

## ZASTOSOWANIE METODY ATD DO OCENY JAKOŚCI ŻELIWA SFEROIDALNEGO

S. JURA<sup>1</sup>, A. STUDNICKI<sup>2</sup>, M. PRZYBYŁ<sup>3</sup>, Z. JURA<sup>4</sup>  
Politechnika Śląska – GLIWICE

### STRESZCZENIE

Opracowano nowy kształt próbnika ATD-S przeznaczonego do analizy termicznej i derywacyjnej żeliwa sferoidalnego. Przyjęto charakterystyczny współczynnik kształtu grafitu. Określono związki eksperymentalne dla określenia stopnia sferoidyzacji żeliwa oraz właściwości mechanicznych żeliwa sferoidalnego. Zastosowanie aparatury komputerowej CRYSTALDIGRAPH pozwala na ocenę i sterowanie jakością produkcji.

*Key words: Crystallization, Thermal analysis, Ductile cast iron.*

### 1. WSTĘP

Żeliwo sferoidalne jest tworzywem niezwykłym, o bardzo interesujących właściwościach. Obecnie dopracowana technologia pozwala na wytwarzanie odlewów z tego tworzywa w pełni zastępujące odlewy staliwne. Obserwuje się przyrost produkcji tego żeliwa w świecie przy znacznym zmniejszeniu produkcji żeliwa ciągliwego oraz obniżeniu produkcji staliwa.

Żeliwo sferoidalne jest tworzywem wielofazowym. Grafit uformowany jest w postaci kulek (sferoidów) a pozostałe fazy: ferryt, perlit, cementyt występują w różnych odmianach żeliwa sferoidalnego. Dzięki uformowaniu grafitu w postaci sferoidów uzyskuje się bardzo wysokie właściwości mechaniczne i plastyczne żeliwa:  $R_m = 400 \div 1200$  MPa,  $A_5 = 2 \div 22$  %. Tak wysokie właściwości mechaniczne oraz cena odlewów decydują o ciągłym wzroście produkcji tego tworzywa [1]. Istnieje więc

---

<sup>1</sup> Prof. dr hab. inż.

<sup>2</sup> Dr inż.

<sup>3</sup> Dr inż.

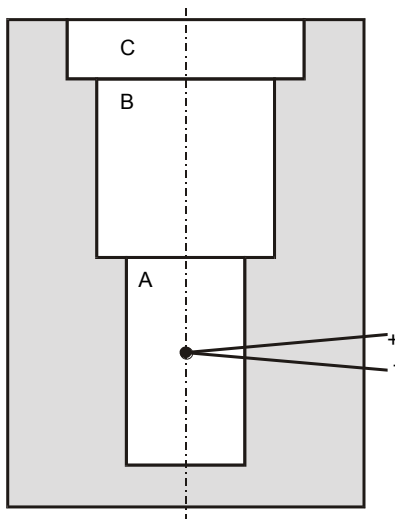
<sup>4</sup> Dr inż. [zjura@pik-net.pl](mailto:zjura@pik-net.pl)

potrzeba opracowania metod kontroli jakości ciekłego żeliwa sferoidalnego. Metodą oceny może być metoda analizy termicznej i derywacyjnej żeliwa. Metoda ta określa nie tylko procesy krystalizacji [2] ale również może opisywać właściwości fizyczne tego tworzywa.

## 2. METODA OCENY JAKOŚCI ŻELIWA

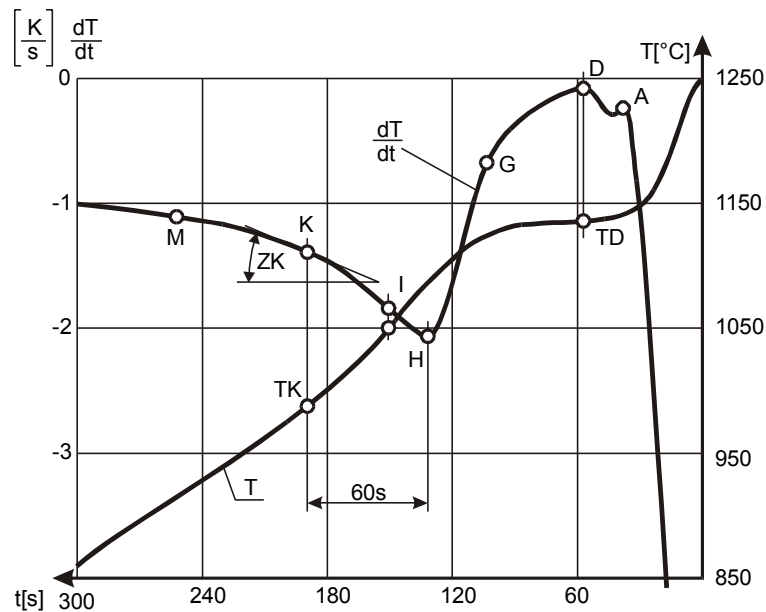
Do oceny jakości żeliwa sferoidalnego wybrano metodę analizy termicznej i derywacyjnej procesu krzepnięcia. Metoda ta została szczegółowo opracowana i pozwala na określenie charakterystycznych parametrów procesu krzepnięcia (temperatury), krystalizacji (pierwsza pochodna procesu krzepnięcia) i zarodkowania (druga pochodna procesu krzepnięcia) [2]. Rozwinięcie tej metody pozwoliło na określenie funkcji krystalizacji stopu [2]. Jak wykazały badania istnieje możliwość określenia współczynnika przewodzenia ciepła w stanie stałym i ciekłym. Ponieważ żeliwo sferoidalne charakteryzuje się znacznie mniejszym współczynnikiem przewodnictwa cieplnego, można więc wnioskować o jakości tego stopu. Autorzy pierwszych prób (Ableidinger, Rabus) zaproponowali specjalny próbnik do takiej analizy. W wyniku badań uzyskali odpowiedź o stopniu sferoidyzacji żeliwa.

W badaniach naszych przeprowadzono symulację procesów krystalizacji żeliwa sferoidalnego dla różnych kształtów próbника. Najlepsze efekty uzyskano przy zastosowaniu próbника przedstawionego schematycznie na rys.1.



Rys.1. Schemat próbника ATD-S przeznaczonego do badania żeliwa sferoidalnego.  
Fig. 1. Ductile cast iron ATD-S probe diagram

Część A jest podstawowym elementem próbnika w którym dokonuje się pomiaru temperatury. Natomiast część B służy do podgrzewania części A. Część C stanowi osłonę przedłużającą krzepnięcie części B. Po zakrzepnięciu części A tj. po uzyskaniu w tej części żeliwa sferoidalnego, następuje transport ciepła z części B. Ze względu na znacznie mniejsze przewodnictwo cieplne spadek temperatury w części A będzie znacznie większy niż w przypadku żeliwa szarego (niesferoidalnego). Oczywiście należy przyjąć, że jakość żeliwa sferoidalnego będą określać inne charakterystyczne punkty na krzywych ATD. Wykres próby ATD-S przedstawiono na rys.2.



Rys. 2. Wykres ATD dla żeliwa sferoidalnego wraz z charakterystycznymi punktami  
 Fig. 2. Diagram of ATD analysis for ductile cast iron, with characteristic points

Jest to typowy wykres ATD-S dla żeliwa sferoidalnego nadeutektycznego. Na krzywej krystalizacji ( $dT/dt$ ) określono charakterystyczne punkty procesu krystalizacji: A,D,G oraz intensywności stygnięcia w punktach: H,J,K,M. Przy czym punkt I jest charakterystyczny dla temperatury 1050 C a punkty K i M określa czas 60 [s] i 90 [s] po zakończeniu krystalizacji tj. od punktu H. Temperatury dla poszczególnych charakterystycznych punktów są wyznaczone przez ich odniesienie na krzywą temperatury, np. punkt D oznaczony na krzywej krystalizacji wyznacza temperaturę eutektyczną TD. W badaniach przyjęto również drugą pochodną dla charakterystycznych punktów, np. drugą pochodną ZK w punkcie K wyznacza styczna do krzywej krystalizacji. Dla jednoznaczności opisu przyjęto następujące oznaczenia. Pierwsza litera odpowiednio oznacza: T – temperaturę, K – pierwsza pochodna,

Z – druga pochodna. Drugie oznaczenie literowe określa charakterystyczny punkt procesu krystalizacji. Zbiór tych punktów dla wszystkich wytopów stanowi podstawę do obliczeń statystycznych (eksperymentalnych).

Drugim problemem identyfikacyjnym jest cyfrowy opis kształtu grafitu. W literaturze światowej stosuje się różne parametry opisujące kształt grafitu [3]. Po przeanalizowaniu przyjęto nieco inny opis cyfrowy kształtu grafitu. Założenie podstawowe to kolejny sposób degeneracji kształtu grafitu. Grafit sferoidalny zniekształca się na przekroju z kształtu kołowego na eliptyczny. Elipsa może się spłaszczać i w ten sposób kolejno można opisać w dobrym przybliżeniu grafit wermikularny a dalej płatkowy. Oczywiście deformacją grafitu sferoidalnego może być nieco inna. Często obserwuje się różnego rodzaju „wyrwy” na graficie sferoidalnym. Przyjęto jednak, że na obniżenie właściwości żeliwa sferoidalnego wpływają największe zdeformowane wydzielania grafitu, bo te właśnie wydzielania decydują o jakości żeliwa sferoidalnego.

Dla arytmetycznego opisu grafitu przyjęto wskaźnik kształtu:

$$C = \frac{O_{bk}}{O_{bw}} \quad (1)$$

Gdzie:  $O_{bk}$  - obwód idealnego koła o powierzchni wydzielenia rzeczywistego,

$O_{bw}$  - obwód wydzielenia rzeczywistego grafitu

Wskaźnik kształtu grafitu zmienia się od  $0,2 \div 1,0$ . Przyjęto, że wskaźnik kształtu grafitu sferoidalnego mieści się w granicach:

$$0,9 < C < 1,$$

natomiast wskaźnik kształtu grafitu dla żeliwa wermikularnego wynosi:



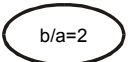
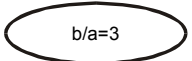

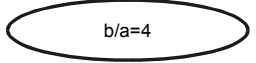
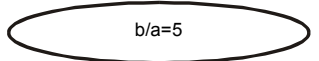
$$0,66 < C < 0,8,$$

dla żeliwa z grafitem płatkowym wynosi:

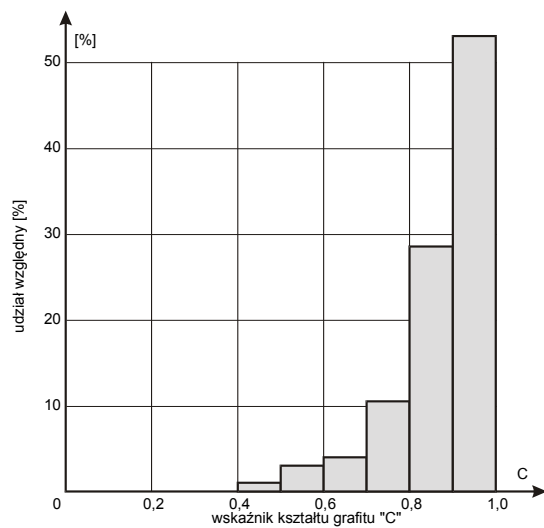
$$0,2 < C < 0,66$$

Podział ten nie zawsze jest taki ostry, dlatego należy przyjąć że grafit o współczynniku kształtu:  $C = 0,8$  może należeć do grupy żeliwa sferoidalnego lub wermikularnego. Zależy to od uprzywilejowania ilościowego górnej czy dolnej wartości współczynnika kształtu. Dla jasności opisu przedstawiono tabelę określającą eliptyczny kształt grafitu i jego wskaźnik kształtu.

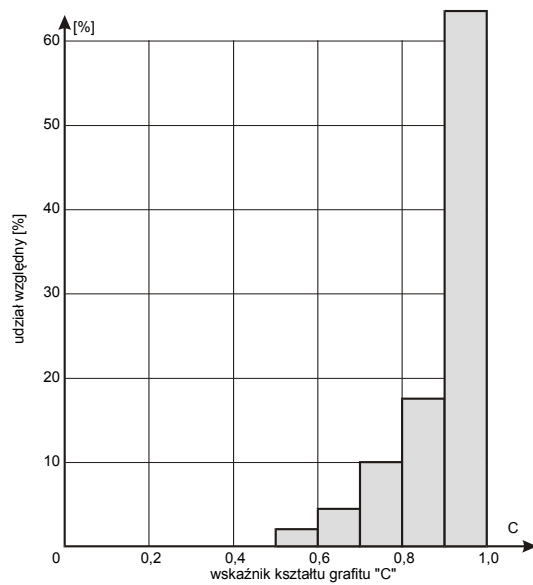
Tabela 1. Klasyfikacja grafitu w żeliwie sferoidalnym wg współczynnika kształtu „C”  
 Table 1. Classification of graphite in ductile cast iron according to „C” coefficient

Kształt grafitu	Kryterium kształtu "C"	Gatunek żeliwa
 $b/a=1$	1	 żeliwo sferoidalne
 $b/a=2$	0,9	
 $b/a=3$	0,8	 żeliwo wermikularne
 $b/a=4$	0,72	
 $b/a=5$	0,66	

Przyjmując tę klasyfikację grafitu opracowano program komputerowy który pozwala na obliczenie względnej liczby wydzieli grafitu w funkcji kształtu  $N_a = f(C)$  oraz względnej objętości wydzieli grafitu w funkcji kształtu  $V_v = f(C)$ . Analizę stereologiczną grafitu wykonano na mikroskopie MAGISCAN. Wyniki dla typowej próbki żeliwa sferoidalnego przedstawiono na rys. 3 i 4.



Rys. 3. Względny udział liczby wydzieleń grafitu  $N_a = f(C)$   
 Fig. 3. Relative share of graphite separations  $N_a = f(C)$



Rys. 4. Względny udział objętościowy wydzieleń grafitu  $V_v = f(C)$   
 Fig. 4. Relative share of volume graphite separations  $V_v = f(C)$

Jak widać z wykresów (rys. 3 i 4) udział względny liczby Na wydzieleń grafitu oraz względnej objętości  $V_v$  wydzieleń grafitu o liczbie kształtu  $C = 0,9 \div 1,0$  wynosi powyżej 50%

Natomiast względny udział grafitu Na i  $V_v$  o współczynniku kształtu  $C=0,8 \div 1,0$  wynosi powyżej 70%.

Dla wszystkich wytopów dokonano takich obliczeń i zestawiono w macierzy danych niezbędnych do obliczeń statystycznych.

### 3. OCENA STOPNIA SFEROIDYZACJI GRAFITU

O właściwościach mechanicznych żeliwa sferoidalnego decyduje kształt geometryczny grafitu. W zasadzie skład chemiczny żeliwa jest eutektyczny lub nadeutektyczny. Żeliwo szare o takim składzie chemicznym posiada wytrzymałość na rozciąganie  $R_m = 100 \div 200$  MPa. Zmiana kształtu grafitu z płatkowego na sferoidalny podnosi wytrzymałość na rozciąganie do  $R_m = 400 - 800$  MPa a po odpowiedniej obróbce cieplnej (ADI) można uzyskać  $R_m = 1200$  MPa. Właściwości plastyczne tj. wydłużenie plastyczne w zależności od składu chemicznego osiąga wartości  $A_5 = 2 \div 22\%$ .

Dużego znaczenia nabiera technologia produkcji żeliwa sferoidalnego o ustabilizowanej jakości. Warunek ten jest możliwy do spełnienia przy systematycznej kontroli stopnia sferoidyzacji grafitu. Kontrolę taką może zapewnić metoda ATD zaaplikowana dla żeliwa sferoidalnego. Przeprowadzone próby ATD oraz oprogramowanie analizy stereologicznej grafitu według współczynnika kształtu „C” pozwoliły na obliczenia statystyczne związków eksperymentalnych między parametrami ATD a stopniem sferoidyzacji grafitu.

#### 3.1. Określenie względnej liczby wydzieleń grafitu

Do analizy statystycznej przyjęto liczbę wydzieleń grafitu Na(09) o współczynniku kształtu  $C = 0,9 \div 1,0$  oraz liczbę wydzieleń grafitu Na(08) o współczynniku kształtu  $C = 0,8 \div 1,0$ . Stosując metodę regresji krokowej otrzymano następujące zależności eksperymentalne:

$$Na(09) = - 14,6 + 30,1 KA - 20,1 KJ - 24,6 KM \quad (2)$$

O parametrach statystycznych:

$dNa(09) = 6,9$  % - odchylenie standardowe,

$Na(09)_s = 44$  % - wartość średnia,

$R = 0,91$  – współczynnik korelacji,

$F = 8,8$  – test Fishera – Snadacora,

$W = 2,2$  – test wiarygodności.

$$Na(08) = 24,6 + 27,4 KA - 18,9 KK - 0,032 \cdot ZD + 0,75 ZK \quad (3)$$

o parametrach statystycznych:

$$dNa(08) = 4,6 \% ; Na(08)s = 71,8 \% ; R = 0,95 ; F = 26 ; W = 7,6$$

Z uwzględnieniem tylko charakterystycznych temperatur zależność ta przyjmuje następującą postać:

$$Na(08) = 155,7 - 0,5 TA + 6,05 TD - 6,56 TE + 0,65 TH + 1,23 TK - 1,43 TM \quad (4)$$

o parametrach statystycznych:

$$dNa(08) = 4,4 \% ; Na(08)s = 71,8 \% ; R = 0,96 ; F = 29 ; W = 8,1$$

Analizując przedstawione wzory 2,3,4 stwierdzić należy, że stopień sferoidyzacji opisują parametry procesu po zakończeniu krzepnięcia. Parametry te dotyczą punktów: H,I,K,M. Tak więc zgodnie z przewidywaniami stan stały żeliwa sferoidalnego opisuje stopień sferoidyzacji żeliwa. We wzorze 4 pokazano, że temperatury TA, TD i TE mają również związek ze sferoidyzacją. Zagadnienie to należałoby szczegółowo przebadać, bo być może główną rolę spełnia różny stopień rozpuszczenia dodatku modyfikatora przez ciekły metal, lub dodatek różnej ilości modyfikatora.

### 3.2. Określenie względnej objętości wydzieleni grafitu

Podobnie jak poprzednio przyjęto względną objętość grafitu  $Vv(09)$  o współczynniku kształtu  $C = 0,9 \div 0,1$  oraz względną objętości wydzieleni grafitu  $Vv(08)$  o współczynniku kształtu  $C = 0,8 \div 1,0$ . Wykorzystując dane z analizy termicznej i derywacyjnej oraz pomiarów i obliczeń stereologicznych uzyskano następujące zależności eksperymentalne:

$$Vv(09) = 192 + 0,53 TA - 0,76 TA + 64,8 KA - 23,3 KI + 163 KK - 214 KM \quad (5)$$

o parametrach statystycznych:

$$dVv(09) = 5,4 \% ; Vv(09)s = 48,9 \% ; R = 0,97 ; F = 26 ; W = 9,8$$

$$Vv(08) = 526,3 - 0,43 TA + 36,5 KA - 18,5 KI - 41,3 KM \quad (6)$$

o parametrach statystycznych:

$$dVv(08) = 7,6 \% ; Vv(08)s = 71 \% ; R = 0,94 ; F = 28 ; W = 7,2$$

Podobnie jak w poprzednim przypadku względny udział objętościowy grafitu określają głównie parametry stanu stałego KI, KK, KM. Na wielkość tych parametrów wpływa kinetyka oddawania ciepła. O wymianie ciepła decyduje przewodnictwo cieplne. W próbniku ATD-S ciepło jest przekazywane z części B do części pomiarowej A. Gorsze przewodnictwo cieplne żeliwa sferoidalnego powoduje, że część A charakteryzuje się większymi spadkami temperatury w procesie stygnięcia. Ciepło „pompowane”



do części A jest ograniczane. Stopień sferoidyzacji grafitu decyduje o transporcie ciepła.

#### 4. OKREŚLENIE WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH

W procesie produkcyjnym ważną sprawą jest uzyskanie informacji o właściwościach mechanicznych żeliwa. Uzyskanie tych informacji jeszcze przed odlaniem metalu do form ma podstawowe znaczenie dla jakości produkowanych odlewów. Możliwość takiej oceny daje zastosowanie metody ATD. Nowy próbnik ATD-S i zastosowana aparatura Crystaldigraph daje takie możliwości.

Zebrane informacje z prób ATD-S są podstawą do oceny jakości żeliwa sferoidalnego. Zastosowane metody analiz statystycznych pozwoliły na opracowanie oceny wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$ , wydłużenia plastycznego  $A_5$  oraz twardości – HB przy pomocy następujących zależności eksperymentalnych:

$$R_m = - 3057 + 1,79 TA + 1,01 TZ - 285,8 KK + 7,2 ZI \quad (7)$$

o parametrach statystycznych:

$$dR_m = 56 \text{ MPa} ; R_{m_s} = 521 \text{ MPa} ; R = 0,87 ; F = 14 ; W = 3,3$$

$$A_5 = 527 - 0,32 TH - 0,12 TZ + 14,1 KA + 9,5 KM - 0,16 ZG + 1,1 ZI \quad (8)$$

o parametrach statystycznych:

$$dA_5 = 3,9 \% ; A_{5_s} = 15,3 \% ; R = 0,93 ; F = 18 ; W = 5,7$$

$$HB = 414 - 5,6 TF + 5,7 TH - 0,69 ZF - 2,4 ZI \quad (9)$$

o parametrach statystycznych:

$$dHB = 21 ; HB_s = 192 ; R = 0,93 ; F = 24 ; W = 5,6$$

Przedstawione wzory 7,8,9 wskazują, że właściwości żeliwa sferoidalnego są również powiązane z parametrami ATD stanu stałego.

#### 4. PODSUMOWANIE

Przedstawione rezultaty badania żeliwa sferoidalnego wskazują, że metodę analizy termicznej i derywacyjnej można zastosować do praktyki odlewniczej. Opracowany wskaźnik kształtu „C” grafitu sferoidalnego dostatecznie dobrze opisuje „doskonałość” geometryczną grafitu. Tak opisany kształt grafitu łatwo jest wprowadzić do obliczeń statystycznych.

Żeliwo sferoidalne charakteryzuje się tym, że zawiera 50 ÷ 60 % grafitu o prawidłowym kształcie kołowym. Pozostała względna liczba wydzieleń lub względna objętość wydzieleń grafitu o wskaźniku kształtu  $C = 0,8 \div 0,9$  wynosi 20 ÷ 30 %. Taka charakterystyka wydzieleń grafitu świadczy o tym, że żeliwo jest sferoidalne.

Potwierdzono, że określenia stopnia sferoidyzacji żeliwa należy poszukiwać w parametrach stanu stałego stosując metodę ATD. Metoda ta, bowiem opisuje nie tylko proces krystalizacji, ale również właściwości stanu stałego żeliwa. Wyniki te uzyskano dzięki odpowiedniej konstrukcji próbnika pomiarowego ATD-S. Opracowanie odpowiednich kryteriów kształtu grafitu pozwoliło na określenie związku z parametrami krystalizacji i stygnięcia części pomiarowej próbnika ATD-S.

Podobnie w wyniku tych badań udało się uzyskać wzory eksperymentalne dla określenia: wytrzymałości na rozciąganie –  $R_m$ , wydłużenia plastycznego  $A_5$  oraz twardości HB. Zastosowanie metody ATD oraz aparatury komputerowej Crystaldigraph pozwala na określenie jakości żeliwa sferoidalnego jeszcze przed zalaniem metalu do form. W razie potrzeby można ciekły metal ponownie dodatkowo zmodyfikować lub przeznaczyć na odlewy nie podlegające kontroli jakościowej (np. Zl 150).

#### LITERATURA

- [1] Podrzucki C.: *Żeliwo*. Wyd. ZG STOP Kraków
- [2] Jura Z., Jura S.: *Zastosowanie metody ATD do oceny krystalizacji stopów Al*. Krzepnięcie Metali i Stopów. Nr 28, 1997, PAN – Katowice
- [3] Soński M.S., Hubner K.: *Zastosowanie ilościowej metody oceny kształtu grafitu w optymalizacji procesu sferoidyzacji żeliwa*. Komitet Nauki o Materiałach PAN Kraków, Wisła (1983) s. 170-179

#### APPLICATION OF TDA METHOD FOR QUALITY ASSESSMENT OF DUCTILE CAST IRON

##### SUMMARY

In this article we present a new shape of ATD-S probe designed for thermal and derivative analysis of ductile cast iron. The characteristic coefficient of graphite shape has been used. We have also elaborated experimental connections to define spheroidization process degree as well as mechanical properties of ductile cast iron. CRYSTALDIGRAPH equipment allows to estimate and control production process.

Recenzował prof. dr hab. inż. Stanisław Pietrowski