\text{C}$. Model IDS (Interdendritic Solidification Model) pierwotnie stworzony był w celu symulacji przemian fazowych krzepnięcia niskostopowych nierdzewnych stali o zawartości 16-20%Cr i 8-14%Ni.

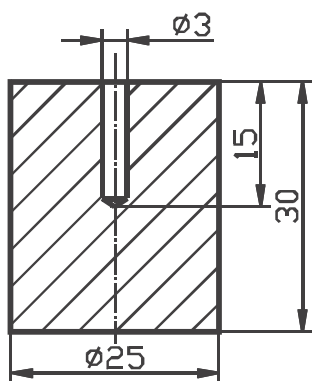
Połączenie modelu IDS z modelem ADC (Austenite Decomposition Model), stworzonego do symulacji rozkładu austenitu na struktury zawierające ferryt i cementyt, znacznie rozszerzyło możliwości ich zastosowania. Obecnie w rezultacie zastosowania modelu IDS otrzymujemy udziały poszczególnych faz (fazy ciekłej, ferrytu, austenitu, cementytu) w funkcji temperatury (dla zakresu temperatur $<1000;1600>^{\circ}\text{C}$). Dalsze obliczenia, aż do temperatury pokojowej, przeprowadzane są w oparciu o model ADC.

Zależności Miettinen'a służą do obliczeń własności termo – fizycznych staliw węglowych, niskostopowych i odpornych na korozję na podstawie ich składu chemicznego i zadanej szybkości stygnięcia.

W niniejszej pracy zaproponowano prostą metodę wyznaczania własności termofizycznych materiałów chłodzonych z różnymi prędkościami, podjęto także próbę opisanie wpływu szybkości stygnięcia na przebieg charakterystyk danych termofizycznych.

3.1. Stanowisko pomiarowe

Kształt próbki oraz stanowisko badawcze przygotowano tak aby zarejestrować krzywe stygnięcia próbek stalowych (rysunek 7) nagrzewanych i austenitizowanych w piecu oporowym i chłodzonych tylko poprzez bezpośrednie oddawanie ciepła do otoczenia, jako które stosowano trzy różne media chłodzące.



Rys. 7. Próbką
Fig. 7. Specimen

Dzięki czemu w obliczeniach można było zastosować tylko współczynnik wnikania ciepła do otoczenia i jest to jedyna wielkość charakteryzująca oddawanie ciepła przez próbkę. W geometrycznym (cieplnym) centrum próbki umieszczano termoelement Ni-NiCr, podłączony do przetwornika i komputera, próbki umieszczane były w piecu w „koszyku” wykonanym z drutu $\phi 0.5\text{mm}$ i tak też próbki były chłodzone w powietrzu, oleju hartowniczym i wodzie.

Wykonano 12 prób rejestrując krzywe stygnięcia próbek odlanych z czterech staliw, skład chemiczny badanych staliw podano w tabeli 1.

Tabela 1.

Skład chemiczny badanych staliw

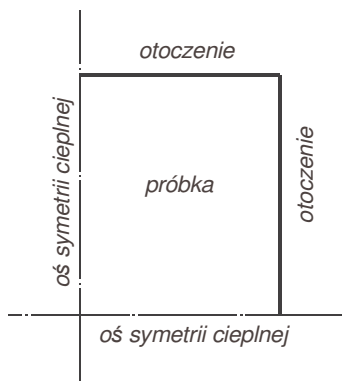
Table 1.

Chemical composition of testing cast steels

Nr próbki	Oznaczenie	Skład chemiczny [%]									
		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

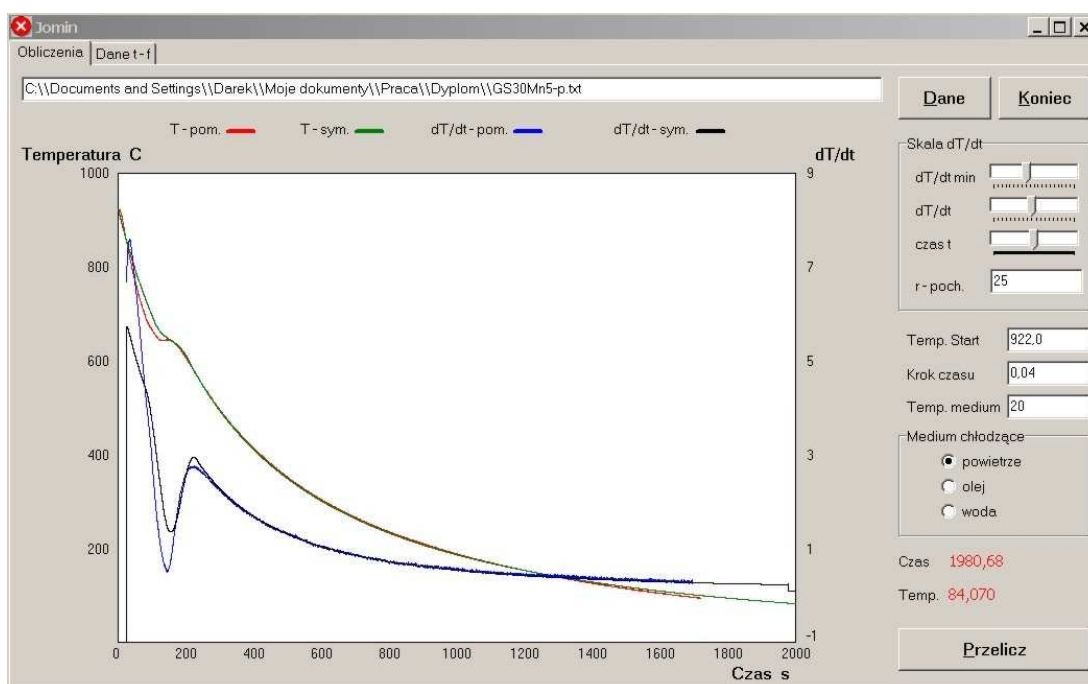
3.2. Wyznaczenie danych termofizycznych

Właściwości termofizyczne badanych staliw wyznaczone były poprzez rozwiązanie klasycznego zadania odwrotnego.



Rys. 8 Model obliczeniowy
Fig. 8. Calculating model

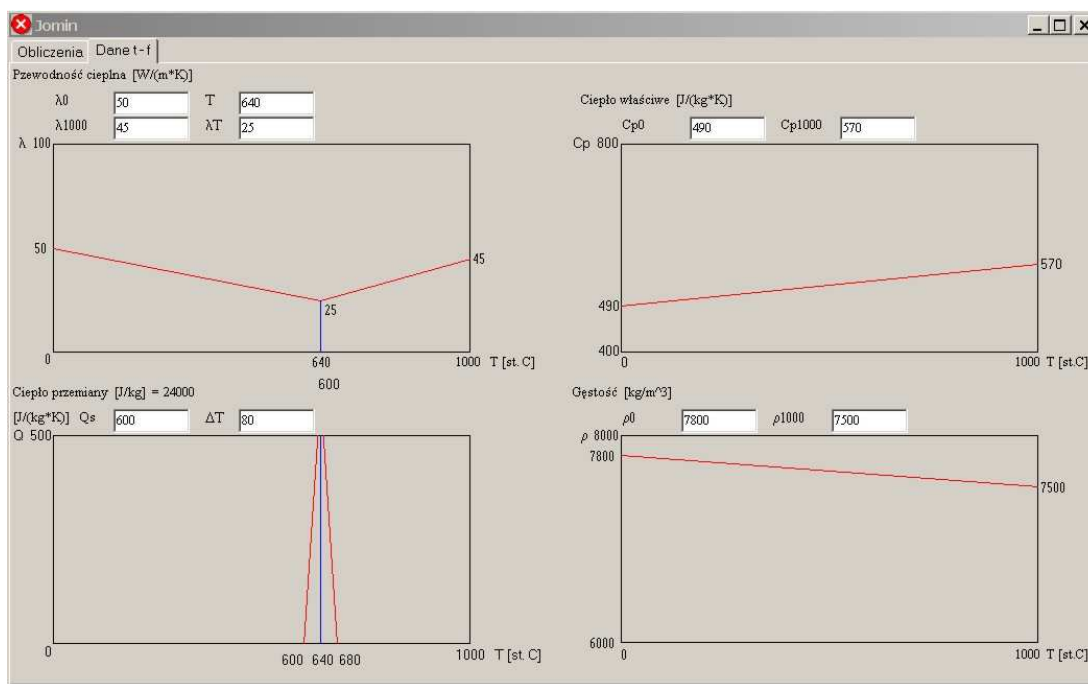
W obliczeniach zamodelowano tylko 1/4 obszaru próbki wykorzystując dwuosiową symetrię cieplną układu, rysunek 8. Do obliczeń wykorzystano autorski program Jomin. W programie istnieje możliwość wyboru medium chłodzącego (otoczenie). Dla poszczególnych mediów: powietrza, oleju i wody na podstawie danych z pracy [4] zaimplementowane zostały wartości współczynnika wnikania ciepła w przedziale temperatury 0 – 1000°C w funkcji temperatury powierzchni próbki odpowiednio: dla powietrza 10 – 100 [W/mK], oleju 80 – 1080 [W/mK], wody 1000 – 2000 [W/mK], a także na podstawie pomiarów prowadzonych w trakcie badań ich temperatury odpowiednio 20, 100, 40°C.



Rys. 9. Główne okno programu Jomin
Fig. 9. Main user interface of Jomin software

Procedura wyznaczenia danych termofizycznych polegała na wczytaniu do programu pliku z zarejestrowaną krzywą stygnięcia próbki, która wyświetlana zostaje na wykresie (rysunek 9) w kolorze czerwonym, następnie na doborze warunków początkowo – startowych, poczym w cyklu obliczeń iteracyjnych na doborze takich wartości charakterystycznych danych termofizycznych, rysunek 10, aby doprowadzić do jak najdokładniejszego „nałożenia”

krzywej obliczeniowej na pomiarową oraz ich pochodnych. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 2.



Rys. 10. Okno edycji danych termofizycznych programu Jomin

Fig. 10. Interface for thermophysical data edition of Jomin software

4. ANALIZA WYNIKÓW I WNIOSKI

Wybrane wyniki badań zamieszczone w tabeli 2 w formie liczbowej przedstawiono w postaci wykresów na rysunkach 11 ÷ 13.

Na podstawie przedstawionych wyników badań można stwierdzić, że dane termofizyczne silnie zależą od szybkości zmian temperatury, Zależność ta szczególnie silnie uwidacznia się w przypadku współczynnika przewodzenia ciepła oraz charakterystyk wydzielania się ciepła przemiany. W przypadku ciepła właściwego, dla staliwa Gs30Mn5 i L35GSM można zauważyć wyższe jego wartości dla próbek chłodzonych z największą prędkością (w wodzie). Zmian gęstości w funkcji szybkości stygnięcia nie stwierdzono, wielkość tych zmian prawdopodobnie jest bardzo mała.

Z przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy wstępnych badań nad wpływem szybkości stygnięcia na przebieg charakterystyk danych termofizycznych wynika, iż taka zależność istnieje i przejawia się z różną siłą dla poszczególnych własności termofizycznych. Wpływ ten różnie przejawia się dla różnych staliw z czego wnioskować należy iż zależy jak i same dane termofizyczne od składu chemicznego staliwa.

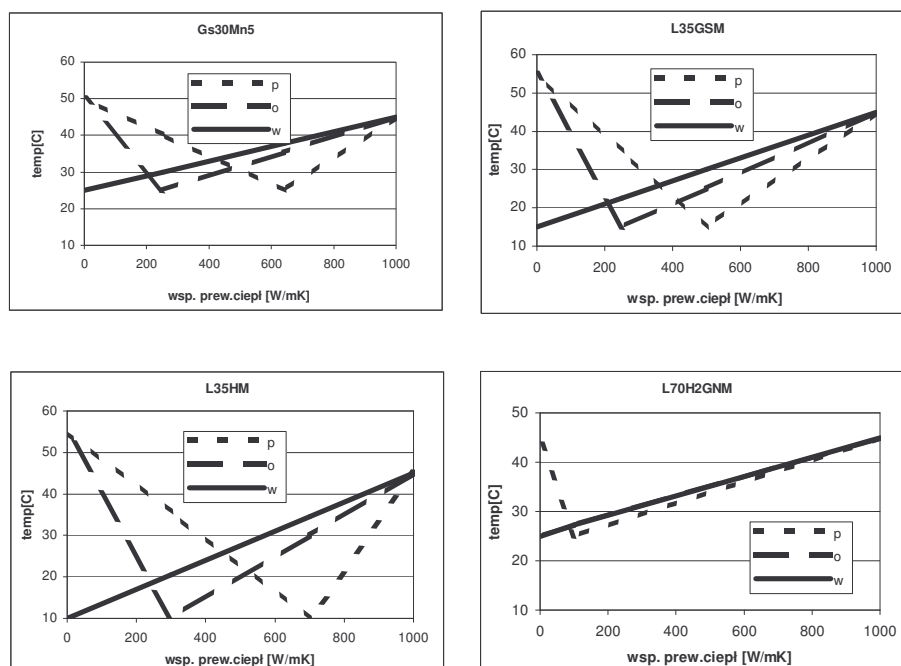
Tabela 2.

Wyznaczone dane termofizyczne badanych materiałów

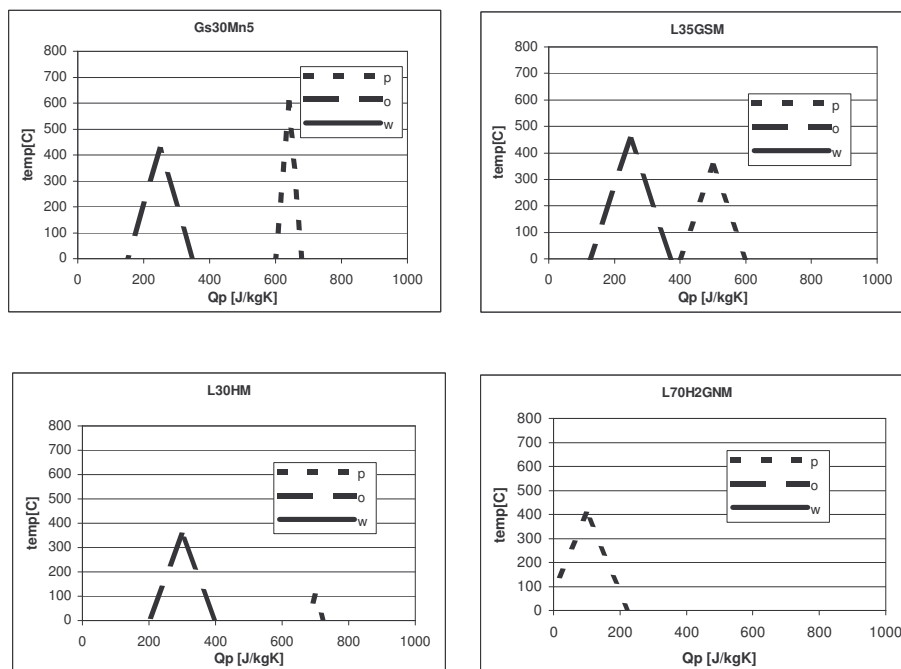
Table 2.

Thermophysical data of testing materials determined

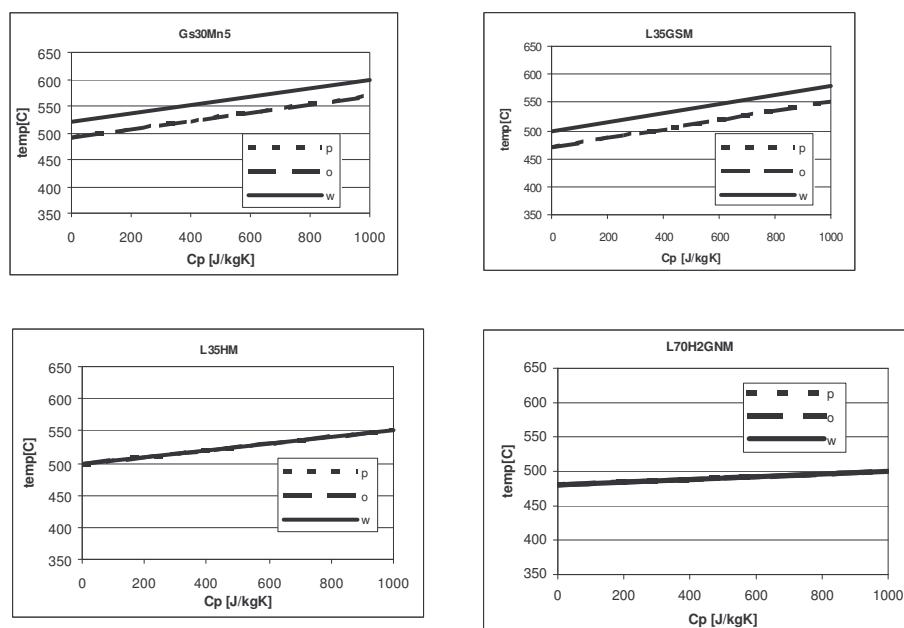
Staliwo	Med.	λ_0	λ_{Tp}	λ_{1000}	T_p	C_{p0}	C_{p1000}	ρ_0	ρ_{1000}	Q_{mp}	ΔT	Q_p	T
Gs30M n5	pow	50	25	45	640	490	570	780 0	7500	600	80	2400 0	920
	olej	50	25	45	250	490	570	780 0	7500	420	200	4200 0	860
	woda	25		45		520	600	780 0	7500	0	0	0	850
L35GS M	pow	55	15	45	500	470	550	780 0	7500	350	200	3500 0	900
	olej	55	15	45	250	470	550	780 0	7500	450	250	5625 0	860
	woda	15		45		500	580	780 0	7500	0	0	0	860
L35HM	pow	55	10	45	700	500	550	780 0	7500	100	50	2500	860
	olej	55	10	45	300	500	550	780 0	7500	350	200	3500 0	860
	woda	10		45		500	550	780 0	7500	0	0	0	860
L70H2 GNM	pow	45	25	45	100	480	500	780 0	7500	400	250	5000 0	920
	olej	25		45		480	500	780 0	7500	0	0	0	900
	woda	25		45		480	500	780 0	7500	0	0	0	890



Rys. 11. Współczynnik przewodzenia ciepła
Fig. 11. Thermal conductivity coefficient



Rys. 12. Ciepło przemiany
Fig. 12. Transformation heat



Rys. 13. Ciepło właściwe
Fig. 13. Specific heat

Fakt istnienia takiego wpływu wymaga uwzględnienia go w bazach danych materiałowych programów symulacyjnych oraz w ich algorytmach obliczeniowych, wartości własności fizycznych zależą nie tylko od temperatury materiału ale także od szybkości jego stygnięcia. Dlatego problematyka przedstawiona w pracy wymaga dalszych badań, które pozwolą określić postać funkcyjnych zależności własności fizycznych materiału od temperatury i kinetyki stygnięcia.

LITERATURA

1. J. Miettinen: Calculation of solidification related thermophysical properties for steels. *Metalurgical and Materials Transactions* vol. 28B, 1997, 281.
2. 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.
3. J. Miettinen, S. Louhenkirpi: Calculation of thermophysical properties of carbon and low alloyed steels for modeling of solidification processes. *Metalurgical And Materials Transaction*, vol. 25B, 1994, 909.
4. N.I. Kobasko, A.A. Moskalenko, G.E. Totten, G.M. Webster: Experimental determination of the first and second critical heat flux densities and quench process characterization. *J.M.E.P.* vol. 6, 1997,93
5. D. Bartocha, S. Jura: Cechy ogólne charakterystyk temperaturowych własności fizycznych staliwa. *Archiwum Odlewnictwa* rocznik 3, nr 9, Gliwice 2003, 15
6. D. Bartocha: Zależność własności termofizycznych od szybkości stygnięcia. *Archiwum Odlewnictwa* rocznik 3, nr 9, Gliwice 2003, 317
7. D. Bartocha, S. Jura: A simply method determination data indispensably for computer simulation of hardened. *KMiS* vol. 2, no 44, 2000, 23
8. S. Ochęduszek: *Teoria maszyn cieplnych. Tablice.* PWT W-wa 1959