

Eksploracja wykresów CTP_i w systemie CAPCAST

The exploitation of TTT diagrams in the CAPCAST system

*Barbara Mrzygłód¹, Anna Adrian¹, Krzysztof Regulski¹, Izabela Olejarczyk-Woźnińska¹,
Stanisława Kluska-Nawarecka²*

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

² Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

¹ AGH University of Science and Technology, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

² Foundry Research Institute, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

E-mail: mrzyglod@agh.edu.pl

Streszczenie

Artykuł stanowi opis działania jednego z modułów systemu CAPCAST, umożliwiającego rekomendację materiałów z żeliwa sferoidalnego, posiadających określone właściwości lub mogących osiągnąć oczekiwane właściwości po przeprowadzeniu odpowiedniej obróbki cieplnej. Podejście opiera się na wykorzystaniu wiedzy zawartej w wykresach CTP_i do określenia warunków obróbki cieplnej, w efekcie której można uzyskać pożądaną mikrostrukturę żeliwa zapewniającą oczekiwane właściwości materiału.

Słowa kluczowe: wykres CTP_i, żeliwo sferoidalne, digitalizacja wykresów, właściwości mechaniczne żeliwa

Abstract

The presented paper is a description of one of the modules of the CAPCAST system which allows determination of recommended materials made of ductile cast iron which show specific properties or may achieve the desired properties after an appropriate heat treatment process. The approach is based on the application of the knowledge developed from the TTT diagrams in order to establish the heat treatment conditions to achieve the desired microstructure of cast iron and thereby the expected properties of the material.

Key words: TTT diagrams, ductile cast iron, diagrams digitalisation, mechanical properties of cast iron

Kontekst systemu CAPCAST

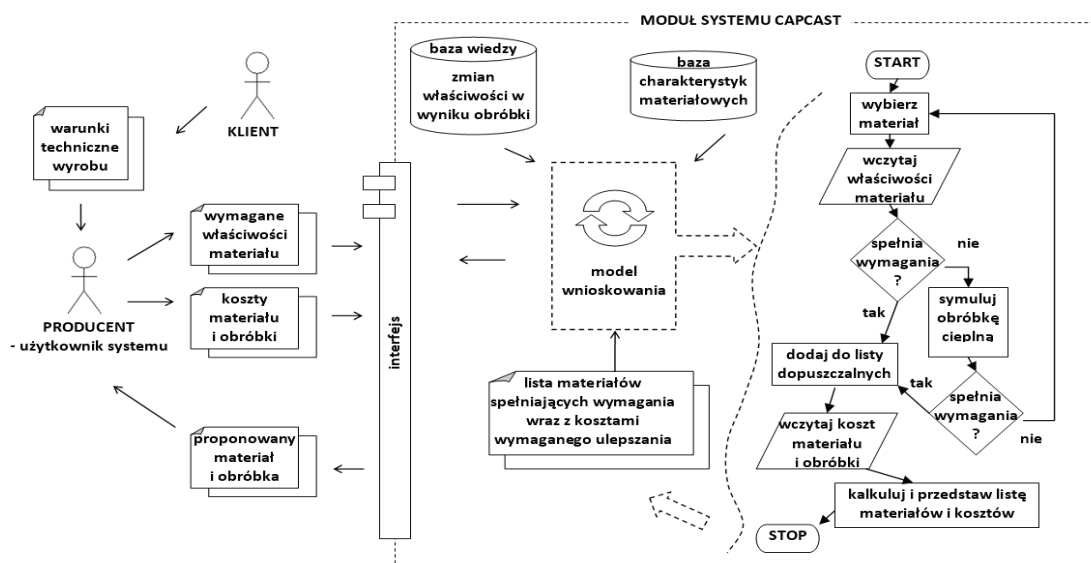
Projektowanie nowych wyrobów lub podnoszenie ich jakości pociąga za sobą wzrost kosztów produkcji. Dobra jakość nie musi jednak oznaczać osiągania najlepszych z możliwych (ekstremalnych) wartości kontrolowanych parametrów wyrobu, ale uzyskanie wartości wymaganych przez odbiorcę bądź właściwe normy. Ważne zatem jest wyznaczenie optymalnego kompromisu pomiędzy jakością wyrobu i jego ceną. Producenci mogą wybierać pomiędzy tworzywami gwarantującymi określone właściwości końcowe wyrobu a tworzywami znacznie tańszymi, ale posiadającymi możliwość osiągania oczekiwanych właściwości po przeprowadzeniu określonej obróbki (np. ulepszania cieplnego). Podjęcie tego typu decyzji wymaga wieloaspektowej analizy danych o materiałach i wiedzy technologicznej. Pomocą

The background of the CAPCAST system

Designing new products or improving their quality triggers an increase of production costs. Good quality does not necessarily mean achieving the best possible (extreme) controllable values of product parameters, but achieving values required by the user, or appropriate standards. Therefore, it is important to reach an optimal compromise between the quality of a product and its price. Producers may select between materials which guarantee specific final properties of a product and materials which are considerably cheaper, but which have the possibility to achieve expected properties after conducting particular treatment (e.g. thermal treatment). Making this type of decision requires a multi-aspect data analysis about materials and technological knowledge. In such a situation priceless help can be found in computer

nie do przecenienia w takiej sytuacji są komputerowe systemy wspomagania decyzji w określonych dziedzinach. Prezentowana praca dotyczy jednego z komponentów hybrydowego systemu wspomagania decyzji CAPCAST, realizowanego w ramach projektu NCN nr N N508 792440. System podpowiada producentowi listę materiałów, które zapewnią zachowanie żądanych warunków technicznych. Wśród nich znajdują się zapewne materiały, które spełniają wymagania już w stanie surowym, a także takie, które spełnią wymagania po obróbce cieplnej. Proponowany model zapewni producentowi narzędzie wspomagające podejmowanie decyzji projektowych – rysunek 1.

decision support systems for different specific fields. The presented paper regards one of components of a hybrid decision support system CAPCAST, which is realised within the project NCN no. N N508 792440. The system prompts the manufacturer with a list of materials which meets the required technical conditions. Among them there will be materials which meet the requirements in the crude state, and also materials which meet the requirements after heat treatment. The proposed model will provide a producer with a design decision support tool – Figure 1.



Rys. 1. Schemat modelu wnioskowania dla modułu materiałowego w systemie CAPCAST [1]

Fig. 1. Schematic model of reasoning for material-related module in the CAPCAST system [1]



Rys. 2. Podstawowe moduły systemu CAPCAST

Fig. 2. Basic modules of the CAPCAST system

Omawiany w tej pracy model wnioskowania stanowi istotny moduł systemu CAPCAST, na który składają się również takie moduły, jak: baza materiałów, otwarta baza producentów, baza modeli obróbki cieplnej, system ekspertowy (rys. 2). Schemat dekompozycji atrybutów i akwizycji danych dla bazy wiedzy systemu CAPCAST przedstawiono na rysunku 3.

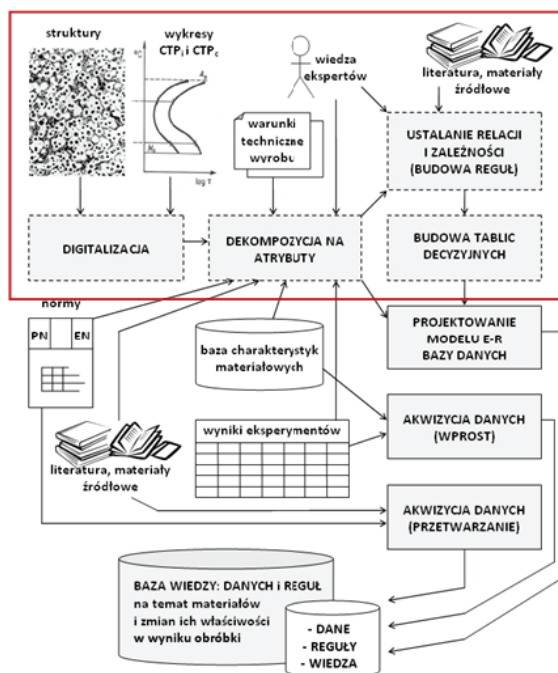
Omawiany w niniejszym artykule moduł CTP realizuje fragment funkcjonalności procesu wnioskowania, wykorzystując wiedzę na temat przemian fazowych zawartą w wykresach CTP_i, poprzez wytypowanie możliwych składów chemicznych wyjścio-

The reasoning model discussed in this paper includes a significant module for the CAPCAST system, which also consists of such modules as: the material base, the open base of cast producers, the base of model heat treatment, the expert system (Fig. 2). The schematic of decomposition of attributes and data acquisition for the CAPCAST knowledge base is presented in Figure 3.

The TTT module presented in this paper executes a fragment of functionality of the reasoning process which utilises knowledge about phase transformations included in TTT diagrams through the selection of possible chemical compositions of initial ductile cast

wego żeliwa sferoidalnego do produkcji żeliwa ADI (*Austempered Ductile Iron*) oraz wytypowanie parametrów obróbki cieplnej (temperatura i czas przemiany) w zależności od podanego przez użytkownika zestawu właściwości mechanicznych. Należy zaznaczyć, że niniejszy moduł działa tylko w oparciu o wykresy CTP_i żeliw zawartych w bazie i tylko te może analizować.

iron used for the production of Austempered Ductile Iron, and the selection of parameters of heat treatment (temperature and time of transformation) in relation to the set of mechanical properties given by the user. It should be stressed that the said module operates only on the basis of TTT diagrams of cast irons in the base and only these may be analysed.



Rys. 3. Schemat dekompozycji atrybutów i akwizycji danych dla bazy wiedzy systemu CAPCAST [1]

Fig. 3. Schematic decomposition of attributes and data acquisition system for the CAPCAST knowledge base [1]

Wykresy CTP

Przeprowadzenie prawidłowej obróbki cieplnej stopów żelaza z węglem wymaga dobrej znajomości procesów rozpadu austenitu zarówno przy chłodzeniu ciągłym (anizotermicznym), jak i w warunkach izotermicznych. Kinetykę i charakter przemian przechłodzonego austenitu zwykle przedstawia się za pomocą wykresów CTP (czas – temperatura – przemiana). W zależności od rodzaju chłodzenia tworzy się wykresy dla przemiany w warunkach izotermicznych – CTP_i lub wykresy dla przemian podczas ciągłego chłodzenia CTP_c. Na wykresach CTP, wyznaczanych eksperymentalnie, w układzie czas i temperatura, podawane są linie początku i końca przemiany austenitu w poszczególne rodzaje struktur. Linie te ograniczają obszary współistnienia austenitu z produktami jego przemiany. Czas rozpoczęcia i zakończenia przemiany odczytuje się poprzez rzutowanie na logarytmiczną skalę czasu punktów przecięcia odpowiedniej prostej poziomej z krzywymi początku i końca przemiany. Wykresy CTP_i wykorzystywane są do określenia optymalnych warunków obróbki cieplnej odlewów, w warunkach chłodzenia izoter-

TTT diagrams

Conducting correct heat treatment of iron-carbon alloys requires comprehensive knowledge of processes of austenite decomposition, both during constant cooling (anisothermal), and under isothermal conditions. Kinetics and the character of phase transformations of overcooled austenite are usually presented with the use of time – temperature – transformation diagrams. Depending on the type of cooling, created are diagrams for the phase transformation under isothermal conditions – TTT, or diagrams for phase transformations during constant cooling CCT. In TTT diagrams, determined experimentally, in the system describing time and temperature, lines are drawn for the start and the end of austenite phase transformations into particular types of structures. The lines limit the areas of the coexistence of austenite with products of its transformation. The start and the end of the transformation is read by projecting on a logarithmic scale intersection points of a particular horizontal straight line with curves of the start and the end of the transformation. TTT diagrams are used to determine optimal conditions for thermal treatment of

micznego, w celu uzyskania pożądanych właściwości mechanicznych.

Istnieje kilka metod badania stopnia rozpadu austenitu, m.in. metoda dylatometryczna oparta na zjawisku zmian objętościowych [2]. Uzyskane dane empiryczne (dyskretnie) nanoszone są w układzie kartezjańskim w postaci punktów i interpolowane krzywą (ciągłą). Tak tworzone wykresy nie mają opisu w postaci funkcji, co stanowi istotny problem podczas implementacji ich w systemie komputerowym.

Moduł CTP dla bazy wiedzy w systemie CAPCAST

Ideą modułu CTP, opracowanego dla systemu CAPCAST, jest identyfikacja, pozyskanie oraz zgromadzenie w jednej bazie wiedzy empirycznych wykresów CTP_i dla żeliwa sferoidalnego o różnych składach chemicznych, dostępnych w literaturze [np. 3–5] oraz opracowanych w ramach projektu. Główną zaletą modułu jest fakt, że zgromadzone wykresy CTP_i dla żeliwa sferoidalnego przechowywane są w postaci stabelaryzowanej. Metodę matematycznego opisu wykresów CTP_i na przykładzie wybranych wykresów dla żeliw sferoidalnych przedstawiono w pracach [6, 7] oraz wykorzystano ją do opisanie zgromadzonych w module CTP systemu CAPCAST wykresów.

Digitalizacja wykresów CTP_i

Równanie kinetyki Johnsona-Mehla (1) jest to cząstkowe rozwiązanie równania prędkości przemiany. Służy do opisu zależności stopnia przemiany austenitu od czasu wytrzymania izotermicznego przy określonej temperaturze. Posłużyło ono do opisu przemian fazowych na wykresach CTP_i. Podstawowa postać równania [8]:

$$y = 1 - \exp(-kt^n) \quad (1)$$

gdzie:

y – jest ułamkiem austenitu przemienionego,

t – czas,

k, n – parametry zależne od temperatury.

Parametry k i n określone są na podstawie dwóch punktów: początku oraz końca przemiany przy danej temperaturze.

W przypadku stali za początek przemiany, przy danej temperaturze, przyjmuje się czas t_p , przy którym ułamek przemienionego austenitu $y_p = 1\%$, za koniec zaś – czas t_k , przy którym $y_k = 99\%$. Natomiast na analizowanych wykresach CTP_i żeliwa sferoidalnego przemiana austenitu nie zachodzi do końca, krzywa początku przemiany odpowiada kryterium $y_p = 1\%$, natomiast zarejestrowana krzywa końca przemiany odpowiada różnej zawartości austenitu zgodnej z analizowanym wykresem CTP_i.

casts under conditions of isothermal cooling in order to achieve required mechanical properties.

There are a few methods to test the degree of austenite decomposition, among others, the dilatometric method based on the phenomenon of volumetric changes [2]. The achieved empirical (discrete) data are placed on a Cartesian coordinate system in the form of points and interpolated with a curve (solid). Diagrams created in this way do not have a description in the form of a function, which is a considerable problem for their implementation in a computer system.

The TTT module for the knowledge base in the CAPCAST system

The idea of the TTT module, developed for the CAPCAST system, is identification, acquisition and collection in one knowledge base empirical TTT diagrams for ductile cast iron with different chemical compositions, which are available from the literature [e.g. 3–5], and developed within the framework of the project. The main advantage of the module is the fact that collected TTT diagrams for ductile cast iron are stored in tabular form. The methodology for the mathematical description of TTT diagrams based on the example of selected diagrams for ductile cast irons is presented in studies [6, 7], and was used to describe diagrams collected in the TTT module of the CAPCAST system.

Digitisation of TTT diagrams

Johnson-Mehl (1) equation for kinetics is a partial solution of the equation of the speed of transformation. It serves as a description of interrelations between the degree of austenite transformation and the time of isothermal holding at a specified temperature. It was used to describe phase transformations in TTT diagrams. The basic form of the equation is [8]:

$$y = 1 - \exp(-kt^n) \quad (1)$$

where:

y – is the fraction of transformed austenite,

t – time,

k, n – parameters which depend on temperature.

Parameters k and n are determined on the basis of two points, the start and the end of the transformation at a given temperature.

In the case of steel, for the start of the transformation, at a given temperature, we assumed time t_p , at which the fraction of transformed austenite $y_p = 1\%$, whereas the end – time t_k , at which $y_k = 99\%$. While in the analysed ductile cast iron TTT diagrams the transformation of austenite does not take place until the end, the transformation start curve meets the criterion

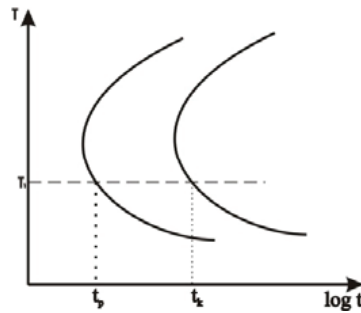
Rys. 4. Schemat wykresu CTP_i

Fig. 4. Schematic TTT diagram

Do wyznaczenia wartości stałych k i n , przy danej temperaturze, wykorzystuje się znajomość współrzędnych dwu punktów: (t_p, y_p) , (t_k, y_k) oznaczających początek i koniec przemiany przy tej temperaturze (przechowywanych w bazie danych w postaci tabelaryzowanej). Do obliczenia wartości parametrów n i k równanie (1) przekształcono do postaci (2) gdzie t_p stanowi określony czas, po którym ułamek przemienionego austenitu wynosi y_p .

$$\ln(k) + n \ln(t_i) = \ln \left(\ln \left(\frac{1}{1 - y_i} \right) \right) \quad (2)$$

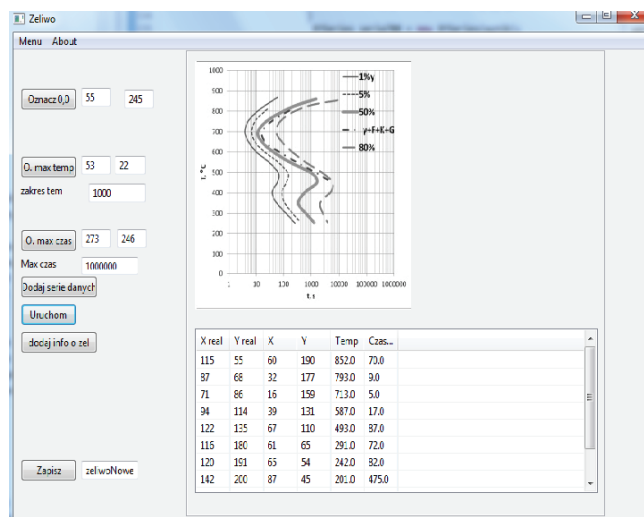
Proces digitalizacji wykresów ciągłych można przeprowadzić, wykorzystując istniejące programy komercyjne, np. SigmaScanPro [11], natomiast w niniejszym opracowaniu, na rysunku 5 pokazano wynik działania autorskiego programu do digitalizacji, stanowiącego podmoduł w systemie CAPCAST. Program ten może zostać wykorzystany do digitalizacji istniejących wykresów CTP_i. W literaturze można znaleźć dużą liczbę wykresów CTP_i opracowanych dla różnych gatunków stali, natomiast dla żeliwa sferoidalnego istnieje ich niewielka liczba. Ze względu na rosnące zainteresowanie przemysłu żeliwem ADI istnieje potrzeba prowadzenia badań zmierzających do optymalizacji procesów jego produkcji, w których pomocnym narzędziem są wykresy CTP_i. Tworząc nowe wykresy, należy uwzględnić fakt, że będą wykorzystywane w komputerowych systemach sterowania procesami obróbki bądź w systemach eksperckich, dlatego już na etapie ich tworzenia warto zadbać o taką ich reprezentację, która łatwo poddaje się automatycznemu przetwarzaniu. Reprezentacja wykresów CTP_i za pomocą funkcji aproksymacyjnej, daje najszersze możliwości ich wykorzystania zarówno przez człowieka, jak i przez systemy komputerowe, gdzie przechowywana jest tylko tabela współczynników funkcji aproksymacyjnej.

$y_p = 1\%$, whereas the registered transformation end curve corresponds to a various content of austenite which is in accordance with the analysed TTT diagram.

In order to determine the values of constants k and n , at a given temperature, the knowledge of coordinates of two points is used: (t_p, y_p) , (t_k, y_k) which mark the start and the end of the transformation at this temperature (the coordinates are stored in the database in tabular form). In order to calculate the values of parameters n and k the equation (1) was transformed to the form (2), where t_p constitutes the determined time, after which the fraction of transformed austenite is y_p .

$$\ln(k) + n \ln(t_i) = \ln \left(\ln \left(\frac{1}{1 - y_i} \right) \right) \quad (2)$$

The process of digitisation of solid diagrams may be carried out with the use of existing commercial programs, e.g. SigmaScanPro [11], whereas in the present paper, in Figure 5 presented is the result of the operation of an in-house developed program for digitisation, which constitutes a submodule in the CAPCAST system. This program may be used to digitise TTT diagrams. In the literature can be found a large number of TTT diagrams developed for different types of steel, whereas for ductile cast iron the number of diagrams is insignificant. Due to increasing industrial interest in Austempered Ductile Iron, there is a need to conduct research which would lead to the optimisation of the processes of Austempered Ductile Iron production, in which TTT diagrams are a helpful tool. Creating new diagrams we should bear in mind the fact that they will be used in computer systems which control processing, or in expert systems, that is why at the stage of their creation it is worth achieving such a representation of diagrams which would be easy to be process automatically. The representation of TTT diagrams, with the use of an approximation function, gives extensive possibilities to use them both by man and computer systems, where only the table of coefficients of the approximation function is stored.



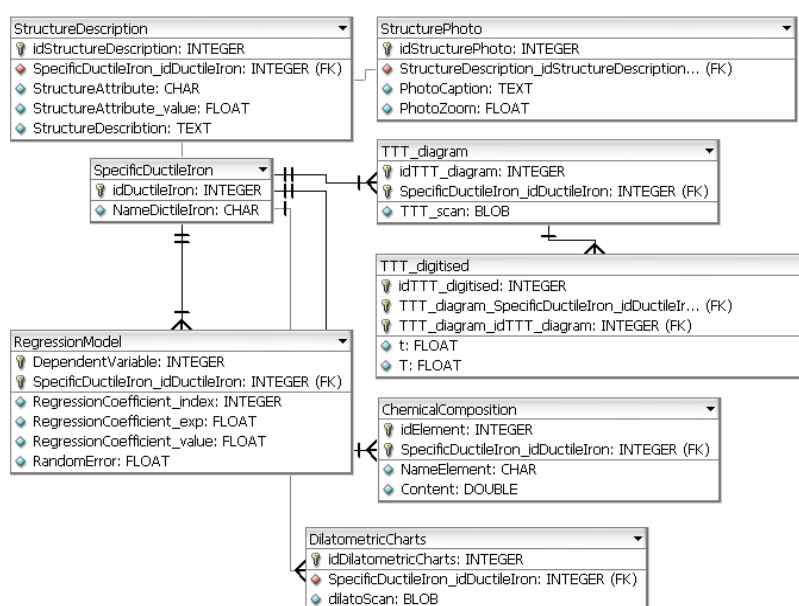
Rys. 5. Okno programu do digitalizacji wykresów CTP_i
Fig. 5. The program window to digitise TTT diagrams

Baza danych modułu CTP

Opracowano schemat bazy danych, pozwalający na przechowywanie oryginałów wykresów CTP_i w postaci bitmap, ich reprezentacji po digitalizacji w postaci tabeli współrzędnych oraz zdjęć struktur wraz z ich opisem metalograficznym, informacji o składzie chemicznym żeliwa, dla którego został sporządzony wykres. Architektura opracowanej bazy danych (rys. 6) ma charakter otwarty i posiada możliwość rozbudowy i uzupełniania jej dla innych materiałów (np. innych stopów). Istnieje też możliwość rozbudowy bazy danych o dodatkowe charakterystyki związane z opisywanym przez wykres CTP_i materiałem, np. wprowadzenia równań regresji opisujących wybrane zależności.

The database of the TTT module

A scheme for database was developed, which enables to store original TTT diagrams in the form of bitmaps, their representation after digitisation in the form of tables of coordinates, and photographs of structures together with their metallographic descriptions, information about the chemical composition of cast iron for which the diagram was made. The architecture of the developed database (Fig. 6) is open and possesses the possibility to extend and complete the database with additional characteristics related to the material described by the TTT diagram, e.g. the introduction of regression equations which describe selected relations.



Rys. 6. Schemat bazy danych dla modułu systemu CAPCAST
Fig. 6. Scheme of database of module of the CAPCAST system

Opracowanie modeli regresji

Dzięki możliwości wprowadzenia do bazy wiedzy równań regresji, przedstawiających zależności określonych właściwości mechanicznych (np. R_m , A_5 , HRC) od wybranych parametrów procesu możemy wzbogacić moduł CTP o cenne narzędzie wspomagające proces projektowania materiału. W chwili obecnej opracowano testowe modele regresji dla dwóch wybranych składów żeliwa sferoidalnego. Przy ich wykorzystaniu należy pamiętać, że zostały wyznaczone metodą empiryczną i są obciążone błędami pomiarów.

The development of a regression model

Thanks to the possibility of feeding regression equations into the knowledge base, which represent relations between the particular mechanical properties (e.g. R_m , A_5 , HRC) and the selected process parameters we can enrich the TTT module with a valuable tool which supports the process of material designing. At present test regression models for two selected compositions of ductile cast iron are developed. While using these models we should remember that they were determined with the use of an empirical method and are burdened with measurement errors.

Tabela 1. Zestawienie parametrów osnowy oraz właściwości wytrzymałościowych żeliwa ADI po przemianie izotermicznej [9]

Table 1. List of parameters of the matrix and the strength characteristics of the ADI isothermal transformation [9]

Temperatura przemiany / Temperature of transformation, °C	Udział powierzchni austenitu A_A , % / Share of austenite area A_A , %	Długość igieł ferrytu / Length of ferrite needles, mm	Grubość igieł ferrytu / Thickness of ferrite needles, mm	R_m , MPa	A_5 , %	HRC
280	11,6	10,33	0,88	1425,5	4,9	42
290	13,4	11,83	0,98	1482,6	5,7	41,5
300	10,5	11,68	1,21	1390,4	8,0	41
310	15,8	11,91	1,06	1311,7	7,4	39
320	13,7	13,95	1,40	1310,0	7,7	38,5
330	16,0	12,56	1,19	1259,7	13,4	38,5
340	18,6	13,00	1,13	1002,7	9,7	33
350	21,2	12,13	1,06	1168,8	12,3	37
360	15,9	12,23	1,15	1106,5	13,1	33
370	20,3	11,35	0,90	1064,9	10,9	34,5
380	19,9	8,96	1,11	1032,6	15,7	27
390	21,9	8,66	0,92	1064,9	15,4	31

Wykorzystując tabelę 1, która zawiera wyniki dwunastu bezpośrednich pomiarów dla następujących zmiennych: temperatura przemiany, udział powierzchni austenitu, długość igieł ferrytu, grubość igieł ferrytu, R_m , A_5 , HRC dla żeliwa sferoidalnego (3,72% C, 2,67% Si, 0,185% Mn, 0,037% P, 0,012% S, 0,03% Cr, 1,37% Ni, 0,035% Al, 0,609% Cu, 0,051% Mg, 0,02% Ti) poddanego zabiegom austenizacji i ausferityzowania, w zakresie temperatur 280–390°C, co 10°C, przeprowadzono analizę regresji. Na podstawie równań regresji można oszacować ilość austenitu w osnowie potrzebną do uzyskania określonych (wymaganych) właściwości.

Na pierwszym etapie analizy zależności stworzono macierz korelacji (tab. 2), na podstawie której można stwierdzić, że istnieje ścisła zależność liniowa właściwości R_m , A_5 , HRC zarówno od temperatury (T), jak i procentowego udziału austenitu (A_A %). Znacznie

Using Table 1, which includes results of twelve direct measurements for the following variables: the temperature of transformation, the area fraction of austenite, the length of ferrite needles, the thickness of ferrite needles, R_m , A_5 , HRC for ductile cast iron (3.72% C, 2.67% Si, 0.185% Mn, 0.037% P, 0.012% S, 0.03% Cr, 1.37% Ni, 0.035% Al, 0.609% Cu, 0.051% Mg, 0.02% Ti) which underwent austenisation and austempering, within the range of temperature 280–390°C, every 10°C, the analysis of regression was carried out. On the basis of regression equations it is possible to estimate the amount of austenite in the matrix needed to achieve particular (required) properties.

During the first stage of the analysis of relations a correlation matrix was created (Table 2), on the basis of which it is possible to state that there is a close linear correlation between properties R_m , A_5 , HRC and temperature (T), as well as the percentage

słabsza, choć istotna, zachodzi korelacja liniowa pomiędzy długością i grubością igieł ferrytu, ale nie mają one istotnego wpływu na właściwości materiału.

area fraction of austenite ($A_A\%$). A much weaker although significant, linear correlation exists between the length and the thickness of ferrite needles, but they do not significantly influence the material properties.

Tabela 2. Macierz korelacji pomiędzy właściwościami mechanicznymi, mikrostrukturą i temperaturą
Table 2. The matrix of correlations between the mechanical properties, microstructure and temperature

Zmienna	Korelacje (Zależności ADI sta)									
	Oznaczone wsp. korelacji są istotne z $p < ,05000$ N=12 (Braki danych usuwano przypadkami)									
	Średnia	Odch.std	Temp	$A_A\%$	DI igieł ferrytu	Grubość igieł	R_m	A_5	HRC	
Temp	335,00	36,06	1,00	0,88	-0,41	-0,10	-0,91	0,91	-0,91	
$A_A\%$	16,57	3,82	0,88	1,00	-0,35	-0,30	-0,84	0,76	-0,77	
DI igieł ferrytu	11,55	1,55	-0,41	-0,35	1,00	0,64	0,24	-0,41	0,46	
Grubość igieł	1,08	0,15	-0,10	-0,30	0,64	1,00	0,06	0,03	0,04	
R_m	1218,36	166,31	-0,91	-0,84	0,24	0,06	1,00	-0,79	0,91	
A_5	10,35	3,67	0,91	0,76	-0,41	0,03	-0,79	1,00	-0,83	
HRC	36,33	4,66	-0,91	-0,77	0,46	0,04	0,91	-0,83	1,00	

Wyznaczono zależności właściwości: R_m , A_5 , HRC od udziału austenitu ($A_A\%$); wynik opisują równania (3–5). Najsłabsze dopasowanie modelu liniowego stwierdzono dla wydłużenia A_5 , gdzie standardowy błąd estymacji wynosi 2,5.

$$R_m = 1825,6 - 36,7A_A\%;$$

$$\text{Standardowy błąd estymacji} = 94 \quad (3)$$

$$A_5 = -1,74 + 0,73A_A\%;$$

$$\text{Standardowy błąd estymacji} = 2,5 \quad (4)$$

$$HRC = 51,9 - 0,94A_A\%;$$

$$\text{Standardowy błąd estymacji} = 3,12 \quad (5)$$

Przykład złożonych zależności pomiędzy poszczególnymi właściwościami mechanicznymi a mikrostrukturą ($A_A\%$) oraz temperaturą przemiany (T) dla żeliwa ADI przedstawiają równania (6–8).

$$R_m = 2508,17 - 3,46T - 7,95A_A\%;$$

$$\text{Standardowy błąd estymacji} = 74 \quad (6)$$

$$A_5 = -23,05 + 0,11T - 0,17A_A\%;$$

$$\text{Standardowy błąd estymacji} = 1,6 \quad (7)$$

$$HRC = 78,48 - 0,13T + 0,18A_A\%;$$

$$\text{Standardowy błąd estymacji} = 2,07 \quad (8)$$

Analizując wyniki regresji, opisujących zależność właściwości żeliwa ADI od mikrostruktury i temperatury przemiany, stwierdzono dobre dopasowanie modelu do danych empirycznych, o czym świadczą, między innymi, znacząco niższe wartości standardowych błędów estymacji w równaniach (6–8) niż w równaniach (3–5). Ponadto równania (6–8) pozwalają analizować zależność właściwości żeliwa od zawartości austenitu w osnowie, w określonej temperaturze. Graficzną postać tych zależności pokazano na rysunku 7.

Interrelations of the following properties were determined: R_m , A_5 , HRC and the share of austenite ($A_A\%$); the result is described by equations (3–5). The weakest adjustment of the linear model was ascertained for elongation A_5 , where the standard error of estimation was 2.5.

$$R_m = 1825,6 - 36,7A_A\%;$$

$$\text{Standard error of estimation} = 94 \quad (3)$$

$$A_5 = -1,74 + 0,73A_A\%;$$

$$\text{Standard error of estimation} = 2,5 \quad (4)$$

$$HRC = 51,9 - 0,94A_A\%;$$

$$\text{Standard error of estimation} = 3,12 \quad (5)$$

An example of complex interrelations between particular mechanical properties and the microstructure ($A_A\%$), and the transformation temperature (T) for ADI is illustrated by equations (6–8).

$$R_m = 2508,17 - 3,46T - 7,95A_A\%;$$

$$\text{Standard error of estimation} = 74 \quad (6)$$

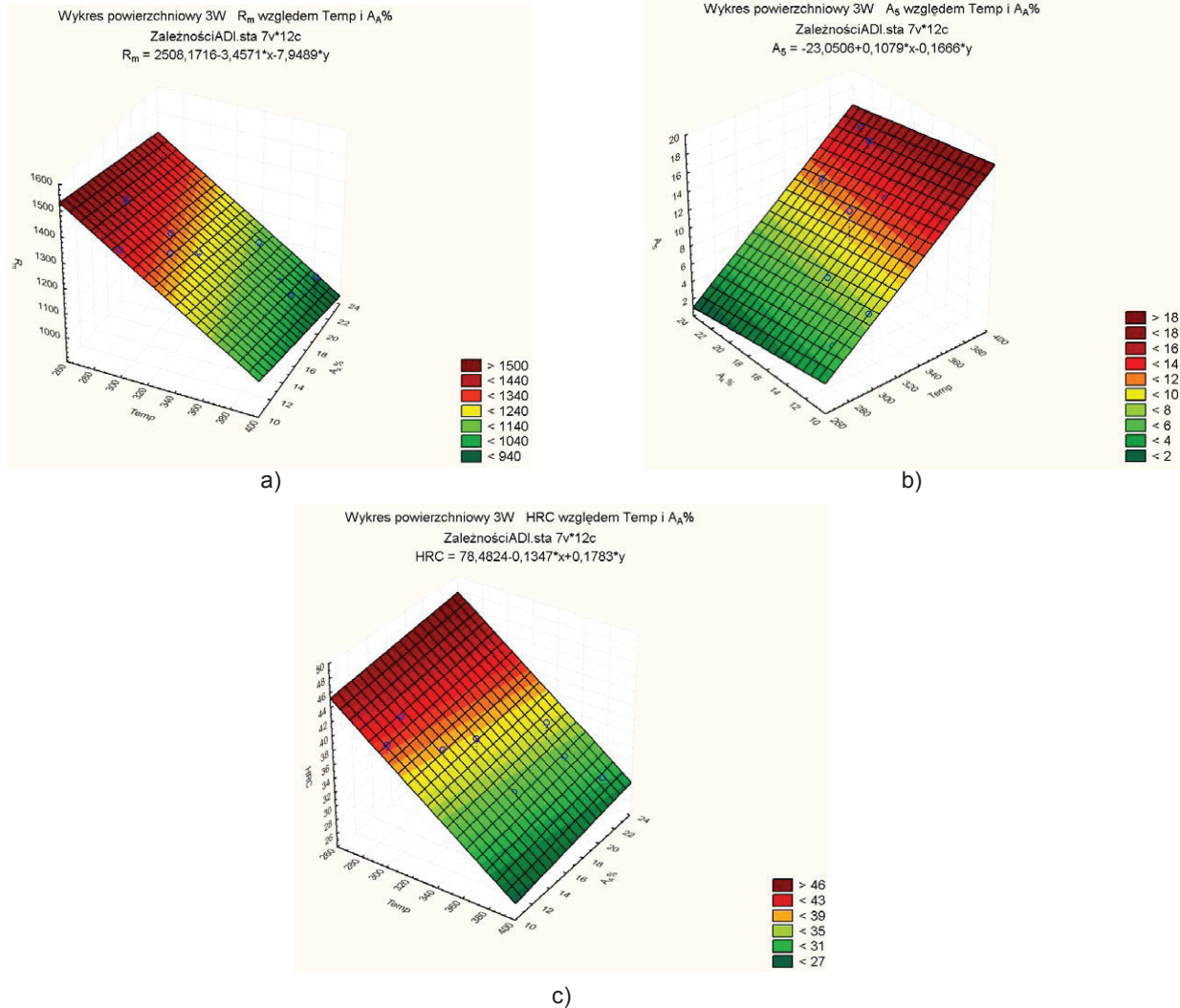
$$A_5 = -23,05 + 0,11T - 0,17A_A\%;$$

$$\text{Standard error of estimation} = 1,6 \quad (7)$$

$$HRC = 78,48 - 0,13T + 0,18A_A\%;$$

$$\text{Standard error of estimation} = 2,07 \quad (8)$$

During the analysis of the regression results, which describe interrelations between ADI, the microstructure and the transformation temperature, a good adjustment of the model to the empirical data was stated, evidence of which is, among other things, significantly lower values of standard errors of estimation in equations (6–8) than the values in equations (3–5). Moreover, equations (6–8) enable to analyse interrelations between cast iron and the content of austenite in the matrix, at a given temperature. A graphic form of these interrelations is presented in Figure 7.



Rys. 7. Wykresy zależności wybranych właściwości żeliwa ADI od temperatury (T) i udziału austenitu w osnowie ($A_A\%$):

a) $R_m = f(T, A_A\%)$, b) $A_s = f(T, A_A\%)$, c) $HRC = f(T, A_A\%)$

Fig. 7. Graphs of relations between selected properties of ADI, the temperature (T) and austenite volume fraction ($A_A\%$):

a) $R_m = f(T, A_A\%)$, b) $A_s = f(T, A_A\%)$, c) $HRC = f(T, A_A\%)$

Eksplotacja bazy wiedzy modułu CTP

Moduł CTP projektowany jest jako jeden z podmodułów systemu CAPCAST i posiada kilka funkcjonalności:

- prezentacja zawartych w bazie wykresów oraz informacji o materiale,
- rekomendacja składu chemicznego wyjściowego żeliwa sferoidalnego do produkcji żeliwa ADI o określonym gatunku,
- po połączeniu z bazą danych materiałowych rekomendacja innych materiałów, które spełnią oczekiwane właściwości.

Przechowywane w bazie danych informacje pozwalają na odtworzenie na żądanie użytkownika eksperymentalnego wykresu CTP_i dla wybranego składu, prezentację dylatogramu, a jeżeli tylko są

The exploitation of the knowledge base of the TTT module

TTT module is designed as one of submodules of the CAPCAST system and has several functions:

- presentation of diagrams included in the base and other information about the material,
- recommendation of the chemical composition of the initial ductile cast iron for the production of ADI of a particular type,
- after connecting with the material database the recommendation of other materials, which meet the expected properties.

Information stored in the database enable the user at any time to view an experimental TTT diagram for a selected composition, to see dilatograms, photographs and metallographic descriptions of the struc-

obecne w bazie, to również prezentację zdjęć i opisów metalograficznych struktur, jak i pozostałych informacji o tym materiale.

Często jednak zdarza się sytuacja, że użytkownik jest w fazie doboru materiału dla projektowanego odlewu. Ma ustalone zakresy wartości konkretnych właściwości, a poszukuje materiału, który spełni te warunki w najlepszej konfiguracji jakościowo-ekonomicznej. Posługując się opracowaną dla CAPCAST bazą wiedzy dla modułu CTP, zawierającą charakterystyki żeliwa sferoidalnego (wyjściowe żeliwo do produkcji ADI) dla różnych składów chemicznych, otrzyma rekomendacje materiałów, które potencjalnie mogą spełnić jego oczekiwania.

Realizacja procesu wnioskowania:

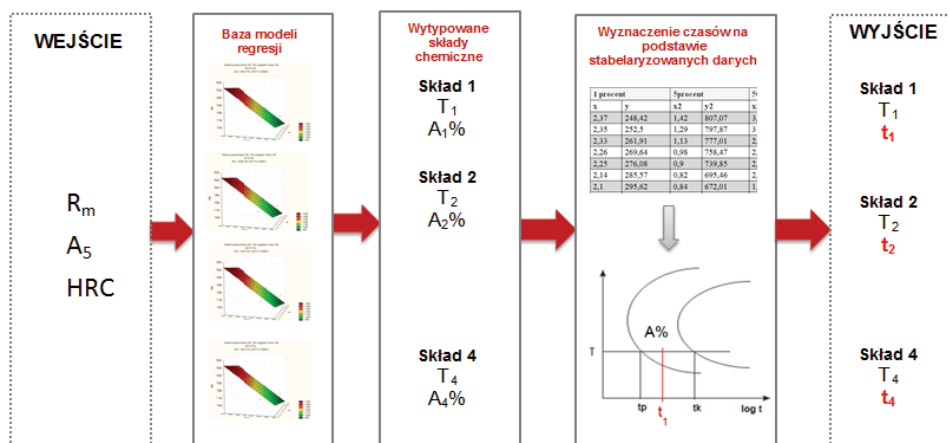
- w pierwszym kroku następuje analiza wszystkich zawartych w bazie CTP modeli regresji i wyznaczenie, który skład i w jakiej konfiguracji wartości parametrów *temperatura* (T) i ilość austenitu nieprzemienionego ($A_A\%$), może spełnić ustalone na wejściu oczekiwania;
- w kolejnym etapie następuje analiza, opracowanych w formie tabel, wykresów CTP, dla wytypowanych składów, pod kątem wskazania czasów (t), jakie powinny być zadane dla określonych parametrów (skład oraz temperatura). Ideowy schemat tego rozwiązania przedstawia rysunek 8.

ture and other information about this material, if they are available in the database.

However, a user is often in the phase of material selection for a designed cast. The user has got fixed ranges of values of specific properties, and looks for a material which would meet these requirements in the best quality-economy configuration. Using the knowledge base for the TTT module developed for the CAPCAST system, which includes characteristics of ductile cast iron (initial cast iron for the production of ADI) for different chemical compositions, the user will obtain recommendations of materials which may potentially meet the expectations.

The execution of the reasoning process:

- during the first step the analysis of all regression models included in the TTT base is made, also the appropriate composition and the configuration of parameters' values temperature (T) and the amount of not transformed austenite ($A_A\%$), which may meet the initially defined expectations, are determined;
- during the next stage the analysis of TTT diagrams is made, which are in a form of tables, for the selected compositions, taking into account meters of times (t) which should be applied for the defined parameters (composition and temperature). A schematic diagram of this solution is presented in Figure 8.



Rys. 8. Ideowy schemat procesu wnioskowania dla rekomendacji określonych składów chemicznych do wytworzenia materiału o zadanych właściwościach

Fig. 8. Schematic diagram of the process of reasoning for recommendation of specific chemical compositions to produce a material with selected properties

Skład chemiczny determinuje koszt pozyskania materiału, bowiem niektóre pierwiastki stopowe są znacznie droższe od innych. Aby użytkownik mógł dokonać racjonalnego wyboru, system podpowie mu, jaki materiał (który ze składów wyjściowych żeliwa sferoidalnego, dostępnego w bazie) może uzyskać oczekiwane właściwości oraz wyznaczy warunki obróbki cieplnej, jakie należy zadać, aby te właści-

The chemical composition determines the cost of achieving a proper material, because some alloy elements are more expensive than others. For a user to make a reasonable choice the system will recommend the type of material (one of the initial compositions of ductile cast iron available from the base) which may achieve the expected properties and will determine conditions of thermal treatment, which should be

wości otrzymać, jak również otrzyma wykaz innych materiałów, posiadających oczekiwane właściwości.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono możliwości tworzenia komputerowych reprezentacji wykresów CTP_i w formie tabeli współrzędnych punktów wykresu CTP_i (utworzonych w wyniku digitalizacji) albo w postaci s-funkcji (wyznaczonych metodami aproksymacyjnymi) oraz ich eksploatacji w systemach wspomagania decyzji. Na podstawie wykresów CTP_i można określić optymalne wartości parametrów technologicznych, gwarantujących określoną mikrostrukturę, a tym samym ich właściwości. Użytkownik może w tym module uzyskać informacje o materiałach spełniających jego oczekiwania lub o materiałach, które po odpowiedniej obróbce cieplnej te wymagania spełniają.

W aktualnej wersji modułu CTP skupiono się na żeliwie sferoidalnym, jako wyjściowym żeliwie do produkcji żeliwa ADI. Obecna wersja wyposażona jest w dwa testowe modele regresji dla dwóch wybranych żeliw. Aby udoskonalić działanie modułu, potrzebne będą dalsze prace mające na celu opracowanie modeli regresji dla określonych grup żeliwa sferoidalnego, tj. niklowo-molibdenowych, niklowo-miedziowych, miedziowo-molibdenowych, niklowo-miedziowo-molibdenowych, które to modele uwzględniać będą zawartości dodatków stopowych.

Opracowany projekt modułu CTP z powodzeniem może zostać wykorzystany dla innych materiałów i innych procesów obróbki, o ile zostaną dobrze rozpoznane eksperymentalnie.

Podziękowania

Praca finansowana w ramach projektu NCN nr N N508 792440.

Literatura/References

1. Mrzygłód B., Regulski K. (2011). Model of knowledge representation about materials in the form of a relational database for CAPCAST system. *Archives of Foundry* 11(3), 81–86.
2. Pacyna J. (red.). (2005). *Metaloznawstwo – wybrane zagadnienia*. Kraków: Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH.
3. Kowalski A., Tybulczuk J., Jackowski J. (1990). Manufacture and properties of bainitic-austenitic ductile iron with additions of Ni and Cu. *57th World Foundry Congress*, Osaka. Tokyo: The Japan Foundrymen's Society.
4. Herfurth K. (2003). Austenitisch-ferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit. Teil 2: Unvollständige isothermische Austenitumwandlung. *Giesserei-Praxis* 54(4), 137–142.
5. Kutsov A., Taran Y., Uzlov K., Krimmel A., Evsyukov M. (1999). Formation of bainite in ductile iron. *Material Science Engineering A* 559(273–275), 480–484.
6. Olejarczyk-Woźeńska I., Adrian A., Adrian H., Mrzygłód B. (2012). Parametric representation of TTT diagrams of ADI cast iron / Parametryczna reprezentacja wykresów CTP_i żeliwa sferoidalnego. *Archives of Metallurgy and Materials* 57(2), 613–617.
7. Olejarczyk I., Adrian A., Adrian H., Mrzygłód B. (2011). Analiza matematyczna wykresów CTP_i żeliwa sferoidalnego / Mathematical analysis of TTT diagrams of ADI. W: Jerzy Pacyna (red.), *XXXIX Szkoła Inżynierii Materiałowej, Kraków–Krynica 27–30 września 2011 r.* Kraków: AGH, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej.

applied in order to obtain these properties. The user will also obtain a specification of materials which have the required properties.

Summary

The paper presents the possibility to create computer presentations of TTT diagrams in the form of tables including coordinates of points of a TTT diagram (created as a result of digitisation) or in the form of s-function (determined with the use of approximation methods), and their exploitation in decision support systems. On the basis of TTT diagrams it is possible to specify optimal values of technological parameters which would guarantee a given microstructure, and at the same time, their properties. In this module a user may obtain information about materials which meet their expectations or about materials which after proper thermal treatment meet these requirements.

In the present version of the TTT module the focus is on ductile cast iron, as initial cast iron for the production of ADI. This version is equipped with two test regression models for two selected cast irons. In order to improve the operation of the module further work is required, which will aim at developing regression models for specific groups of ductile cast iron, i.e. nickel-molybdenum, nickel-copper, copper-molybdenum, nickel-copper-molybdenum, which would take into account the content of alloying elements.

The developed project of the TTT module can be successfully used for other materials and other treatment processes, as long as they are well researched experimentally.

Acknowledgments

The study is financed within the project NCN no. N N508 792440.

8. Kędzierski Z. (2003). *Przemiany fazowe w układach skondensowanych*. Kraków: Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH.
9. Kowalski A., Kuder M. (2008). Zastosowanie inteligentnych metod komputerowych do analizy obrazów mikrostruktury żeliwa sferoidalnego w celu oceny właściwości użytkowych wyrobów. W: J. Sobczak (red.), *Innowacje w odlewnictwie. Cz. II*, 323–331. Kraków: Instytut Odlewnictwa.
10. Kowalski A., Kuder M. (2007). Zastosowanie komputerowego programu analizy obrazu LUCIA do ilościowej oceny struktury żeliwa ADI. W: J. Sobczak (red.), *Innowacje w odlewnictwie. Cz. I*, 281–290. Kraków: Instytut Odlewnictwa.
11. SigmaScan – Analyze Images Automatically, <http://www.sigmaplot.com/products/sigmascan/sigmascan.php>