

# Ocena jakości metalurgicznej żeliwa sferoidalnego w oparciu o analizę termiczną ATAS

M. Ronduda<sup>a\*</sup>, A. Zaczyński<sup>a</sup>, K. Schmalenberg<sup>b</sup>

<sup>a</sup> AGH - Akademia Górniczo - Hutnicza im. St. Staszica,  
Katedra Inżynierii Stopów i Kompozytów Odlewanych,  
Wydział Odlewnictwa, ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków, Polska

<sup>b</sup> AGH - Akademia Górniczo - Hutnicza im. St. Staszica,  
Katedra Inżynierii Procesów Odlewniczych,  
Wydział Odlewnictwa, ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków, Polska

\* Kontakt korespondencyjny: e-mail: marek.ronduda@odlewnie.polskie.pl

Otrzymano 20.11.2015; zaakceptowano do druku 29.12.2015

## Streszczenie

Przedstawiono dwie metody oceny stabilności jakości metalurgicznej ciekłego metalu podczas przetrzymywania stopu w piecu, sferoidyzacji i modyfikacji. Powszechnie stosowane prowadzenie procesu metalurgicznego bazuje się na doborze tworzywa o określonym równoważniku węglowym CE z wykorzystaniem wyników analizy spektralnej składu chemicznego stopu. Wprowadzenie analizy termicznej pozwoliło na procesowy monitoring on-line wykorzystujący aktywny równoważnik węglowy ACEL. Zastosowana analiza termiczna (system ATAS) umożliwiła uzyskanie większej stabilności procesowej otrzymywania odlewów z żeliwa sferoidalnego bez porowatości skurczowej.

**Słowa kluczowe:** Analiza termiczna, Żeliwo sferoidalne, ATAS

## 1. Wprowadzenie

Dobór składu chemicznego, a w szczególności zawartości węgla i krzemu, dla odlewów o różnej grubości ścianki jest powszechnie stosowaną praktyką odlewniczo-metalurgiczną. Znajdują tu zastosowania zalecenia ogólnie dostępne [1,2], opisujące te zależności tzw. równoważnikiem węgla CE. Wskaźnik ten jest opisywany jedną z powszechnie stosowanych zależności:

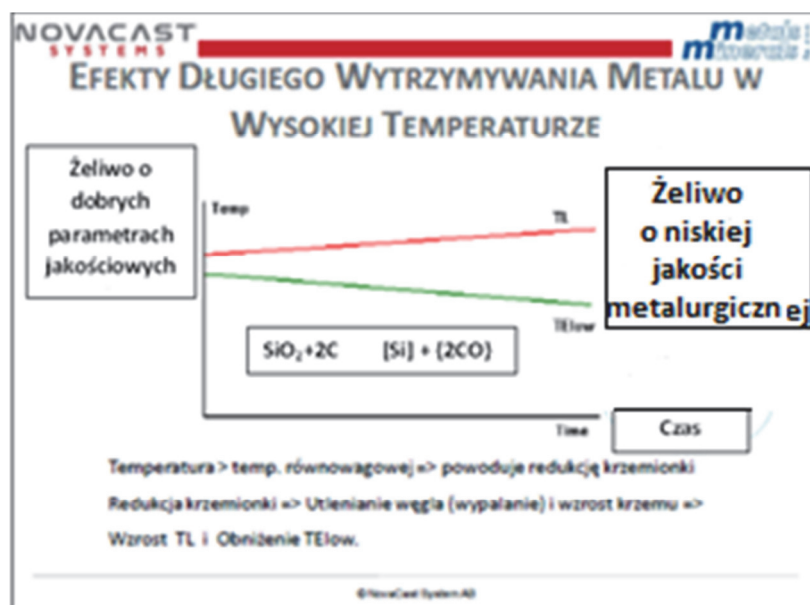
$$CE = C + 1/3 (Si + P) \quad (1)$$

gdzie:

C, Si, P – oznaczają procentowe zawartości węgla, krzemu i fosforu w żeliwie.

Podczas długiego przetrzymywania w piecu zawartość węgla, jak i krzemu w ciekłym metalu nie jest jednak stała (rys. 1) [3]. Powoduje to pogorszenie jego jakości metalurgicznej.

Wartości równoważnika CE dobrane praktycznie dla wybranego odlewu nie gwarantują jednak stabilności procesowej oraz w pełni nie eliminują porowatości w odlewach. Posługiwanie się wartością CE w procesie wytapiania, obróbki pozapiecowej i dynamicznego zalewania (linia automatyczna z zalewarką) żeliwa sferoidalnego jest zawodne z co najmniej dwóch zasadniczych przyczyn:



Rys. 1. Zmiany jakości żeliwa wygrzewanego w piecu [3]

- o wartości CE użytej porcji żeliwa dowiadujemy się po kilku minutach z analizy spektralnej próbki pobranej tuż przed zalewaniem żeliwa do form,
- analiza spektralna podaje całkowitą zawartość węgla w żeliwie, a ta ilość jest częstokroć inna niż tzw. węgiel aktywny biorący udział w krzepnięciu eutektycznym.

Węgiel aktywny w niektórych przypadkach wydzielany podczas krystalizacji stopu Fe-C jest mniejszy niż całkowita zawartość węgla w żeliwie tak w przypadku żeliwa nadeutektycznego (grafit pierwotny wydzielany z cieczy), jak i żeliwa podeutektycznego (węgiel zawarty w austenicie) [4].

Wykorzystanie analizy termicznej do diagnozowania stanu żeliwa wyjściowego i żeliwa po obróbce pozapiecowej (sferoidyzacja i modyfikacja) umożliwia ocenę jakości metalurgicznej kąpieli metalowej. Żeliwo o dobrej jakości metalurgicznej cechuje się następującymi właściwościami:

- małą skłonnością do tworzenia wad odlewniczych typu skurczowego,
- stabilną morfologią grafitu sferoidalnego,
- adekwatnie do danego gatunku żeliwa dobrymi właściwościami mechanicznymi.

W żeliwie, którego równowagowy skład chemiczny jest zbliżony do eutektycznego, zależnie od sposobu jego obróbki pozapiecowej krystalizacja może rozpocząć się od wydzielania się zarówno dendrytów austenitu pierwotnego, jak i ziaren grafitu pierwotnego. Analiza termiczna krystalizacji żeliwa z grafitem kulkowym pozwala na podstawie analizy krzywej stygnięcia próbki określić, jak wygląda ścieżka krystalizacji analizowanego ciekłego stopu i jaki jest stopień jej odchylenia od krystalizacji czysto eutektycznej.

Analiza termiczna ATAS® (Adaptive Thermal Analysis System) oparta jest na analizie wartości uzyskanych z krzywej stygnięcia próbki żeliwa i jej pierwszej pochodnej (rys. 2) [4].

Opis parametrów analizy termicznej:

**TL** – Temperatura likwidus. Temperatura likwidus przedstawiana jest jako poziomy przystanek (plateau), spowodowany wydzielaniem się austenitu pierwotnego w żeliwie podeutektycznym i jako minimalna temperatura dla stopów eutektycznych.

Dla żeliwa nadeutektycznego temperatura likwidus przedstawia wydzielenia grafitu pierwotnego. Temperatura likwidus jest używana do obliczania aktywnego równoważnika węgla (ACEL) jak również prowadzenia wytopu w oparciu o sugerowane korekty.

**TElow** – Najniższa temperatura przemiany eutektycznej (wysokie wartości są zalecane).

**TEhigh** – Najwyższa temperatura przemiany eutektycznej.

**S1** – Wydzielenia austenitu. Pole to występuje w zakresie temperatur TL i TElow.

**ACEL** – Aktywny Równoważnik Węgla (musi mieścić się w określonych granicach). ACEL jest ważny dla żeliwa końcowego z tych samych powodów, co dla żeliwa wyjściowego. Jednakże dla żeliwa końcowego, jest już za późno, aby móc wprowadzić korektę. Dlatego też, tak istotne jest, aby korekta ACEL odbywała się na poziomie żeliwa wyjściowego (na piecach).

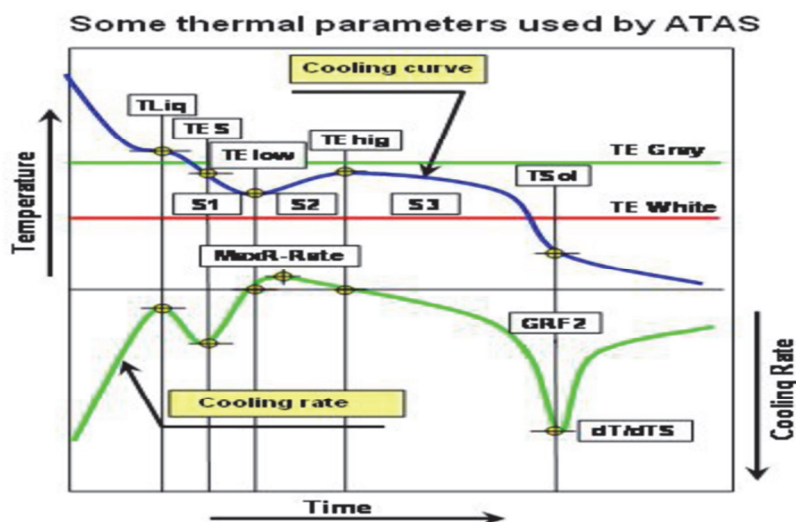
**R** – Rekalescencja = TEhigh - TElow (niskie wartości są korzystne),

**GRF 1** – Współczynnik grafitu 1 (wysokie wartości są zalecane),

**GRF 2** – Współczynnik grafitu 2 (niskie wartości są zalecane),

**TS** – Temperatura solidus (wysokie wartości są zalecane).

System ATAS wykorzystuje do analizy termicznej próbnik o znormalizowanych wymiarach, którego moduł cieplny wynosi  $R_p = 0,7$  cm, zaś aktywny równoważnik węglowy ACEL przyjmuje wartość 4,3.



Rys. 2. Charakterystyczne parametry analizy termicznej do oceny jakości ciekłego metalu [4]

Dla tych warunków krystalizacja żeliwa w próbniku będzie eutektyczna. W przypadku odlewów grubościennych o modułach  $R_g > R_p$  ciekły metal należy przygotować tak, by ACEL był mniejszy niż 4,3. Wówczas odlew (lub jego węzeł cieplny) ma mikrostrukturę eutektyczną, zaś system ATAS wskazuje, że żeliwo w kubku krystalizować będzie jako podeutektyczne.

W przypadku odlewów cienkościennych o modułach  $R_c < R_p$  ciekłe żeliwo winno cechować się wartością ACEL większą niż 4,3. Krystalizacja żeliwa w odlewie (lub w jego węźle cieplnym) będzie odbywać się w strefie sprzężonego wzrostu eutektyki, zaś w próbniku będzie miała charakter nadeutektyczny.

Dla właściwego prowadzenia ciekłego stopu konieczny jest system analizy termicznej pozwalający oceniać żeliwo „wyjściowe” w piecu oraz przy linii formierskiej dla oceny ciekłego stopu po zabiegu sferoidyzowania i modyfikowania.

## 2. Zakres badań

Parametry procesowe ciekłego metalu, przeznaczonego do wytwarzania żeliwa z grafitem kulkowym, oceniano stosując powszechnie znany równoważnik węglowy CE (określany w oparciu o analizę spektralną) oraz wskaźniki uzyskane z analizy termicznej. W tym celu przeprowadzono dwie serie badań.

Wytopy pierwszej serii prowadzono w klasyczny sposób, w drugiej zaś wykorzystano możliwości systemu ATAS podpowiadające metalurgowi działania umożliwiające utrzymanie stabilności procesowej w okresie rozlewania ciekłego metalu z danego wytopu.

Badania wykonano, pobierając próbki ciekłego metalu z produkcyjnych wytopów. W obu seriach żeliwo wytapiano w 7-tonowym piecu indukcyjnym. Ciekły stop pobierano porcjami ok. 800 kg za pomocą kadzi smukłej, zawieszanej na

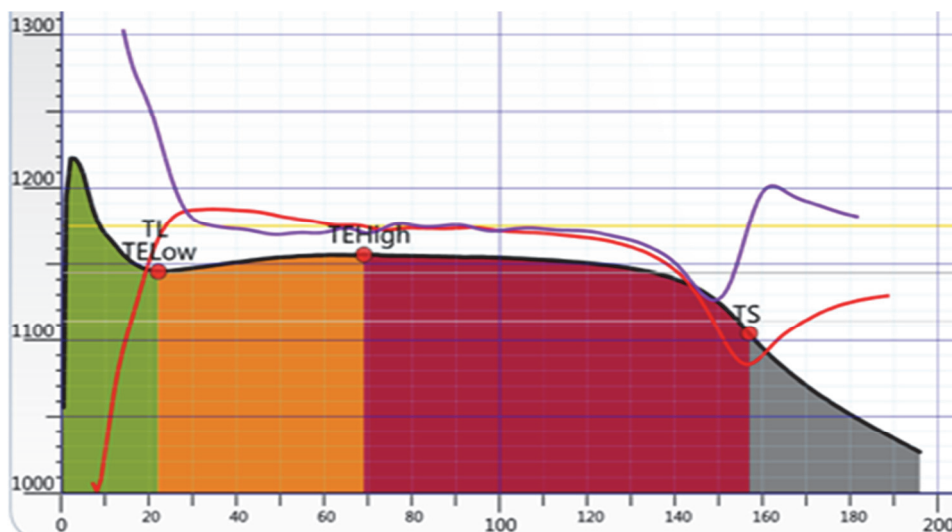
wadze suwnicowej. Zabiegu sferoidyzowania dokonano metodą wadze suwnicowej. Zabiegu sferoidyzowania dokonano metodą przewodu elastycznego (system Progelta). Ilość wprowadzonego nośnika magnezu zależna była od wagi i temperatury żeliwa w kadzi smukłej oraz od zawartości siarki w żeliwie wyjściowym. Po procesie sferoidyzacji żeliwo przelewano do kadzi zalewowych, wprowadzając modyfikator barowy w ilości 0,4 % na strugę ciekłego stopu. Modyfikację wtórną przeprowadzano na linii automatycznej w ilości 0,15 %, stosując podajnik modyfikatora. Przed procesem sferoidyzacji pobierano z kadzi próbę do analizy spektralnej, zaś drugą próbę do oceny składu chemicznego pobierano w czasie zalewania form z kadzi zbiornika wlewowego. Próbkę do analizy termicznej pobierano ze strugi żeliwa wlewanego do form. W drugiej serii analizowano próbkę żeliwa z kadzi smukłej przed procesem sferoidyzacji.

Przykładowy wykres krzywej stygnięcia i jej pierwszej pochodnej przedstawiono na rys. 3 [5].

Z rysunku 3 wynika, że żeliwo w próbniku charakteryzowało się mikrostrukturą eutektyczną. Wyniki pierwszej serii badań przedstawiono w tabeli 1 i na rysunku 4.

Przetrzywanie ciekłego metalu w piecu trwało ponad 80 min. Podczas wytopu utrzymywano parametry żeliwa po obróbce pozapiecowej (sferoidyzacja i modyfikacja) w wyniku prowadzenia analizy spektralnej (C, Si, CE). Uzyskano również informacje z prowadzonej analizy systemem ATAS dotyczące aktywnego równoważnika ACEL i węgla ocenianego przez system analizy termicznej – C(ATAS).

Druga seria badań dotyczyła wytopu przeznaczonego dla odlewów posiadających duży węzeł cieplny, dla którego dobrano wartość ACEL 4.0-4.1. Badano tak żeliwo wyjściowe, jak i żeliwo po obróbce pozapiecowej. Wyniki parametrów żeliwa wyjściowego przedstawiono na rysunku 5, zaś żeliwa po obróbce pozapiecowej na rysunku 6



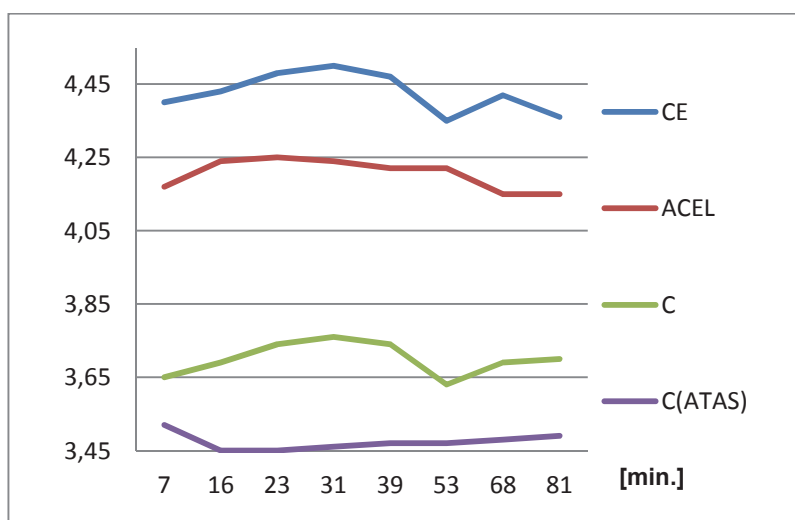
Rys. 3. Wyniki analizy termicznej [5]

Tabela 1. Parametry procesowe żeliwa – I seria

Czas [min]	C [%]	Si [%]	S [%]	Mg [%]	CE	C [%] (ATAS)	ACEL
7	3,65	2,45	0,011	0,044	4,40	3,52	4,17
16	3,69	2,40	0,010	0,046	4,43	3,45	4,24
23	3,74	2,40	0,010	0,042	4,48	3,45	4,25
31	3,76	2,40	0,011	0,040	4,50	3,46	4,24
39	3,74	2,34	0,011	0,041	4,47	3,47	4,22
53	3,63	2,35	0,010	0,045	4,35	3,47	4,22
68	3,69	2,35	0,012	0,044	4,42	3,48	4,15
81	3,70	2,15	0,010	0,043	4,36	3,49	4,15

Wartość równoważnika CE żeliwa z poszczególnych kadzi w pierwszej serii wytopów zawarta była w granicach 4,35 – 4,50, co wskazuje na małą stabilność procesową. Proces metalurgiczny drugiej części badań był prowadzony w oparciu o analizę termiczną żeliwa wyjściowego i żeliwa po zabiegu sferoidyzowania i modyfikowania. System umożliwia prowadzenie wytopu tak, by była zachowana, ustalona dla odlewów zalewanych żeliwem, wartość parametru ACEL w przedziale 4,0 – 4,1. Istniejący w systemie ATAS moduł ekspercki sugerował, po analizie termicznej kolejnej kadzi, wprowadzanie do pieca nawęglacza, bądź stali dla regulowania zawartości węgla oraz wartości ACEL.

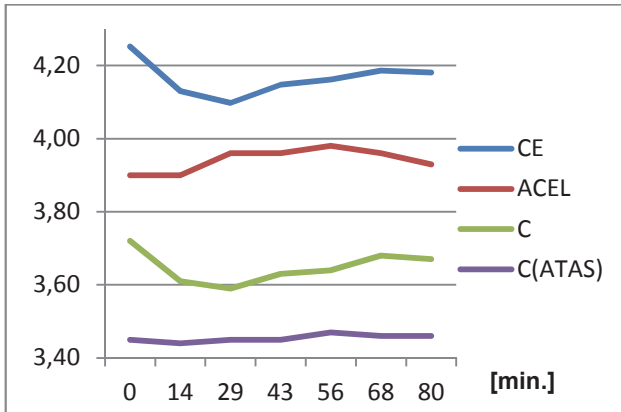
### 3. Analiza wyników



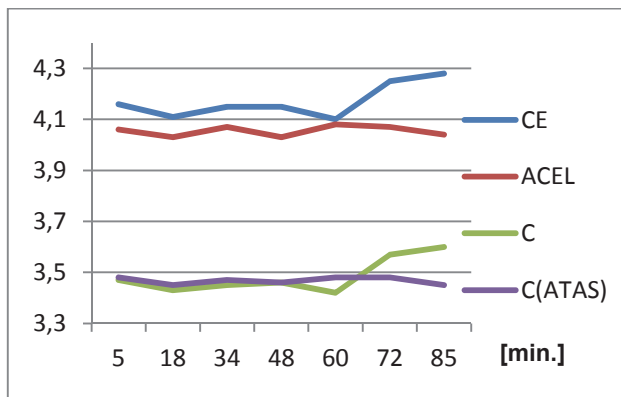
Rys. 4. Zmiany parametrów żeliwa po obróbce pozapiecowej – I seria

Porównując parametry procesowe wytopu prowadzonego na podstawie kryterium równoważnika CE (pierwsza część badań) z wytopem prowadzonym wg kryterium aktywnego równoważnika ACEL, można ocenić stopień stabilności jakości metalurgicznej ciekłego metalu (tabela 2).

Przyjęto następujące dwa wskaźniki do oceny tej stabilności: odchylenie standardowe wartości C, CE, C(ATAS) i ACEL oraz rodzaj krystalizacji żeliwa w próbniku analizy termicznej.



Rys. 5. Zmiany parametrów żeliwa wyjściowego przetrzymywanego w piecu – II seria



Rys. 6. Zmiany parametrów żeliwa po obróbce pozapiecowej – II seria

Tabela 2. Stabilność procesowa żeliwa

Seria badań	Odchylenie standardowe				Rodzaj krzepnięcia - Ilość kadzi		
	C	CE	C (ATAS)	ACEL	Podeutekt.	Eutekt.	Nadeutekt.
I	0,042	0,051	0,022	0,039	2	1	5
II	0,041	0,045	0,009	0,026	7	0	0

Żeliwo z I serii prowadzone wartością równoważnika CE charakteryzuje się większymi wartościami odchylenia standardowego poszczególnych analizowanych parametrów, co wskazuje na niższą stabilność procesu technologicznego.

Żeliwo z wytopów I serii krystalizuje niejednorodnie, z przewagą nadeutektycznej mikrostruktury. Jak się okazało, 70%

odlewów z tego wytopu posiadało wadę typu porowatości [5]. Ciekły metal pochodzący z drugiej serii badań, monitorowany analizą termiczną wykazał znacznie lepszą jakość metalurgiczną w badanym zakresie przetrzymywania w piecu. Analiza termiczna wykazała, że żeliwo w próbniku analizy termicznej pochodzące z każdej kadzi charakteryzuje się podeutektyczną mikrostrukturą. Węzeł cieplny w odlewach posiada większą wartość od węzła cieplnego próbnika. Stworzyło to warunki do krystalizacji eutektyki w węźle cieplnym odlewu. Potwierdzeniem tego było to, że 100% badanych odlewów (256 szt.) nie wykazało się po obróbce skrawaniem wadą typu porowatości.

## 4. Wnioski

Przedstawiono dwie metody kontroli stabilności parametrów ciekłego metalu przetrzymywanego w piecu oraz po obróbce pozapiecowej. Pierwsza z nich opiera się na kontroli równoważnika węgla, którego wartość została dobrana dla rzeczywistej grubości ścianki i istniejących węzłów cieplnych odlewu.

Przeprowadzone badania wskazują, że:

- 1) analiza termiczna jest właściwą metodą przy pomocy której, można w sposób świadomy stabilizować proces metalurgiczny żeliwa sferoidalnego,
- 2) właściwe monitorowanie procesu wymaga oceny jakości ciekłego metalu w piecu (dla żeliwa wyjściowego) i metalu po obróbce pozapiecowej,
- 3) metalurgiczny proces prowadzenia wytopu i obróbki pozapiecowej powinien być poprzedzony doбором wartości ACEL dla węzła cieplnego odlewu.

## Literatura

- [1] Karsay, S.I. (1992). Ductile Iron I Production, QIT – Fer et Titane Onc.
- [2] Guzik, E. (2001). Procesy uszlachetniania żeliwa – wybrane zagadnienia, Monografia Nr 1 M, Archiwum Odlewnictwa, PAN, Katowice.
- [3] Sillen, R. (2007). Why primary graphite is bad, Report RS, NovaCast Foundry Solution AB.
- [4] Kluczowe parametry zaawansowanej analizy termicznej ATAS. Materiały szkoleniowe NOVACAST.
- [5] Badania własne, OP S.A., Opracowanie i wdrożenie innowacyjnej technologii wytapiania i obróbki pozapiecowej wysokojakościowego żeliwa sferoidalnego” finansowanego ze środków Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007-2013 (działanie 1.4 Wsparcie projektów celowych i działanie 4.1 Wsparcie wdrożeń wyników prac B+R).

*Przedstawione wyniki badań są fragmentem pracy badawczej zrealizowanej przez Odlewnie Polskie S.A. w ramach POIG.01.04.00-26 współfinansowanej przez UE z EFRR.*

# Rating Metallurgical Quality Ductile Iron Based on Thermal Analysis ATAS

## Abstract

There were presented two methods to estimate the liquid cast iron metallurgical quality stability, during casting alloy's furnace processing, spheroidization and modification. Commonly used metallurgical process handling was based on choice of the material with specified carbon equivalent (CE), basing on spectroanalysis. On the other hand thermoanalysis has enabled the „on-line” process monitoring, with the use of active carbon equivalent ACEL. Thermoanalysis applied (the ATAS system) allowed to achieve better process stability of nodular cast iron and castings without shrinkage porosity.