

**Zastosowanie próbników kubkowych o obniżonej objętości do badań krzepnięcia żeliwa**

**The use of low-volume cup samplers for test solidification of cast iron**

*Mieczysław Kuder<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Instytut Odlewnictwa, Zakład Stopów Żelaza, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

<sup>1</sup>*Foundry Research Institute, Department of Ferrous Alloys, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

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

**Streszczenie**

*Celem pracy była ocena możliwości i korzyści z zastosowania próbników o obniżonej objętości (pocienionych) do analizy termicznej żeliwa.*

*W ramach realizacji badań wykonano szereg wytopów żeliwa niestopowego i niskostopowego o zróżnicowanej strukturze. Po przeprowadzeniu zabiegów obróbki zaprawami magnezową i magnezowo-cerową oraz modyfikacji, wykonano analizę krzepnięcia w próbnikach o standardowych wymiarach i o obniżonej objętości za pomocą adaptacyjnego systemu analizy termicznej. Określono strukturę i właściwości wytrzymałościowe żeliwa we wlewkach próbnych Y typu I i II. Stwierdzono korzyści z zastosowania próbników o obniżonej objętości do badania procesu krystalizacji żeliwa, szczególnie w kontekście odlewów cienkościennych.*

*Słowa kluczowe: żeliwo, analiza termiczna, struktura, wytrzymałość*

**Abstract**

*The aim of this paper was to assess the possibilities and benefits of using low-volume (thinned) samplers for thermal analysis of cast iron.*

*As part of the research, a series of melts of plain cast iron and low-alloy cast iron with different structures were made. After carrying out treatment procedures with the use of magnesium and magnesium-cerium master alloys, the analysis of solidification in standard-sized and low-volume samplers over the adaptive thermal analysis system was made. The structure and strength properties on Y type I and II cast samples were determined. The research has shown benefits from the use of low-volume samplers to test the cast iron crystallization process, especially in the context of thin-walled castings.*

*Keywords: cast iron, thermal analysis, structure, strength*

**1. Wprowadzenie**

Badania, prowadzone od lat 60. XX wieku, udowodniły ścisły związek przebiegu krzywej krzepnięcia żeliwa, położenia charakterystycznych punktów tej krzywej z właściwościami odlewniczymi żeliwa, jak: skurcz, skłonność do tworzenia obciągnięć, jam skurczowych, porowatości, jak również powstałą strukturą po zakrzepnięciu w formie odlewniczej, a szczególnie morfologii wydzielań grafitu (postać, ilość, rozłożenie), i właściwościami mechanicznymi. W celu ustabilizowania jakości produkowanego żeliwa, podjęto próby wykorzystania nowych metod pomiarowych, w tym analizy krzywej krzepnięcia, zamiast tradycyjnych lub jako ich

**1. Introduction**

Research conducted since the 1960s has shown that there is a close relationship between the course of the cast iron solidification curve, the location of characteristic points of the curve, and the casting properties of the cast iron, such as: contraction (shrinkage), tendency to form shrinkage depressions, cavity pipes, porosity, as well as the post-solidification structure in the casting mould, especially the graphite morphology (form, quantity, distribution) and mechanical properties. In order to stabilize the quality of the produced cast iron, attempts were made to apply new measuring methods, including the analysis of the solidification curve, instead

uzupełnienie do bieżącej oceny jakości produkowanego stopu. Dotychczasowa praktyka zastosowania skupiała się na procesie otrzymywania żeliwa szarego i sferoidalnego [1–7]. Obecny rozwój produkcji odlewów z żeliwa wermikularnego, szczególnie wymagającego precyzji w prowadzeniu procesu metalurgicznego, wymusza również użycie precyzyjnych i szybkich narzędzi kontroli i sterowania tym procesem. Próby oceny jakości tego rodzaju żeliwa były wykonywane w Instytucie Odlewnictwa [8–10]. Dotychczasowe doświadczenia wynikające z prowadzenia szeregu pomiarów, pozwalają stwierdzić, iż system analizy termicznej może być z powodzeniem zastosowany do kontroli procesu metalurgicznego i wczesnej oceny jakości odlewów z różnych rodzajów żeliwa, w tym wermikularnego. Standardowo analizę termiczną prowadzi się z użyciem jednorazowych próbników kubkowych o przekroju kwadratowym i boku około 34 mm; trwa ona około 4 minut. Krzepnięcie żeliwa w próbnikach kubkowych o obniżonej do około 12 mm grubości ścianki trwa około 1,5 minuty. Duża szybkość chłodzenia próbki daje możliwość oceny skłonności żeliwa do zabielenia – informacja bardzo ważna przy produkcji cienkościennych odlewów.

## 2. Metodyka badawcza

Celem przeprowadzonych badań była ocena możliwości zastosowania adaptacyjnego systemu analizy termicznej do szybkiej oceny jakości żeliwa obrabianego stopami Mg z zastosowaniem próbników kubkowych o obniżonej objętości. Skupiono się na określeniu:

1. parametrów kilku najważniejszych punktów charakterystycznych krzywej krzepnięcia, jak: ACEL – aktywny równoważnik węglowy, TL – temperatura likwidus (początek krystalizacji),  $TE_{low}$  – dolna temperatura eutektyczna,  $TE_{high}$  – górna temperatura eutektyczna, S1 – zakres wydzielenia austenitu (lub grafitu) pierwotnego, GRF1 i GRF2 – wskaźniki wydzielenia grafitu, TS – temperatura solidus (koniec krystalizacji),
2. struktury, szczególnie morfologii wydzielenia grafitu,
3. właściwości wytrzymałościowych.

Procedura badawcza:

1. wszystkie wytopy przeprowadzono w piecu indukcyjnym średniej częstotliwości, o pojemności 50 kg,
2. obróbkę ciekłego metalu prowadzono w tyglu pieca w temperaturze 1430°C,

of traditional ones or in supplementation in the ongoing assessment of the quality of the produced alloy. Previous practices had focused on the production process of grey cast iron and spheroidal cast iron [1–7]. Current development of the production of vermicular cast iron, which requires special precision when conducting the metallurgical process, forces the use of precise and fast control tools for this process. Attempts to assess the quality of this type of cast iron were made at the Foundry Research Institute [8–10]. Previous experience in conducting a series of measurements shows that the thermal analysis system can be successfully used to control the metallurgical process and the initial assessment of the quality of castings made from different types of cast iron, including the vermicular cast iron. As a standard, thermal analysis is carried out with the use of disposable cup samplers of a square cross-section and side length of approximately 34 mm; it takes about 4 minutes. The solidification of cast iron in cup samplers with a wall thickness reduced to about 12 mm takes about 1.5 minutes. The high cooling rate of the sample allows for assessing the tendency of cast iron to hard spots – a crucial piece of information for the production of thin-walled castings.

## 2. Research methodology

The aim of this research was to assess the possibility of application of the adaptive thermal analysis system to quickly assess the quality of cast iron processed with Mg alloys using low-volume cup samplers. The focus was on identifying the following:

1. parameters of the most important characteristic points of the solidification curve, such as: ACEL – active carbon equivalent, TL – liquidus temperature (beginning of crystallization),  $TE_{low}$  – lower eutectic temperature,  $TE_{high}$  – higher eutectic temperature, S1 – range of primary austenite or graphite precipitation, GRF1 and GRF2 – graphite factors, TS – solidus temperature (end of crystallization),
2. structures, especially graphite morphology,
3. strength properties.

Research procedure:

1. all melts were performed in a medium frequency induction furnace with a capacity of 50 kilograms,
2. the treatment of the liquid metal performed in the crucible furnace at temperature of 1430°C,

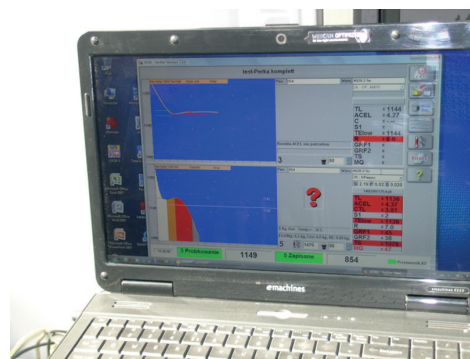
3. użyto: zaprawę FeSiMg 5,6%, modyfikatory Fe-Si-Sr, FeSi-La i FeSi-Ba (seria I) oraz zaprawę FeSiMg5RE6 i modyfikator FeSi-Ba (seria II),
  4. analizy termiczne z wykorzystaniem adaptacyjnego systemu analizy termicznej, równoległe w próbnikach standardowych i o zredukowanej objętości,
  5. wlewki próbne osobno odlewane Y2 o grubości 25 mm i 13 mm w formach wilgotnych,
  6. na próbkach wyciętych z wlewków próbnych określono strukturę oraz oznaczono właściwości wytrzymałościowe:  $R_{p0,2}$ ,  $R_m$ , A.
3. used for the treatment of liquid iron: FeSiMg 5.6% master alloy, inoculants FeSi-Sr, FeSi-La and FeSi-Ba (series I), FeSiMg5RE6 master alloy and an inoculant FeSi-Ba (series II),
  4. thermal analyses using the adaptive thermal analysis system, parallel in standard and low-volume samplers,
  5. separately cast test samples Y2 with a thickness of 25 mm and 13 mm in green sand moulds,
  6. samples cut from test ingots were used to determine the structure and strength properties:  $R_{p0,2}$ ,  $R_m$ , A.

Na [rysunku 1](#) pokazano stojaki z zalanymi próbnikami kubkowymi – typowym i o obniżonej objętości (a) oraz ekran programu ATAS z dwoma oknami obrazującymi krzywe krzepnięcia żeliwa w typowym próbniku (podczas wykresowania) oraz po zakończeniu analizy w próbniku o obniżonej objętości (b).

[Figure 1](#) shows racks with full cup samplers – standard and low-volume (a) and a screen of the thermal analysis software with two windows showing cast iron solidification curves in a conventional sampler (during drawing) and after the analysis in the low-volume sampler (b).



a)



b)

Rys. 1. Analiza termiczna systemem ATAS w próbnikach o typowej i obniżonej objętości

Fig. 1. Thermal analysis over the adaptive thermal analysis system in standard and low-volume cup samplers

### 3. Wyniki oznaczeń i badań

W [tabeli 1](#) zamieszczono składy żeliwa z dwóch serii wytopów doświadczalnych; I.1–I.4 z pierwszej serii – żeliwo niestopowe oraz II.1–II.4 – żeliwo niskostopowe.

W [tabeli 2](#) zamieszczono wartości wybranych parametrów krzywych krzepnięcia żeliwa w próbnikach standardowych i o zmniejszonej grubości. Na [rysunku 2](#) pokazano przykładowe ekrany programu analizy termicznej, obrazujące przebieg i niektóre parametry krzywych krzepnięcia żeliwa I.3 w próbnikach o różnej grubości ścianki. Mikrografowie zgładów trawionych odczynnikiem MiFe, uzyskanych za pomocą mikroskopu optycznego przy powiększeniu 100×, zestawiono na [rysunku 3](#).

Wyniki badań wytrzymałościowych żeliwa przedstawiono graficznie na [rysunku 4](#).

### 3. Results of determinations and research

[Table 1](#) presents compositions of cast iron taken from two series of experimental castings; I.1–I.4 from the first series – plain cast iron and II.1–II.4 – low-alloy cast iron.

[Table 2](#) shows the values of selected parameters of the cast iron solidification curves in the standard and reduced thickness cups. [Figure 2](#) presents the screens of the thermal analysis software showing cast iron solidification process and some parameters of the cast iron solidification no. I.3 in the different thickness samples. Photomicrographs of specimens etching MIFE reagent, obtained with an optical microscope at a magnification of 100×, are summarized in [Figure 3](#).

Cast iron strength tests results are shown graphically in [Figure 4](#).

Tabela 1. Skład chemiczny żeliwa z wytopów doświadczalnych  
Table 1. Compositions of cast iron from experimental castings

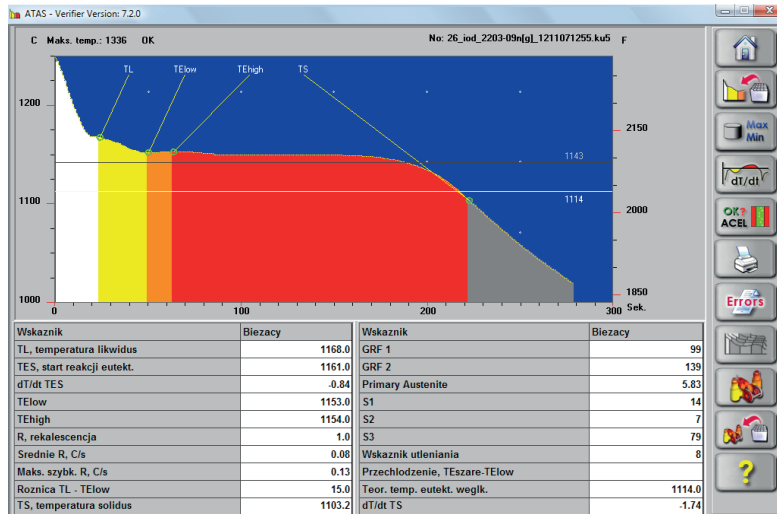
Żeliwo/ Cast iron	Skład chemiczny, % wag. / Chemical composition, wt. %									Uwagi/Notes		
	C	Si	Mn	P	S	Mg	CE	La <sup>1)</sup>				
I.1	3,84	2,57	0,06	0,049	0,014	0,029	4,66	0,0027	modyfikator z La / FeSi-La inoculant			
I.2	3,60	2,85	0,13	0,05	0,010	0,035	4,50	<0,001	modyfikator z Sr / FeSi-La inoculant			
I.3	3,35	3,10	0,15	0,045	0,010	0,060	4,33	0,0039	modyfikator z La / FeSi-La inoculant			
I.4	3,55	2,90	0,10	0,050	0,010	0,050	4,47	<0,001	modyfikator z Ba / FeSi-La inoculant			
									Cu, %	Ni, %	Mo, %	
II.1	3,70	2,40	0,50	0,048	0,010	0,018	4,32	0,64	0,61	0,23		
II.2.	3,85	1,45	0,09	0,045	0,012	0,014	4,24	0,62	0,55	0,35		
II.3.	3,62	2,15	0,39	0,046	0,010	0,013	4,18	1,02	0,01	0,27		
II.4.	3,99	2,34	0,47	0,046	0,016	0,016	4,60	0,01	1,29	0,42		

<sup>1)</sup> Zawartość La określono metodą spektrometryczną: CE = %C + 0,31%Si + 0,33%P - 0,027%Mn + 0,40%S + 0,074%Cu + 0,053%Ni + 0,22%Al - 0,015%Mo / The content of La was determined over the spectrometric method CE = %C + 0.31%Si + 0.33%P - 0.027%Mn + 0.40%S + 0.074%Cu + 0.053%Ni + 0.22%Al - 0.015%Mo

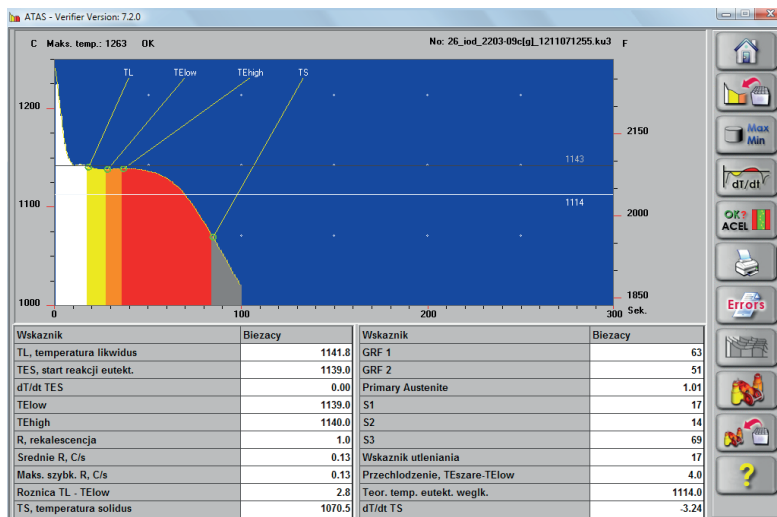
Tabela 2. Parametry charakterystycznych punktów krzywych krzepnięcia żeliwa z wytopów serii I, określonych adaptacyjnym systemem analizy termicznej, w kubkach standardowych (n) i o zmniejszonej grubości (c)

Table 2. Parameters of characteristic points of cast iron solidification curves from series I castings determined over the thermal analysis system in standard (n) and reduced thickness (c) cups

Żeliwo/ Cast iron	ACEL		TL, °C		TE <sub>low</sub> , °C		TE <sub>low</sub> , °C		S1		GRF1		GRF2		TS, °C	
	n	c	n	c	n	c	n	c	n	c	n	c	n	c	n	c
I.1	3,74	4,26	1204	1145	1154	n.o.	1157	n.o.	18	n.o.	88	n.o.	64	-	1102	n.o.
I.2	4,11	4,28	1162	1143	1151	1139	1154	1144	10	17	86	49	119	25	1087	1072
I.3	4,05	4,29	1168	1142	1153	1139	1154	1140	14	17	99	63	139	51	1103	1071
I.4	4,18	4,30	1154	1140	1152	1140	1156	1144	7	2	85	49	121	34	1106	1077
II.1	3,95	4,32	1180	1142	1149	1139	1149	1140	22	15	106	68	58	49	1092	1074
II.2	4,36	4,40	1134	1129	1134	1129	1141	1134	0	0	62	70	68	67	1091	1071
II.3	4,30	4,36	1151	1147	1143	1137	1143	1139	15	22	69	66	63	25	1092	1078
II.4	4,28	4,39	1143	1146	1142	1134	1144	1138	22	22	78	54	58	31	1092	1079

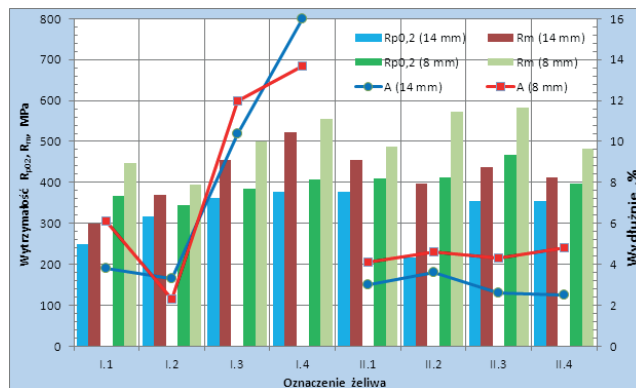


a)

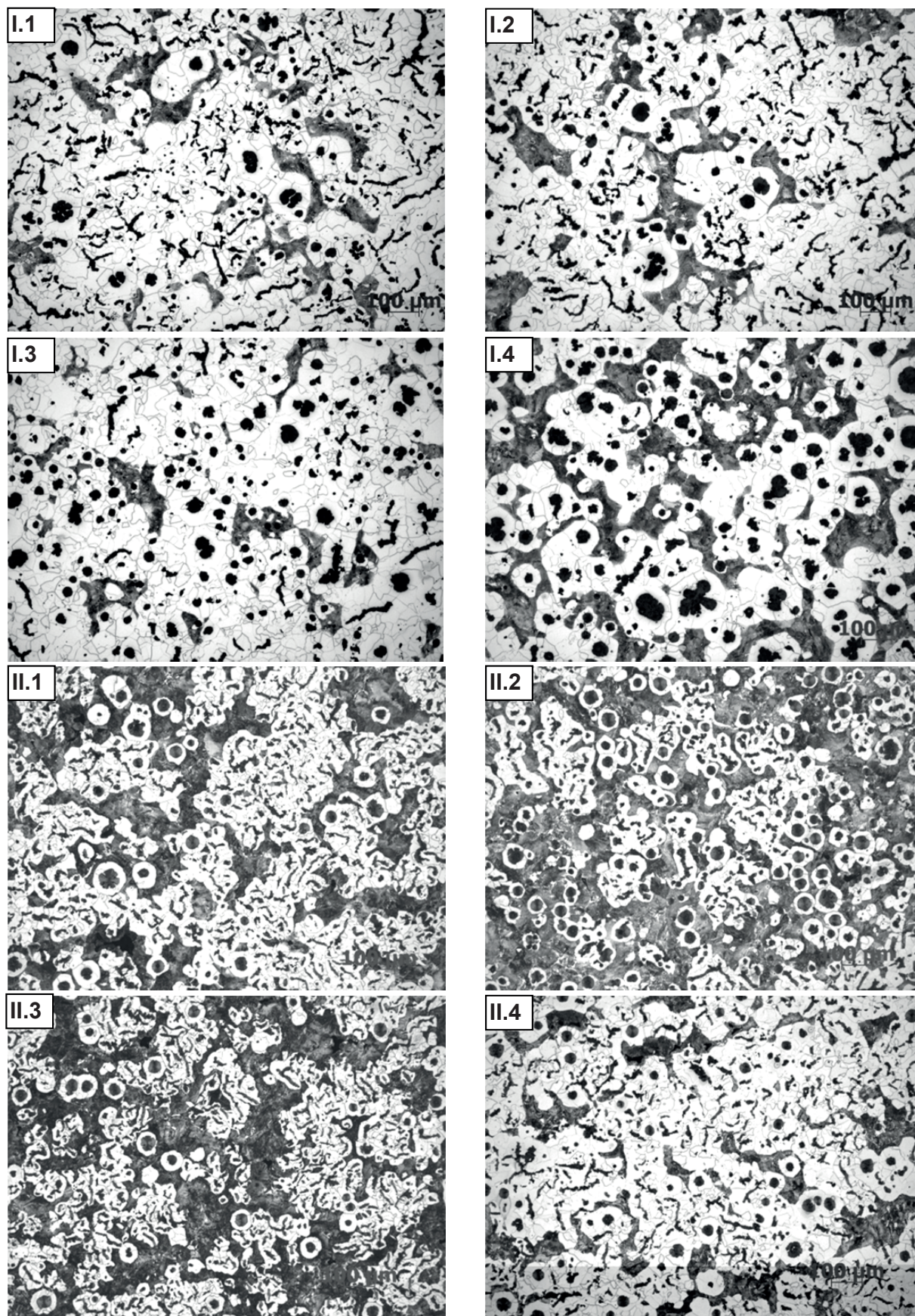


b)

Rys. 2. Ekrany adaptacyjnego systemu analizy termicznej z obrazami krzywej krzepnięcia żeliwa z wytopu nr I.3 i niektórymi jej parametrami dla próbnika typowego (a) i o obniżonej objętości (b)  
 Fig. 2. Screens of the adaptive thermal analysis software showing cast iron solidification curves from casting no. I.3 and some parameters for the standard (a) and low-volume samplers (b)



Rys. 4. Właściwości wytrzymałościowe żeliwa z wytopów doświadczalnych uzyskanych we wlewkach o grubości 25 mm i 13 mm  
 Fig. 4. Strength properties of cast iron from experimental castings obtained in 25 mm and 13 mm thick ingots



Rys. 3. Zestawienie mikrostruktur żeliwa z wytopów doświadczalnych serii I i II (wlewek 25 mm)  
Fig. 3. Comparison of cast iron microstructures from experimental castings series I and II (25 mm ingot)

#### 4. Analiza wyników

Struktura żeliwa z wszystkich wytopów żeliwa, badana na próbkach wyciętych z wlewków 25 mm, była ferrytyczno-perlityczna o zróżnicowanej zawartości perlitu (od około 5% do 50%) z mieszaniną grafitu wermikularnego (kształt III)\* i sferoidalnego (kształt: V i VI)\*. Tylko w żeliwie I.4 stwierdzono obecność wyłącznie grafitu sferoidalnego (kształt: V i VI)\*. We wlewkach 13 mm stwierdzono, w porównaniu z wlewkami 25 mm, nieco większy udział perlitu (o około 5%), większą dyspersję grafitu – drobniejsze wydzielenia i większą ich ilość na jednostkę powierzchni oraz nieco większy udział wydzieleni sferoidalnych.

Różnice w strukturze żeliwa we wlewkach o grubości 25 mm i 13 mm znalazły odbicie we właściwościach wytrzymałościowych:  $R_{p0.2}$ ,  $R_m$  i  $A$ . Z wyjątkiem żeliwa I.2 i I.4, gdzie wydłużenie żeliwa z wlewką 25 mm okazało się minimalnie większe (rys. 4).

Zgodnie z przewidywaniami przebiegi krzywych krzepnięcia żeliwa z wytopów doświadczalnych w próbnikach typowych i o obniżonej objętości (pocienionych), rejestrowanych przez system ATAS różniły się zdecydowanie (rys. 2). Uległy obniżeniu wszystkie temperatury charakterystyczne krzywych krzepnięcia ( $T_L$ ,  $T_{E_{low}}$ ,  $T_{E_{high}}$ ,  $T_S$ ), jak również inne parametry tych krzywych uległy skróceniu ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $GRF_1$ ,  $GRF_2$ ). W skrajnym przypadku (wytop I.1) system nie potrafił określić prawidłowo parametrów punktów charakterystycznych krzywej krzepnięcia; powodem mogła być zbyt mała częstotliwość próbkowania przy bardzo szybkim przebiegu procesu krzepnięcia żeliwa w pocienionym próbniku.

Na rysunkach 5 i 6 porównano parametry punktów charakterystycznych krzywych krzepnięcia, w próbnikach kubkowych standardowych i o obniżonej objętości, żeliwa z wytopów doświadczalnych.

Można zauważyć, że pomiary i oznaczenia wykonane w trakcie analizy termicznej żeliwa, przy użyciu próbników kubkowych o obniżonej objętości (pocienione), dały bardziej stabilne wyniki. Wartości wskaźnika  $GRF_2$  (tab. 2 i rys. 5) otrzymane na typowych próbkach osiągały bardzo wysokie wartości – 120–140 dla żeliwa nr 2, 3, 4 serii I oraz nr 1 serii II, czego nie zaobserwowano przy zastosowaniu próbników pocienionych. Konfrontując te wyniki z uzyskaną strukturą żeliwa z tych wytopów, można stwierdzić, że tak wysokie wartości mogły być wynikiem nie tyle postaci grafitu, jak pojawieniu się w próbce mikroporowatości, znacząco obniżającej przewodność żeliwa. Efekt taki nie występuje w próbkach o obniżonej objętości.

Przebieg krystalizacji żeliwa w próbnikach pocienionych przebiega ze znacznie większą szybkością, dlatego występują tu większe przechłodzenia niż w przypadku próbki typowego (rys. 6) i inne usytuowanie temperatur charakterystycznych procesu:  $T_L$ ,

\* Klasyfikacja wydzieleni grafitu wg normy PN-ISO 945-1:2009.

#### 4. Analysis of results

The structure of cast iron from cast iron heats, tested on samples cut from 25 mm ingots, was ferritic-pearlitic with variable pearlite content (from approximately 5% up to 50%) with a mixture of vermicular graphite (form III)\* and spheroidal graphite (shapes: V and VI)\*. The presence of only spheroidal graphite (shapes: V and VI)\* was found in cast iron I.4. In 13 mm ingots, compared with 25 mm ingots, a slightly greater participation of pearlite (about 5%) and an increased dispersion of graphite were observed – finer particles and their increased amount per area unit – and a slightly greater participation of spheroidal particles.

Differences in the structure of cast iron in 25 mm and 13 mm thick ingots were reflected in strength properties:  $R_{p0.2}$ ,  $R_m$  and  $A$ . The only exceptions were cast irons I.2 and I.4 wherein the elongation of the cast iron from the 25 mm ingot turned out to be slightly greater (Fig. 4).

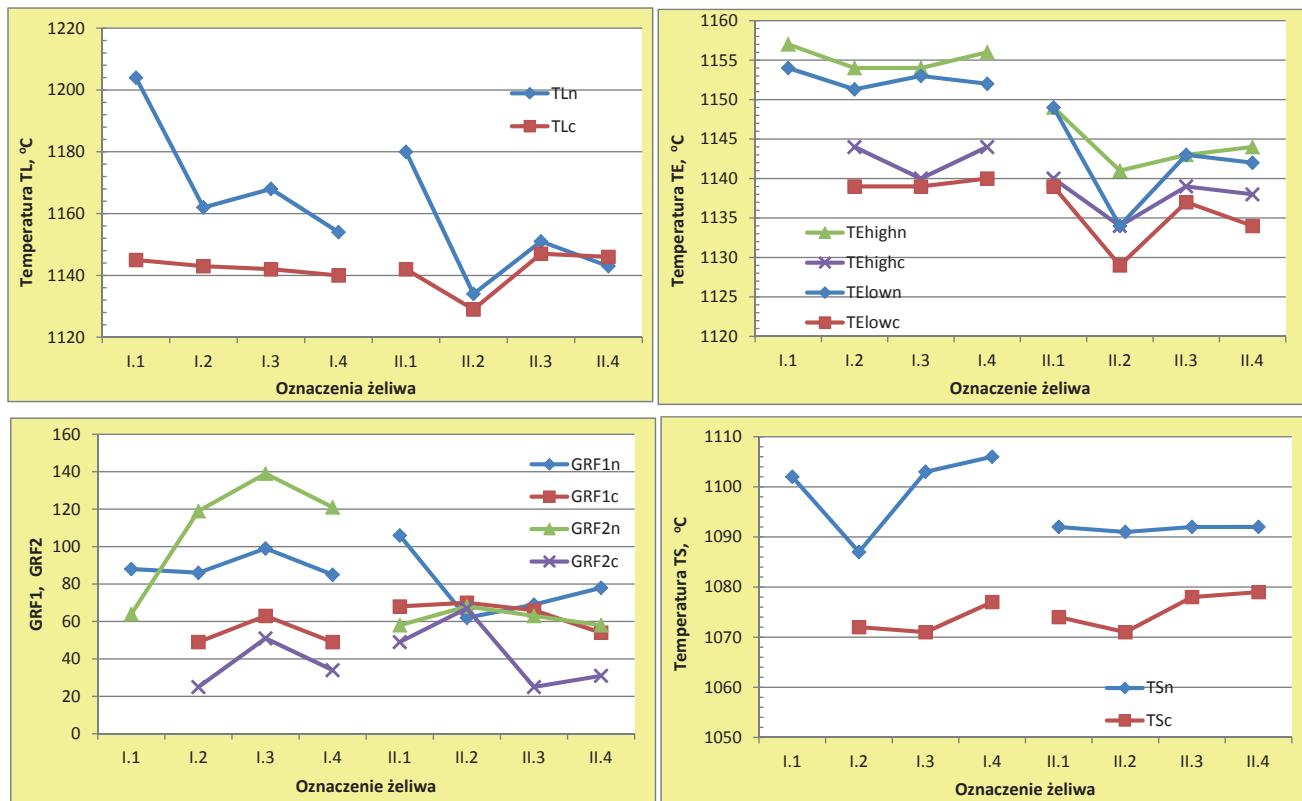
As predicted, the consequences of cast iron solidification curves from experimental melts in standard and low-volume (thinned) samplers recorded by the adaptive thermal analysis system differed significantly (Fig. 2). All temperatures typical of solidification curves ( $T_L$ ,  $T_{E_{low}}$ ,  $T_{E_{high}}$ ,  $T_S$ ) as well as other characteristics of these curves were decreased or shortened ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $GRF_1$ ,  $GRF_2$ ). In extreme cases (heat I.1), the system was unable to correctly determine the parameters of characteristic points of the solidification curve; the reason for such a situation could be the too low sampling frequency at a rapid course of the solidification process of cast iron in the thinned sampler.

Figures 5 and 6 present a comparison of the parameters of characteristic points of solidification curves in standard and low-volume cup samplers, cast irons from the experimental melts.

It may be noted that the measurements and markings made using low-volume (thinned) cup samplers during the thermal analysis of cast iron provided more stable results. Values of the  $GRF_2$  indicator (Tab. 2 and Fig. 5) obtained with the use of typical samples had high values – 120–140 for cast irons no. 2, 3, 4 in series I and no. 1 in series II, which was not observed when thinned samplers were used. When confronting these results with the obtained structure of cast iron from these heats, it can be concluded that the high values may have been the result of microporosity in the sample, which decreased the conductivity of cast iron to a significant extent, not the graphite form as had been believed. This effect does not occur in low-volume samples.

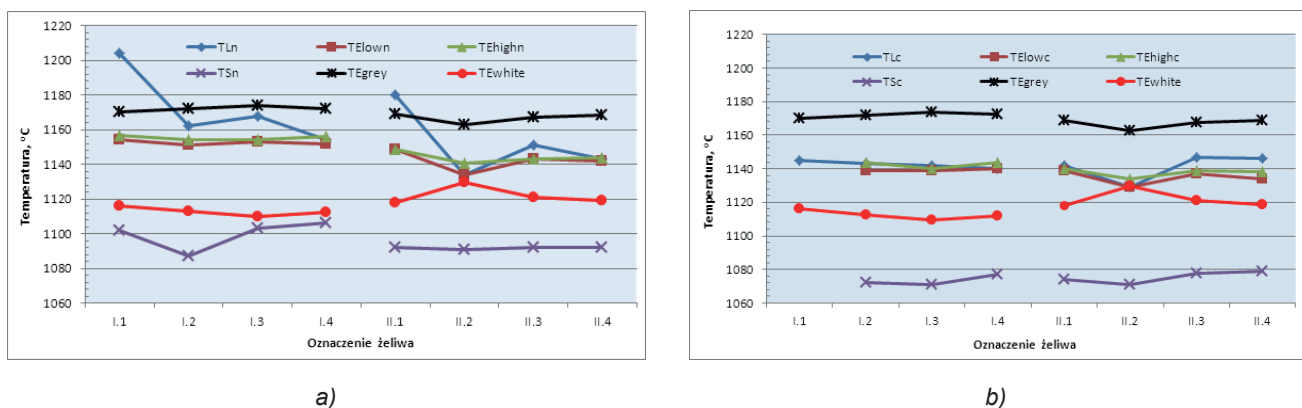
The course of cast iron crystallization in thinned samplers proceeds at a much faster rate as greater supercooling than in the case of a standard sampler is observed in this example (Fig. 6). Moreover, the location

\* Classification of graphite according to PN-ISO 945-1:2009 standard.



Rys. 5. Wartości parametrów  $T_L$ ,  $T_{E_{low}}$ ,  $T_{E_{high}}$ ,  $GRF1$ ,  $GRF2$  żeliwa z wytopów doświadczalnych, określone w próbnikach normalnych (n) i o obniżonej objętości (c)

Fig. 5. Values of parameters  $T_L$ ,  $T_{E_{low}}$ ,  $T_{E_{high}}$ ,  $GRF1$ ,  $GRF2$  of cast iron from experimental castings determined in standard (n) and low-volume (c) samplers



Rys. 6. Temperatury charakterystyczne krzywych krzepnięcia żeliwa wraz z obliczonymi temperaturami krzepnięcia żeliwa szarego i białego. Próbnik typowy (a) i o obniżonej objętości (b)

Fig. 6. Typical temperatures for cast iron solidification curves along with calculated temperatures for white and grey cast iron. Standard (a) and low-volume (b) samplers

$T_S$ ,  $T_{E_{low}}$ ,  $T_{E_{high}}$  względem teoretycznych temperatur krzepnięcia szarego  $T_{E_{grey}}$  i białego  $T_{E_{white}}$ . W przypadku zastosowania pocienionych próbników przebieg krzywej krystalizacji, a szczególnie usytuowanie wartości  $T_{E_{low}}$  w stosunku do temperatury krzepnięcia białego dla danego żeliwa, wyraźnie wskazuje na zagrożenie możliwością wystąpienia zabeleń w cieńszych ścian-

of temperatures typical of the process is different:  $T_L$ ,  $T_S$ ,  $T_{E_{low}}$ ,  $T_{E_{high}}$  relative to the theoretical solidification temperatures of grey  $T_{E_{grey}}$  and white  $T_{E_{white}}$ . For the use of the thinned samplers, the course of the crystallization curve, especially the location of  $T_{E_{low}}$  in relation to the white solidification temperature for a given cast iron, clearly indicates a risk of hard spots in the thin-walled



kach odlewów. Daje również obraz jakości zastosowanego modyfikatora, wykonanego zabiegu lub zaniku jego działania.

castings. It also provides a picture of the quality of the applied modifier, the performed treatment or loss of its activity.

## 5. Wnioski

W wyniku badań stwierdzono, że przy zastosowaniu do analizy termicznej żeliwa próbników kubkowych o obniżonej objętości (pocienionych), w porównaniu do próbników typowych:

1. ulega skróceniu czas prowadzenia analizy,
2. lepiej można przewidzieć zagrożenie wystąpienia zabielań w cienkich ściankach odlewów,
3. można uniknąć błędów pomiaru wynikających z pojawienia się porowatości w próbce pomiarowej,
4. niezbędna jest modyfikacja systemów analizy termicznej w kierunku zwiększenia częstotliwości próbkowania, co powinno zwiększyć dokładność pomiaru, prawidłowego oznaczania temperatur i innych charakterystycznych parametrów krzywych krzepnięcia z uwagi na większą szybkość przebiegu procesu krzepnięcia,
5. niezbędne jest stworzenie bazy danych dla gatunków żeliwa odpowiednio do zastosowanych pocienionych próbników, a niezbędnych do oceny jakości wytapianego stopu.

## 5. Conclusions

The research on the use of low-volume (thinned) cup samplers for the thermal analysis of cast iron in comparison to standard samplers has shown the following:

1. the time of the analysis is shortened,
2. the risk of hard spots in the thin-walled castings can be often predicted,
3. measuring mistakes resulting from the porosity in a measuring sample can be avoided,
4. the adaptive thermal analysis system must be upgraded towards increasing the sampling frequency; the software must be modified to increase the accuracy of measurement and calculation of derivatives, correct determination of temperatures and other characteristics of solidification curves at higher speeds of the process,
5. it is necessary to create a database for cast iron grades respectively to the thinned samplers which are necessary to assess the quality of cast alloys.

## Podziękowania

Publikacja powstała w oparciu o wyniki pracy statutowej pt. „Zastosowanie systemu ATAS do sterowania procesem metalurgicznym żeliwa wermikularnego”, zrealizowanej w 2013 r., sfinansowanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (zlec. 3021/00).

## Acknowledgements

This publication has been prepared based on the results of a statutory research paper entitled “Application of the ATAS system to control the vermicular cast iron metallurgical process” realized in 2013 and financed by the Ministry of Science and Higher Education (no. 3021/00).

## Literatura/References

1. ATAS Adaptacyjny System Analizy Termicznej. Przewodnik użytkownika. NovaCast Foundry Solutions AB, (2009).
2. Charakterystyka systemu ATAS (Zaawansowanej analizy termicznej). Materiały szkoleniowe firmy NovaCast Foundry Solutions.
3. Sillen R. Poszukiwanie prawdziwego punktu eutektyki (TEP) – Zasadnicze zadanie dla skutecznej kontroli procesu produkcyjnego żeliwa sferoidalnego, tłum. R. Piech.
4. Van Der Perre W. Pomiar wartości przechłodzenia eutektycznego jako metoda oceny jakościowej żeliwa szarego. Materiały szkoleniowe firmy Heraeus Electro-Nite Polska, tłum. W. Węgrzyn.
5. Yang Y., Alhainen J. (1992). Estimation of the tendency towards shrinkage in spheroidal-graphite iron melts using thermal analysis. *Cast Metals*, 5(2), 73.
6. Cabanne P.-M. *Thermal analysis: A useful technique for the foundryman*. Sorelmetal Technical Services, (no. 103).

7. *Thermal Analysis of Cast Iron*. Materiały szkoleniowe firmy Heraeus Electro-Nite.
8. Kuder M. (2012). Nowoczesna aparatura badawcza stosowana w technologii wytopów żeliwa odpornego na zmęczenia cieplne [w:] *Nowoczesne tworzywa odporne na zmęczenie cieplne. Część I. Zagadnienia ogólne*. Kraków: Instytut Odlewnictwa, 54–65.
9. Kuder M., Pytel A. (2012). Ocena stanu metalurgicznego żeliwa z grafitem wermikularnym w oparciu o pomiar aktywności tlenu i wybrane parametry krzywej krystalizacji i stygnięcia [w:] *Nowoczesne tworzywa odporne na zmęczenie cieplne. Część I. Zagadnienia ogólne*. Kraków: Instytut Odlewnictwa, 66–74.
10. Kuder M., Pytel A. (2013). Próba oceny jakości żeliwa z różną postacią grafitu w oparciu o pomiar aktywności tlenu w ciekłym stopie i wybrane parametry krzywej krystalizacji [w:] *Nowoczesne tworzywa odporne na zmęczenie cieplne*. Zakopane, 23–24 maja 2013.