

Analiza porównawcza krzywych krzepnięcia uzyskanych za pomocą systemu analizy termicznej oraz rejestratora cyfrowego

Comparative analysis of solidification curves obtained by thermal analysis system and multi-channel digital recorder

Mieczysław Kuder¹, Krzysztof Jaśkowiec¹

¹ Instytut Odlewnictwa, Zakład Stopów Żelaza, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

¹ Foundry Research Institute, Department of Ferrous Alloys, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Poland

E-mail: mieczyslaw.kuder@iod.krakow.pl

Streszczenie

Celem badań było określenie możliwości i warunków zastosowania cyfrowego wielokanałowego rejestratora do kontroli jakości żeliwa za pomocą analizy termicznej wykonanej w krótkim czasie. Opracowano program komputerowy współpracujący z rejestratorem cyfrowym, wspomagający obróbkę danych przejmowanych „na żywo” lub zapisanych w pamięci rejestratora. Program ten określa parametry punktów charakterystycznych krzywej chłodzenia odpowiadających za właściwości wytapianego żeliwa. Wykonano szereg wytopów żeliwa o perlitycznej osnowie i zróżnicowanej postaci grafitu. Przy użyciu profesjonalnego systemu analizy termicznej oraz rejestratora cyfrowego zarejestrowano przebiegi procesów krystalizacji żeliwa w próbnikach typowych i o obniżonej grubości. Dokonano analizy przebiegu krzywych krzepnięcia dla określenia temperatur krytycznych, jak: TL, TE_{low}, TE_{high}, R, TS. Przeprowadzono badania składu chemicznego i struktury żeliwa z wytopów doświadczalnych. Porównano wyniki oznaczeń uzyskanych przy użyciu obu zestawów aparatury. Stwierdzono, że zastosowanie rejestratora i wysokiej częstotliwości próbkowania umożliwia prowadzenie analizy termicznej żeliwa przy dużej szybkości stygnięcia i stwarza korzystne warunki kontroli procesu produkcyjnego cienkościennych odlewów żeliwnych.

Słowa kluczowe: żeliwo, analiza termiczna, rejestrator cyfrowy, program komputerowy, odlew cienkościenny

Abstract

The aim of the study was to determine the possibilities and conditions for the use of a multi-channel digital recorder to control cast iron quality by rapid thermal analysis. A computer program cooperating with a digital recorder was developed. It supports processing of the acquired data “live” or stored in the recorder memory. The program establishes parameters of the characteristic points on the cooling curve responsible for the properties of the iron melt. A series of melts of cast iron with pearlitic matrix and a varied form of graphite was made. Using professional system of thermal analysis and digital recorder, the waveforms of the cast iron solidification process were plotted for samples of standard and reduced wall thickness. The obtained solidification curves were subjected to detailed analysis to determine the critical temperatures, like TL, TE_{low}, TE_{high}, R, TS. The chemical composition and structure of the cast iron from experimental melts were examined. The results of measurements were compared using both sets of equipment. It was found that the use of the recorder and high sampling frequency allow carrying out the thermal analysis of cast iron at a high cooling rate and create favourable conditions for control of the production process of thin-wall iron castings.

Keywords: cast iron, thermal analysis, digital recorder, computer program, thin-wall casting

1. Wprowadzenie

Badania, prowadzone od lat 60. XX wieku, udowodniły ścisły związek przebiegu procesu krzepnięcia (krystalizacji) z powstałą strukturą osnowy, morfologią wydzielań grafitu oraz właściwościami mechanicznymi żeliwa. Pod-

1. Introduction

The studies carried out since the 60's of the past century have demonstrated a close relationship between the solidification (crystallization) process of cast iron and the resultant matrix structure, graphite morphology and

dając dokładnej analizie przebieg krzywej krzepnięcia tego stopu, można prognozować również właściwości odlewnicze żeliwa, jak: skurcz, skłonność do tworzenia obciągnięć, jam skurczowych, porowatości.

Aktualnie do bieżącej oceny jakości produkowanego żeliwa szeroko stosuje się aparaturę umożliwiającą w krótkim czasie wykonanie analizy krzywej krzepnięcia [1–6] wytapianego stopu jako uzupełnienie lub zamiast tradycyjnego oznaczania składu chemicznego. Obecnie, obok prostych aparatów, dostępnych jest kilka zaawansowanych systemów analizy termicznej.

Podstawą profesjonalnego systemu analizy termicznej procesu krzepnięcia żeliwa jest zaawansowany program komputerowy, dający duże możliwości oceny właściwości wytapianego stopu, a nawet sterowania procesem metalurgicznym. Zaawansowany system analizy termicznej, określa temperatury i inne parametry charakterystyczne krzywej krzepnięcia, takie jak: aktywny równoważnik węgla (ACEL), temperatura likwidus (TL), temperatura eutektyczna dolna i górna (TElow, TEhigh), rekalescencja (R), temperatura solidus (TS) oraz oblicza szereg syntetycznych wskaźników, jak np. S1, GRF1, GRF2, które opisują sposób krzepnięcia żeliwa oraz służą do prognozowania właściwości żeliwa po zakrzepnięciu odlewu. Wskaźniki te są odnoszone do żeliwa krzepnącego w postaci znormalizowanego wlewka próbnego Y typ II. Trafność prognozy jest uzależniona od dokładności danych w bazie [7–8], którą użytkownik musi utworzyć sam w oparciu o historię wykonywanych analiz i przeprowadzone badania materiałowe. Podstawowymi niedogodnościami systemu analizy termicznej, którego właścicielem jest Instytut Odlewnictwa, są:

- konieczność stosowania typowych próbników,
- brak pełnego zapisu cyfrowego przebiegu chłodzenia wlewka,
- brak możliwości wprowadzania korekt w przypadku błędnej oceny temperatury likwidus.
- the need for conventional samplers,
- the lack of a full course digital recording of the cooling ingot,
- the inability to make adjustments in the case of an incorrect assessment of the liquidus temperature.

Do zapisu przebiegów zjawisk termicznych w Instytucie Odlewnictwa stosowany jest 15-kanalowy rejestrator cyfrowy. Dzięki dołączonemu oprogramowaniu, możliwa jest obserwacja przebiegu każdego procesu „na żywo”. Zapisany w pamięci rejestratora w formie cyfrowej, przebieg rejestrowanego procesu może być eksportowany do programów zewnętrznych i poddany obróbce według opracowanych algorytmów, uzyskując pożądane parametry lub wskaźniki charakteryzujące ten proces.

Do wykonania analizy termicznej żeliwa najczęściej stosuje się próbniiki kubkowe o wymiarach 35 mm × 35 mm × 40 mm, zaopatrzone w centralnie umieszczoną termoparę typu K. Na rynku dostępne są również próbniiki o zmniejszonej objętości (12 mm × 35 mm × 40 mm). Na [rysunku 1](#) przedstawiono krzywe krzepnięcia żeliwa

mechanical properties. Detailed analysis of the solidification curve of this alloy also enables predicting the casting properties of the alloy, such as the shrinkage and the tendency to form shrinkage cavities, blowholes and porosity.

Currently, for the ongoing quality assessment of the produced cast iron, instrumental analysis is widely used. It enables plotting in a relatively short time the solidification curve [1–6] of the alloy melt in addition to or instead of the traditional determination of chemical composition. At present, besides simple devices, several advanced thermal analysis systems are available.

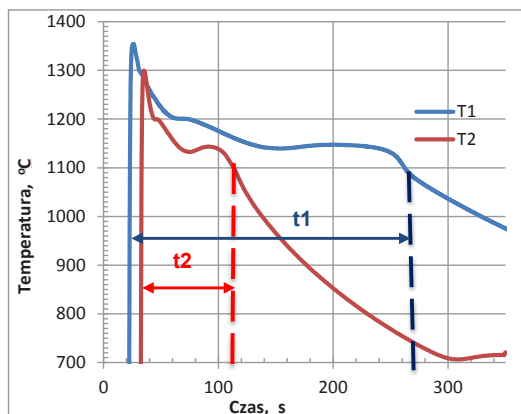
The basis for a professional system of the thermal analysis of cast iron solidification is an advanced software program that provides great opportunities for assessment of the alloy melt properties, and even for the metallurgical process control. Advanced thermal analysis system determines the temperature and other parameters of the characteristic solidification curve, including active carbon equivalent (ACEL), the liquidus temperature (TL), the lower and upper eutectic temperature (TElow, TEhigh), recalcence (R) and the solidus temperature (TS), and calculates a number of synthetic indicators like S1, GRF1, GRF2 that describe the solidification mode of cast iron and are used to predict the properties of this material after casting solidification. All these indicators apply to the cast iron solidifying in the form of a standard Y test ingot type II. The accuracy of the forecast depends on the accuracy of data collected in a database [7–8], which the user has to create based on the history of analyses made and the materials researched. The main drawbacks of the thermal analysis system owned by the Foundry Research Institute are:

To record the waveforms of thermal phenomena, the Foundry Research Institute uses a 15-channel digital recorder. With the attached software, “live” observations of the course of each process are possible. Stored in digital form in the recorder memory, the registered course of the process can be exported to external programs and processed by the developed algorithms to yield the desired parameters and indicators characterising this process.

To perform the thermal analysis of cast iron, most commonly used are the 35 mm × 35 mm × 40 mm cup samplers, provided with a centrally disposed K type thermocouple. Commercially available are also samplers of reduced volume (12 mm × 35 mm × 40 mm). [Figure 1](#) shows the solidification curves of cast iron

w czujnikach kubkowych o zróżnicowanej objętości, ilustrujące znaczne zróżnicowanie szybkości chłodzenia wlewków próbnikowych i czas potrzebny do wykonania analizy termicznej.

obtained with the use of cup samplers of different volume, illustrating considerable variations in the ingot cooling rate and time needed to perform the thermal analysis.



Rys. 1. Krzywe krzepnięcia żeliwa w próbnikach kubkowych: normalnym (T1) i o obniżonej objętości (T2)
Fig. 1. Cast iron solidification curves as recorded in a cup sampler of standard volume (T1) and low-volume (T2)

Celem badań było określenie możliwości i warunków zastosowania cyfrowego wielokanałowego rejestratora do kontroli jakości żeliwa i sterowania procesem metalurgicznym przy znacznie skróconym czasie wykonania analizy termicznej żeliwa.

The aim of the present study was to determine the possibilities and conditions for the use of the multi-channel digital recorder to control the cast iron quality and the metallurgical process with a much shorter period of time necessary to perform the thermal analysis of this material.

2. Metodyka badawcza

Integralnym elementem realizacji planowanych badań było opracowanie komputerowego programu ułatwiającego identyfikację i określanie parametrów punktów charakterystycznych krzywych krzepnięcia, zapisanych w pamięci rejestratora cyfrowego. Opracowany w Instytucie Odlewnictwa, współpracujący z rejestratorem cyfrowym, program identyfikacji punktów charakterystycznych krzywej krzepnięcia określa temperatury: TL, TEI, TEh, TS, dodatkowych TI i TR, rekalescencję R oraz równoważnik CEL. Na podstawie wpisanego składu chemicznego (C, Si, P, Mn) oblicza wartości temperatury krzepnięcia białego T_w i szarego T_g [°C], wg formuł: $T_g = 1154 + 4\%Si - 2\%Mn - 30\%P$ i $T_w = 1148 - 15\%Si + 3\%Mn - 37\%P$ [9]. Program, na otwartych kartach, umożliwia prowadzenie równoczesnej obserwacji i analizy kilku próbek równocześnie i zapis w plikach danych liczbowych oraz wykresów na zasadzie „zrzutów” ekranu.

Przeprowadzono szereg wytopów różnych rodzajów żeliwa z rejestracją procesu krzepnięcia stopu równocześnie za pomocą profesjonalnego systemu analizy termicznej oraz wielokanałowego rejestratora cyfrowego, w próbnikach kubkowych tradycyjnych i o obniżonej objętości (pocienionych). Próbniki pomiarowe zostały równocześnie podłączone do obu systemów pomia-

2. Research methodology

An integral part of the implementation of the planned research was development of a computer program facilitating identification and determination of the parameters of characteristic points on the solidification curves stored in the digital recorder. Software developed at the Foundry Research Institute cooperates with the digital recorder and enables identification of characteristic points on the solidification curve. It determines the temperatures such as TL, TEL, TEh, TS, and additionally TI and TR, recalescence R and carbon equivalent CEL. Based on the entered chemical composition (C, Si, P, Mn), it calculates the values of the temperature of white solidification T_w and grey solidification T_g [°C] using the following formulae: $T_g = 1154 + 4\%Si - 2\%Mn - 30\%P$ and $T_w = 1148 - 15\%Si + 3\%Mn - 37\%P$ [9]. Operating on open cards, the software allows conducting simultaneous observation and analysis of several samples and recording numerical data in files and charts on the principle of “screenshots”.

Several melts of different cast iron grades were made with registration of the alloy solidification process using simultaneously a professional system of the thermal analysis and a multi-channel digital recorder, and samplers of both standard volume and low-volume (thin-wall). The measuring samplers were simultaneously

rowych. Częstotliwość próbkowania podczas rejestracji przebiegu procesu krystalizacji żeliwa wynosiła dla systemu profesjonalnego około 1 Hz (brak możliwości zmiany tego parametru), dla rejestratora cyfrowego – ustawiono na 10 Hz. Wysoka częstotliwość próbkowania powinna w sposób wyraźny wpłynąć na dokładność pomiarów, szczególnie w próbniku o obniżonej objętości, natomiast zbyt długi czas próbkowania (rzędu 1 sekundy) może uniemożliwić właściwe rozpoznanie punktów charakterystycznych krzywej krystalizacji i określenie ich parametrów.

Wstępnie założono prowadzenie badań żeliwa ze zróżnicowaną postacią grafitu i perlityczną osnową, dla uzyskania których do ciekłego stopu wprowadzano pierwiastki stopowe, jak: Cu, Ni, Sn, S oraz poddawano zabiegom metalurgicznym z użyciem zapraw FeSiMg, FeSiMgCe oraz modyfikatora złożonego FeSiBa. Oba próbki kubkowe do analizy termicznej zalewano po roztopieniu oraz po przeprowadzeniu kolejnych zabiegów metalurgicznych.

Badania metalograficzne przeprowadzono na próbkach wyciętych z centralnych miejsc wlewków do analizy termicznej.

Wyniki pomiarów i badań oznaczono odpowiednio: 01, 03 i 05 dla żeliwa bazowego, 1–8 dla żeliwa po zabiegach metalurgicznych i dodatkowo literami: *_n* – dla próbników typowych oraz *_c* – dla próbników o obniżonej objętości (pocienionych).

3. Wyniki badań

Żeliwo z wytopów doświadczalnych cechowało się osnową perlityczną lub perlityczno-ferrytyczną i zróżnicowaną postacią grafitu – od grafitu płatkowego przez zwarty po sferoidalny. W niektórych wlewkach pocienionych, stwierdzono znaczne ilości cementytu oraz płatkowego grafitu przechłodzenia. W przypadku wlewków typowych, te niekorzystne składniki struktury zasadniczo nie występowały lub występowały w śladowych ilościach. Przykładowe wyniki badań metalograficznych przedstawiono na [rysunku 2](#) w postaci mikrofotografii zglądów trawionych.

Na [rysunku 3](#) pokazano ekrany programu profesjonalnego z wynikami analizy żeliwa 01 oraz 3; można zauważyć, że w przypadku żeliwa 01 krzepnącego w pocienionym próbniku system niewłaściwie rozpoznał temperatury likwidus i solidus. Na [rysunku 4](#) pokazano widok ekranu programu autorskiego z wynikami analizy krzywej krzepnięcia żeliwa nr 01 i 3.

Wyniki pomiarów wybranych parametrów krzepnięcia, w dwu rodzajach czujników pomiarowych, żeliwa z wytopów doświadczalnych, określone dwoma systemami analizy termicznej, przedstawiono graficznie na [rysunkach 5–7](#). Pozwoliło to na bezpośrednie porównanie stosowanej aparatury w ocenianym zakresie stosowania.

connected to both measuring systems. The sampling frequency during registration of the cast iron solidification process was 1 Hz for the professional system (no possibility to change this parameter) and 10 Hz for the digital recorder. The high sampling frequency was expected to affect the accuracy of the measurements, especially in the sampler of reduced volume, while longer sampling time (about 1 second) might prevent proper identification of characteristic points on the solidification curve and determination of their parameters.

The preliminary program of research assumed studies of cast iron with different forms of graphite and a pearlitic matrix. To obtain the test materials, the composition of molten alloy was enriched with elements like Cu, Ni, Sn, S and was subjected to metallurgical treatments using master alloys such as FeSiMg and FeSiMgCe, and a complex FeSiBa inoculant. For the thermal analysis, both cup samplers were filled with metal after melting of the alloy and successive metallurgical treatments.

Metallographic examinations were carried out on specimens cut out from the central parts of ingots used for the thermal analysis.

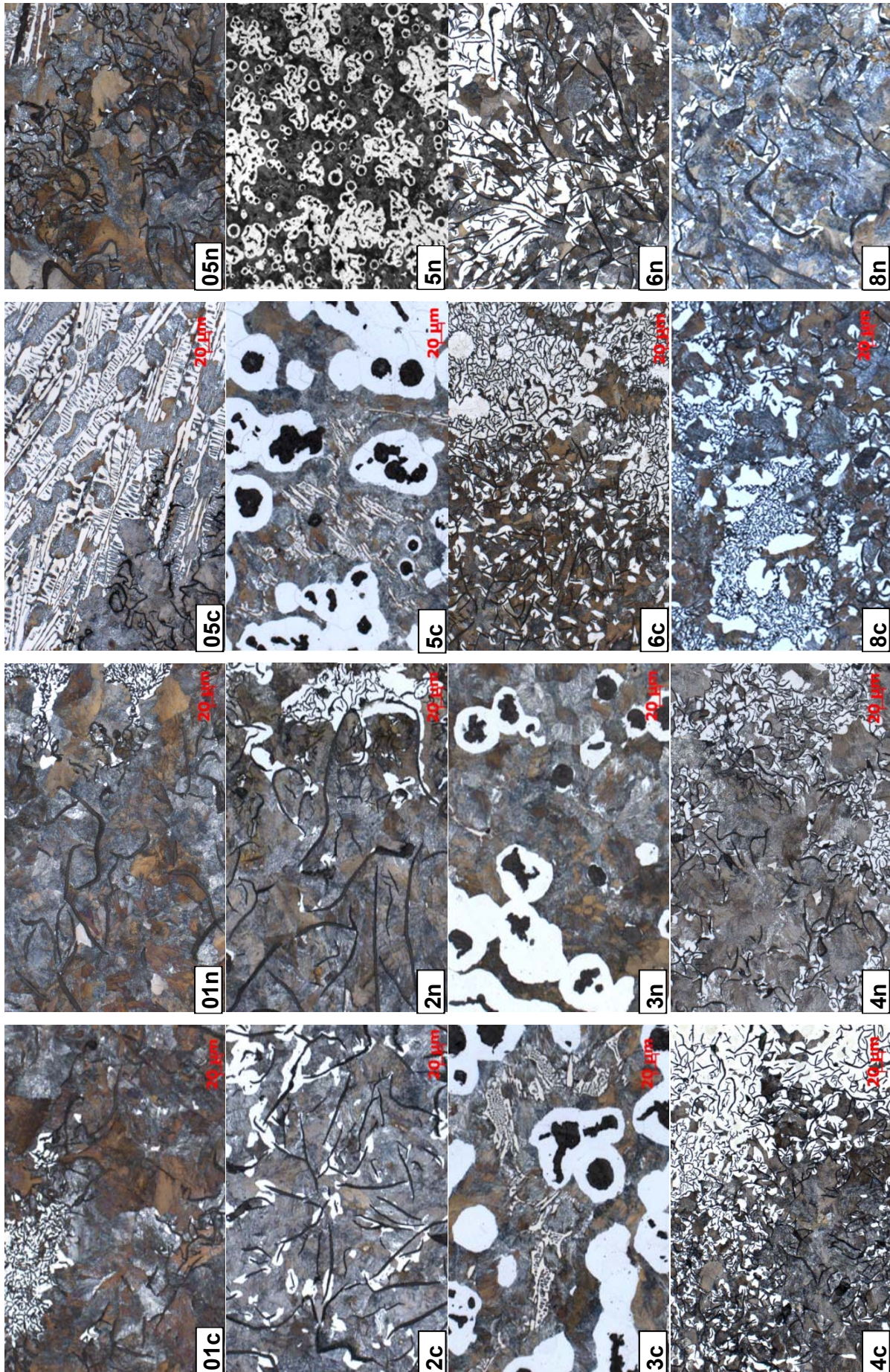
The results of tests and measurements were designated: 01, 03 and 05 for basic cast iron, 1–8 for cast iron after metallurgical treatments and additionally by letters: *_n* – and *_c* – for standard sampler and reduced volume (thin-wall) sampler, respectively.

3. Test results

The cast iron from the trial melts was characterized by a pearlitic or pearlitic-ferritic matrix and diverse forms of graphite – from flake through compact and in spheroidal ending. Some of the thin-wall ingots contained a high content of the cementite and undercooled flake graphite. In standard ingots, these adverse structural constituents were either absent or present in trace amounts. Examples of the results of metallographic studies are shown in [Figure 2](#) as photomicrographs of the etched specimen cross-sections.

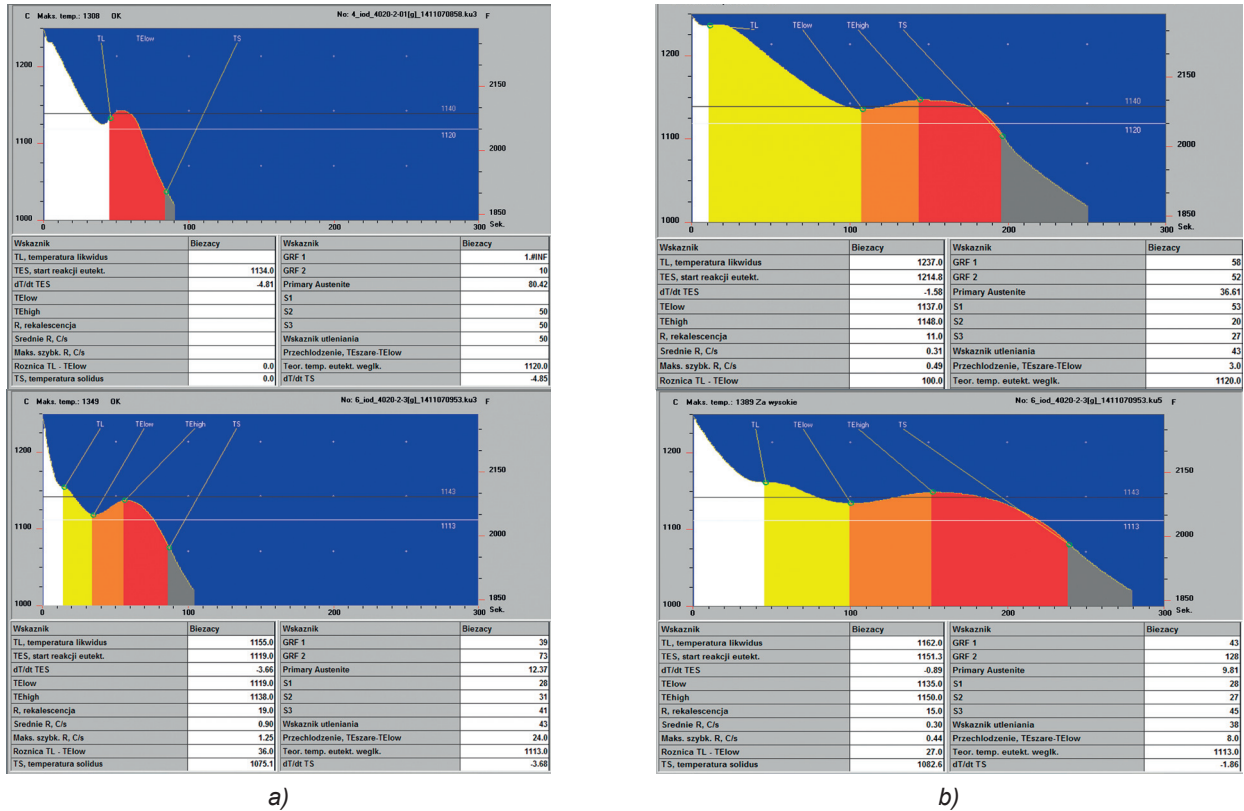
[Figure 3](#) shows screenshots of a professional program with the results of the analysis of cast irons 01 and 3; it can be seen that in the case of cast iron 01 solidifying in a thin-wall sampler, the system has incorrectly recognized both liquidus and solidus temperature. [Figure 4](#) shows screenshots of a proprietary program with the resulting solidification curves plotted for cast irons 01 and 3.

The results of measurements of selected parameters of the solidification process of the cast iron from trial melts using two types of measuring sensors and two thermal analysis systems are graphically presented in [Figures 5–7](#). This allowed a direct comparison of the equipment used in the evaluated range of application.

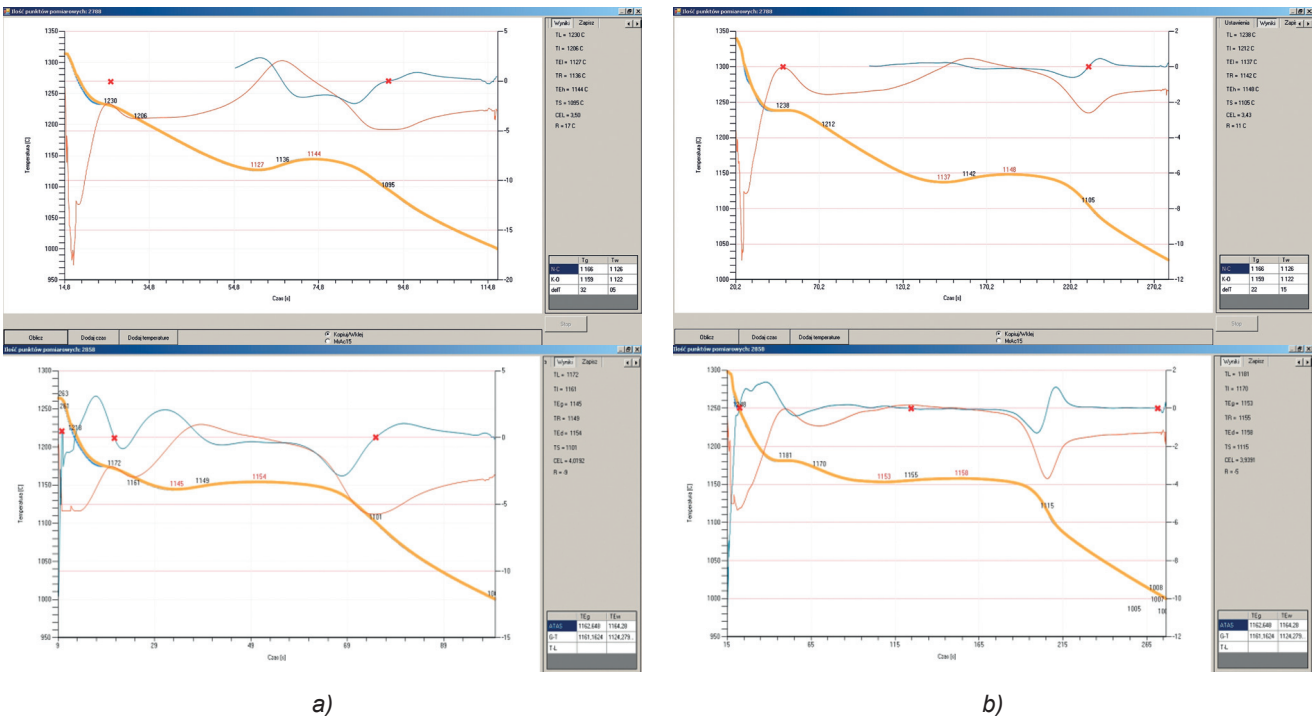


Rys. 2. Przykładowe struktury żeliwa z wlewków pocienionych (c) i typowych (n); zglady trawione, powiększenie 500×

Fig. 2. Examples of the cast iron structure obtained in thin-wall ingots (c) and standard ingots (n); metallographic sections after etching, 500×



Rys. 3. Ekrany „wyników” programu profesjonalnego z wynikami analizy żeliwa 01 (u góry) oraz 3 (u dołu): a) w próbniku o obniżonej grubości ścianki oraz b) w próbniku typowym
 Fig. 3. Screenshots of the professional program “performance” and the results of analysis of the solidification curve of cast iron 01 (top) and 3 (bottom): a) in thin-wall sampler and b) in standard sampler



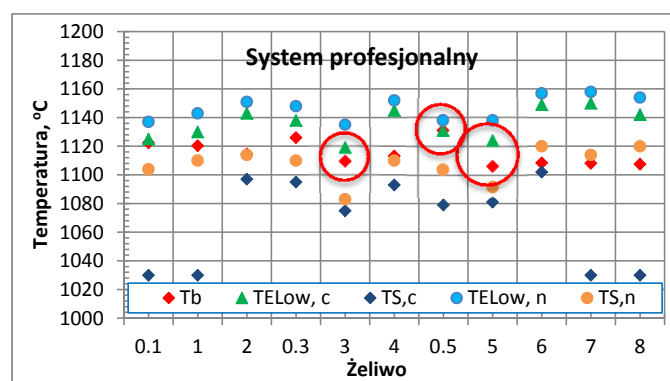
Rys. 4. Widok ekranu programu autorskiego z wynikami analizy krzywej krzepnięcia żeliwa 01 (u góry) oraz 3 (u dołu): a) w próbniku o obniżonej grubości ścianki i b) w typowym próbniku
 Fig. 4. Screenshots of the proprietary program “performance” and the results of analysis of the solidification curve of cast iron 01 (top) and 3 (bottom): a) in thin-wall sampler and b) in standard sampler

4. Analiza wyników

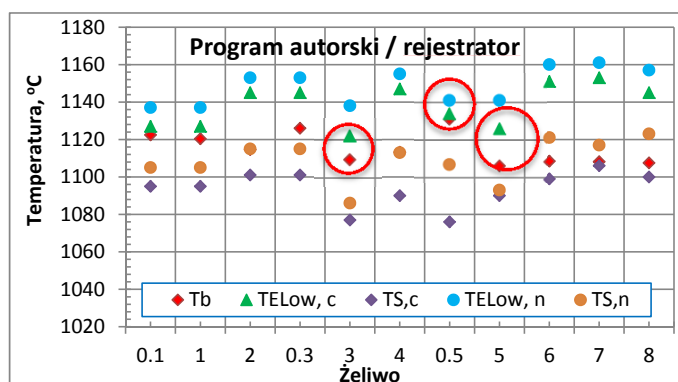
Dla oceny zagrożenia zabielenia próbek w czujnikach typowych i o obniżonej grubości ścianki, obliczono teoretyczną temperaturę krzepnięcia żeliwa poddawanego analizie termicznej. Temperatury TE_{low} i TS uzyskano z profesjonalnego systemu analizy termicznej i programu autorskiego / rejestratora cyfrowego (rys. 5). Temperaturę krzepnięcia białego obliczono ze składu chemicznego żeliwa z poszczególnych wytopów w oparciu o zależność: $T_b = 1148 - 15 \cdot \%Si + 3 \cdot \%Mn - 37 \cdot \%P$ [°C].

4. Discussion of results

To estimate the risk of the formation of hard spots in samples placed in standard samplers and in thin-wall samplers, the theoretical solidification temperature of cast iron subjected to thermal analysis was calculated. The TE_{low} and TS temperatures were obtained from the professional system of thermal analysis and from the proprietary program using a digital recorder (Fig. 5). The white solidification temperature was calculated from the chemical composition of cast iron made in individual melts based on the $T_w = 1148 - 15 \cdot \%Si + 3 \cdot \%Mn - 37 \cdot \%P$ [°C] formula.



a)



b)

Rys. 5. Temperatury: krzepnięcia białego, TE_{low} i TS określone przez: a) profesjonalny system analizy termicznej oraz b) program autorski / rejestrator cyfrowy; czerwonym okręgiem oznaczono występowanie zabielenia w strukturze

Fig. 5. White solidification temperatures TE_{low} and TS determined by: a) the professional thermal analysis system and b) proprietary system with digital recorder; red circles indicate the presence of hard spots in cast iron structures

Wartości dolnej temperatury eutektycznej oraz solidusu, określone przy użyciu profesjonalnego systemu analizy termicznej, były nieco niższe niż określone programem autorskim. Szczególnie duże różnice wystąpiły przy stosowaniu próbników pocienionych. Jest to z pewnością wynikiem zastosowanej niższej częstotliwości próbkowania w systemie profesjonalnym, gdzie zarejestrowany przebieg krzywej krzepnięcia jest bardziej płaski. Dodatkowym efektem niskiej częstotliwości próbkowania przy dużej szybkości krzepnięcia

The values of the lower eutectic temperature and solidus temperature determined by the professional system of thermal analysis were slightly lower than those calculated by the proprietary software. Particularly large differences occurred when thin-wall samplers were used. It was certainly the result of a lower sampling frequency applied by the professional system with the registered solidification curve much "flatter". Another effect of the low sampling frequency at a high solidification and cooling rate of cast iron in the thin-

i stygnięcia żeliwa w próbniku pocienionym jest błędne określenie temperatury solidus (TS).

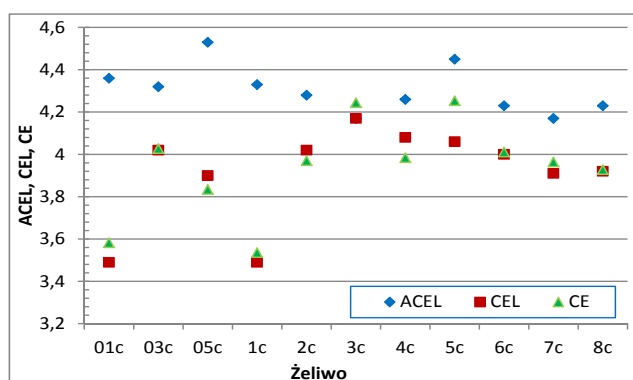
Zabielenie żeliwa wystąpiło we wlewkach pocienionych 3c, 05c (bardzo duże natężenie) oraz 5c. Śladowe ilości tego składnika ujawniono również we wlewku normalnym 05n. W przypadku próbki 5c, stwierdzono zabielenie pomimo, że dolna temperatura eutektyczna znacznie przewyższała temperaturę krzepnięcia białego. Jednak, w oparciu o uzyskane wyniki, nie da się jednoznacznie określić zależności wystąpienia zabielenia w odlewie od położenia temperatury krzepnięcia białego (Tb) w stosunku do TElow czy TS.

Porównanie wartości równoważników węgla, oznaczonych przez profesjonalny system analizy termicznej (ACEL), program autorski (CEL), na próbnikach pocienionych (c) i typowych (n) oraz obliczony ze składu chemicznego wg zależności: $CE = C + 0,33(Si + P) + 0,4S - 0,03Mn$ przedstawiono na rysunku 6. Szczególnie duże rozbieżności są widoczne w przypadku użycia do analizy termicznej próbników o obniżonej objętości (pocienionych). System profesjonalny znacznie zawyża wartości aktywnego równoważnika węgla (ACEL), dając nieprawdziwy obraz krzepnięcia odlewu (próbki).

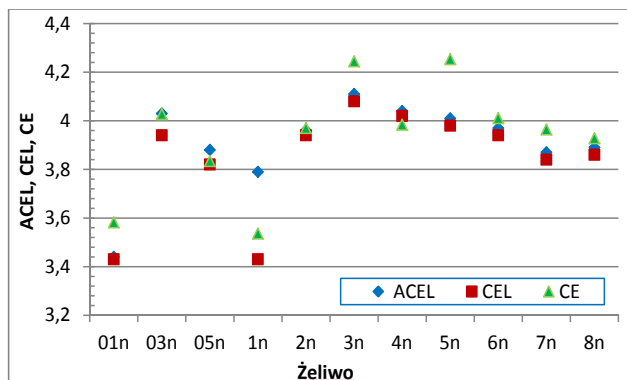
Hard spots were erroneous determination of the solidus temperature (TS).

Hard spots occurred in the thin-wall ingots 3c, 05C (very high level of intensity) and 5c. Trace amounts of this constituent were also disclosed in the standard ingot 05N. The presence of hard spots was detected in sample 5c in spite of the fact that the lower eutectic point was well above the white solidification temperature. However, based on the obtained results, it was not possible to clearly determine the relationship between the occurrence of hard spots in castings and the position of the white solidification temperature (Tw) relative to TElow or TS.

Figure 6 compares the carbon equivalent values determined by the professional system of thermal analysis (ACEL) and by the proprietary program (CEL) using thin-wall samplers (c) and standard samplers (n) with values calculated from the chemical composition using $CE = C + 0.33(Si + P) + 0.4S - 0.03Mn$ formula. Particularly large discrepancies have occurred when low-volume (thin-wall) samplers were used for the thermal analysis. The professional system greatly overestimated the value of activated carbon equivalent (ACEL) giving a false image of the casting (sample) solidification.



a)



b)

Rys. 6. Porównanie wartości równoważnika węglowego oznaczonego za pomocą testowanych systemów: a) w próbniku o obniżonej grubości ścianki oraz b) w próbniku typowym i obliczonego ze składu chemicznego

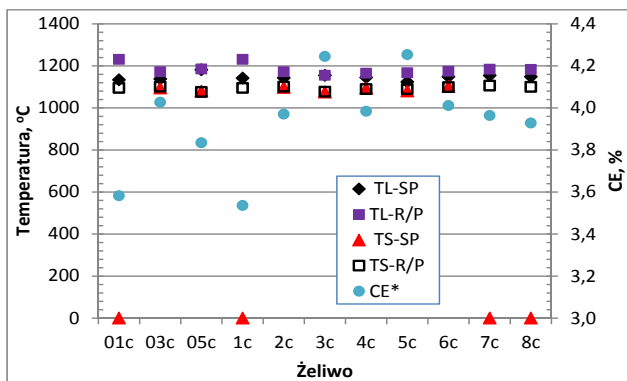
Fig. 6. A comparison of carbon equivalent values determined by the systems tested: a) in thin-wall sampler and b) in standard sampler and calculated from chemical composition

Podobna sytuacja występuje w przypadku określenia bardzo ważnej dla analizy procesu krzepnięcia żeliwa temperatury likwidus (TL) (rys. 7). Ponieważ temperatura ta jest podstawą do obliczeń wielu parametrów żeliwa to, niewłaściwe określenie jej wartości przez system analizujący powoduje błędną ocenę właściwości badanego żeliwa. Dla żeliwa podutektycznego, o małej wartości równoważnika węgla CE i przy szybko przebiegającym procesie krzepnięcia (charakterystycznym dla próbników pocienionych), profesjonalny system analizy termicznej błędnie określił wartość tej temperatury. W przypadku stosowania typowych próbników (mniejsza szybkość krzepnięcia), w większości przypadków,

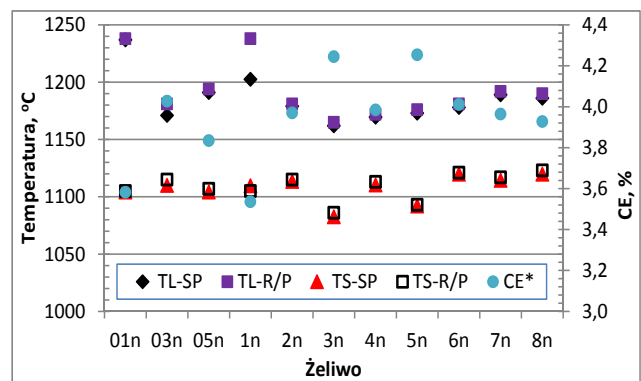
A similar situation occurred when the liquidus temperature, a very important parameter in the analysis of cast iron solidification, was determined (TL) (Fig. 7). As is generally known, this temperature is the basis for the calculation of numerous cast iron parameters, and therefore miscalculation of its value by the analysing system causes erroneous assessment of the cast iron properties. In the case of hypoeutectic cast iron with a low carbon equivalent CE and a high rate of solidification (characteristic of thin-wall samplers), the system of professional thermal analysis made mistakes in the calculation of this temperature. In standard samplers (lower solidification rate), in most

oba stosowane systemy pomiarowe podawały bardziej zbliżone wartości, z wyłączeniem najmniejszych wartości równoważnika CE.

cases, both measuring systems gave more consistent values, except for the lowest values of the CE equivalent.



a)



b)

Rys. 7. Porównanie temperatur likwidus i solidus żeliwa z wytopów doświadczalnych, krzepnącego w: a) pocienionych i b) typowych próbnikach, oznaczonych za pomocą testowanych systemów

Fig. 7. A comparison of liquidus and solidus temperature values determined by the systems tested for the cast iron from trial melts solidifying in: a) thin-wall samplers and b) standard samplers

5. Wnioski

1. Zastosowanie próbników o obniżonej objętości znacznie skraca czas potrzebny do wykonania analizy termicznej.
2. Zastosowanie autorskiego programu do analizy krzywej krzepnięcia umożliwia określenie parametrów charakterystycznych punktów na krzywych krzepnięcia
 - zapisanych równocześnie w wielu kanałach (do 15) rejestratora cyfrowego,
 - w przypadku wykonywania analizy termicznej w próbnikach o obniżonej objętości.
3. Rejestrator cyfrowy daje dostęp do danych pomiarowych całego przebiegu procesu krystalizacji żeliwa, w odróżnieniu od profesjonalnego systemu analizy, który daje wgląd wyłącznie w wyniki obliczeń wg algorytmów ustalonych przez producenta.
4. System profesjonalny analizy termicznej żeliwa, wskutek niskiej częstotliwości próbkowania ogranicza zastosowanie wyłącznie do typowych próbników i składu bliskiego eutektycznemu.
5. W przypadku otrzymania rażąco błędnych oznaczeń z analizatora profesjonalnego, nie ma możliwości wprowadzenia korekty. Oznacza to konieczność powtórzenia pomiaru, co nie zawsze jest możliwe.

5. Conclusions

1. The use of low-volume samplers considerably shortens the time required to perform the thermal analysis.
2. The use of proprietary software in the analysis of solidification curves allows specifying parameters of characteristic points on the solidification curves:
 - recorded simultaneously on several channels (15) of the digital recorder,
 - recorded during thermal analysis made in low-volume samplers.
3. The use of a digital recorder gives access to measurement data collected from the whole process of cast iron solidification, contrary to a professional system of analysis which gives insight only into the results of calculations following algorithms provided by the manufacturer.
4. Due to low sampling frequency, the use of a professional system of the cast iron thermal analysis is limited only to standard samplers and compositions close to the eutectic.
5. If grossly erroneous determinations are made by the professional analyser, there is no room for adjustment. This implies the need to repeat the measurement, which is not always possible.

6. Opracowany autorski program analizy krzepnięcia żeliwa, współpracujący z wielokanałowym rejestratorem cyfrowym, może być pomocny przy prowadzeniu prac badawczych w przypadku cienkościennych odlewów lub charakteryzujących się znacznym zróżnicowaniem grubości ścianek.
7. Program autorski, dzięki oparciu o zapisane dane źródłowe, może być rozwijany w zależności od potrzeb, przez wprowadzenie odpowiednich algorytmów.
6. The developed original cast iron solidification analysis program, cooperating with a multi-channel digital recorder, can be helpful in the research conducted on thin-wall castings or castings characterized by considerable diversity of the wall thickness values.
7. Owing to the stored source data, by introducing appropriate algorithms, the proprietary program can be tailored to the individual needs of its users.

Podziękowania

Badania wykonano w ramach pracy statutowej pt. „Analiza porównawcza krzywych krzepnięcia uzyskanych przy pomocy systemu ATAS oraz rejestratora MrAC-15” (zlec. 4010/02) oraz projektu finansowanego przez MNiSW (NCBiR) pt. „Opracowanie innowacyjnej technologii wytwarzania wielkotonażowych walców o zwiększonej trwałości eksploatacyjnej” (nr projektu PBS2/B5/25/2013).

Acknowledgements

The research was carried out within the framework of a statutory work entitled “Comparative analysis of solidification curves plotted with the use of an ATAS system and MrAC-15 recorder” (No. 4010/02) and within the framework of a project funded by the Ministry of Science and Higher Education (NCBiR) entitled “The development of innovative technology to produce high-tonnage rolls with increased service life” (Project No. PBS2/B5/25/2013).

Literatura/References

1. Popovski, V., Misterek, C., Kaiser, L. (2005). Metallurgical comparisons between operating conditions, types and fade effects in gray iron. *Proceedings of the AFS Cast Iron Inoculation Conference*, September 29–30 2005, Schaumburg, Illinois, 57–68.
2. Sheikh Abdolhossein, A., Nilli-Ahmadabadi, M. (2005). Fading investigation in ductile cast iron aided by cooling curve analysis. *International Journal of Cast Metals Research*, 18(5), 295–299.
3. Stawarz, M., Szajnar, J. (2005). Zastosowanie metody analizy termiczno-derywacyjnej do oceny jakości żeliwa sferoidalnego. *Przegląd Odlewnictwa*, 55(4), 256–261.
4. Górny, M., Tyrała, E. (2013). Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of thin-walled ductile iron castings. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(1), 300–305.
5. Pedersen, K.M., Tiedje, N.S. (2008). Graphite nodule count and size distribution in thin-walled ductile cast iron. *Materials Characterization*, 59(8), 1111–1121.
6. Vauchert, A., Jacquet, P., Rossi, F., Lagardette, P. (2009). Optimizing the inoculation of ductile cast iron using thermal analysis. *International Conference for Doctorants, WTF 2009, 46th Foundry Days*, 3rd June 2009, Brno, Czech Republic.
7. *ATAS Adaptacyjny System Analizy Termicznej. Przewodnik Użytkownika*. Nova Cast Foundry Solutions AB. (2009).
8. Sillén, R. (2002). *Some facts and hypotheses related to thermal analysis with ATAS*. *Ductile Iron News*, (2).
9. Zhao, H., Liu, B. (2001). Modeling of stable and metastable eutectic transformation of spheroidal graphite iron casting. *ISIJ International Journal*, 41(9), 986–991.