

Andrzej Białobrzęski¹, Maksymilian Dudyk², Krzysztof Kosibór³
Akademia Techniczno-Humanistyczna, ul. Willowa 2, 43-300 Bielsko-Biała

KRYSTALIZACJA KOMPOZYTÓW ALUMINIOWYCH ZBROJONYCH SiC

W artykule przedstawiono zapisy graficzne procesów krystalizacji kompozytów aluminiowych na osnowie siluminów AK7 (AlSi7Mg) i AK11 (AlSi11). Jako cząstkę zbrojącą użyto proszku SiC w ilościach 5 i 10% masy wsadu. Na otrzymanych zapisach graficznych metodą ATD-AED w postaci krzywych termicznych $t = f(\tau)$ i $dt/d\tau = f(\tau)$ oraz krzywych elektrycznych $\sigma = f(\tau)$ i $d\sigma/d\tau = f(\tau)$ określono wykrystalizowane fazy. Na podstawie uzyskanych wyników z procesów krystalizacji i badań metalograficznych stwierdzono, że wprowadzona cząstka SiC spowodowała podwyższenie przewodności elektrycznej kompozytu na osnowie AK7 i zmianę morfologii krzemu eutektycznego w kompozycie wykonanym na osnowie stopu AK11. Analiza wartości liczbowych w charakterystycznych punktach T i P pozwala odpowiednio charakteryzować kinetykę krystalizacji kompozytów aluminiowych.

CRYSTALLIZATION OF ALUMINIUM MATRIX COMPOSITES REINFORCED WITH SiC

Investigation have been centered around composites consisting of AK7 matrix alloyed with magnesium and reinforced with 5 or 10 mass % of silicon carbide particles. Composites of AK11 magnesium-free matrix reinforced with the same quantities of reinforcing particles have been prepared additionally, for the purpose of comparison. Figures 1-6 present graphic records of crystallization curves: thermal, $t = f(\tau)$ and $dt/d\tau = f(\tau)$, and electric, $\sigma = f(\tau)$ and $d\sigma/d\tau = f(\tau)$, obtained simultaneously by the ATD-AED method. The tables beneath the figures give the values of the temperature and the electric conductivity in characteristic „peaks” of first derivatives. Figure 7 shows comparative graphs for pure matrices and the produced composites. Results of metallographic examinations are presented in Figures 8 and 9.

An advantageous influence of magnesium on the composite production process has been found while introducing the reinforcing particles into the AK7 matrix. On contrary, a significant amount of slag has been obtained for AK11 magnesium-free matrix.

An analysis of the ATD-AED curves reveals significant differences between graphic profiles of temperature and electric conductivity recorded for AK7 silumin and composites with such a matrix. Silicon carbide addition has caused appearing of one more peak, designed as TA at thermal curves (Figs 2, 3), representing the crystallization of ternary eutectic α -Mg₂Si+Si. The crystallization temperatures for the α phase (T1) and the α -Si eutectic (T3) has changed slightly. However, the electric conductivity has been significantly increased on crystallization of the α -phase (P1), the α -Si eutectic (P3), the α -Mg₂Si+Si eutectic (PA), and at the end of crystallization process, as compared with the basic silumin (Fig. 7a). Metallographic examinations have shown that the reinforcing particles occur within the formerly modified α -Si eutectic (Fig. 8b). No differences has been found between crystallization of the AK11 matrix composite and the matrix alloy itself (Fig. 7b). Only the temperature of the end of crystallization has increased, reaching the temperature of α -Si eutectic crystallization (Figs 5, 6). This increase has caused a change in morphology of the eutectic silicon in the composite (Fig. 9d).

It can be generally stated that the registered crystallization curves t , $dt/d\tau$, σ , and $d\sigma/d\tau$ confirm a catalytic influence of reinforcing particles on the crystallization process of aluminium alloy matrix composites.

WSTĘP

Spośród kompozytów zbrojonych cząstkami ceramicznymi szerokie zastosowanie mają te, w których osnowę stanowią stopy aluminium. Obszar badań nad wytwarzaniem kompozytów jest obecnie bardzo szeroki i obejmuje układy stop aluminium-cząstki ceramiczne tlenków aluminium (Al₂O₃), cyrkonu (ZrO₂), tytanu (TiO₂), węglików (SiC, TiC) oraz grafitu i miki [1-5].

Dzięki interesującym właściwościom technologicznym i użytkowym kompozyty aluminiowe znalazły szerokie zastosowanie między innymi w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym.

Większość znanych metod wytwarzania kompozytów stop aluminium-cząstki ceramiczne jest oparta na metodzie mieszania z równoczesnym wprowadzaniem

cząstki zbrojącej. Główny problem przy wytwarzaniu tych kompozytów tkwi w doborze parametrów procesu wprowadzania cząstek do ciekłego metalu. Wiąże się to przede wszystkim z brakiem zwilżalności w układzie ciekły metal-cząstka zbrojąca. Aby polepszyć zwilżalność cząstki zbrojącej, stosuje się między innymi:

- pokrywanie cząstki zbrojącej warstwą metalu,
- wygrzewanie cząstek w wysokiej temperaturze, przekraczającej nawet temperaturę ciekłego metalu,
- stosowanie składników stopowych zmniejszających napięcie powierzchniowe ciekłej kąpieli [1, 2, 4].

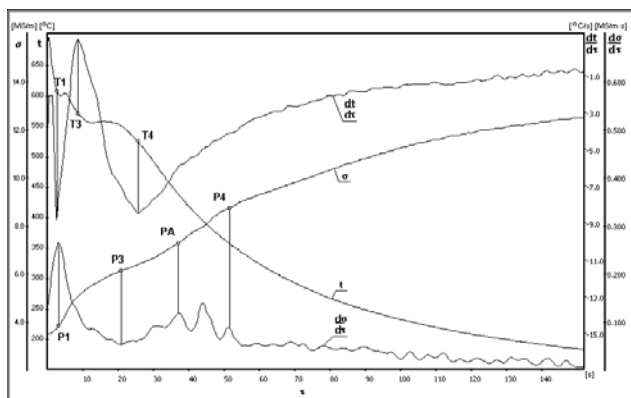
Badania procesów krystalizacji kompozytów pozwalają na takie przygotowanie ciekłego stopu, aby jego właściwości w stanie stałym były jak najlepsze.

¹dr hab. inż., ²dr inż., ³mgr inż.

METODYKA BADAŃ I WYNIKI

Pomimo stosowania różnych metod wprowadzania cząstki zbrojącej do ciekłego metalu napotyka się często na trudności związane ze zwilżalnością cząstki ceramicznej oraz z jej równomiernym rozkładem w całej objętości odlewu. Aby polepszyć zwilżalność cząstki zbrojącej, postanowiono wykonać kompozyt na osnowie siluminu AK7, zawierającego magnez jako dodatek stopowy. Jako cząstkę zbrojącą zastosowano węgiel krzemu w ilości 5 i 10% masy wsadu.

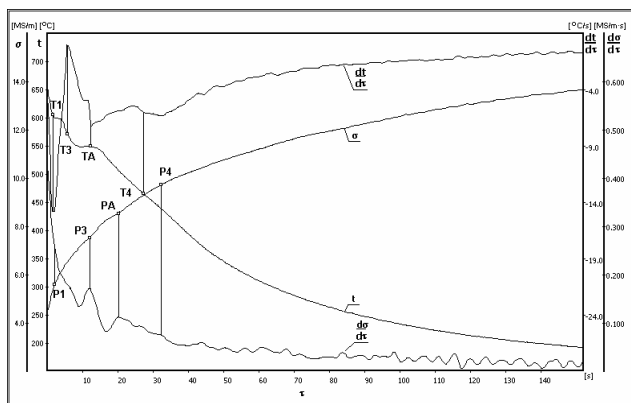
Dla porównania zmian w kinetyce krystalizacji tych kompozytów sporządzono dodatkowo kompozyt na osnowie siluminu AK11 - bez dodatków stopowych z tą samą zawartością cząstki zbrojącej.



Temperatura °C	T1		T3		T4			
	603		572		524			
Przewodność MS/m	P1		P3		PA		P4	
	3.8		6.1		7.3		8.7	

Rys. 1. Krzywe krystalizacji oraz określone charakterystyczne punkty T1÷T4 i P1÷P4 dla siluminu AK7

Fig. 1. Crystallization curves and particular characteristic points T1÷T4 and P1÷P4 for AK7 alloy



Temperatura °C	T1 607	T3 574	TA 550	T4 467
Przewodność MS/m	P1 5,6	P3 7,8	PA 8,5	P4 9,7

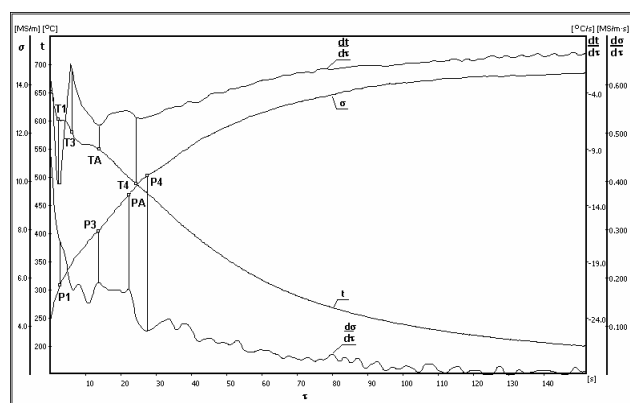
Rys. 2. Krzywe krystalizacji oraz określone charakterystyczne punkty T1÷T4 i P1÷P4 dla kompozytu AK7-5% SiC

Fig. 2. Crystallisation curves and particular characteristic points T1÷T4 and P1÷P4 for AK7-5% SiC composite

Stopy aluminium topiono w piecu elektrycznym oporowym. Następnie do kąpieli metalowej zostały wprowadzone cząstki SiC w postaci proszku wyprodukowanego przez firmę ALCOA i Ferro-Term w Łodzi. Dla uzyskania jednorodnego rozkładu cząstek w cieczy zastosowano mieszanie suspensji mieszadłem mechanicznym. Tak przygotowanym kompozytem zalewano formę metalową, rejestrując jednocześnie proces krystalizacji metodą ATD-AED [5].

Dla każdego przygotowanego kompozytu zarejestrowano również proces krystalizacji siluminu wyjściowego (bez dodatku cząstki zbrojącej) w celu porównania otrzymanych wyników.

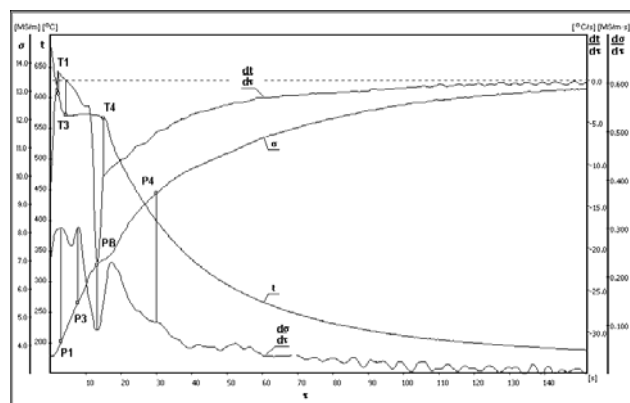
Na rysunkach 1-6 przedstawiono zapisy graficzne krzywych krystalizacji termicznych $t = f(\tau)$ i $dt/d\tau = f(\tau)$



Temperatura °C	T1 605	T3 576	TA 550	T4 486
Przewodność MS/m	P1 5,6	P3 8,1	PA 9,5	P4 10,2

Rys. 3. Krzywe krystalizacji oraz określone charakterystyczne punkty T1÷T4 i P1÷P4 dla kompozytu AK7-10% SiC

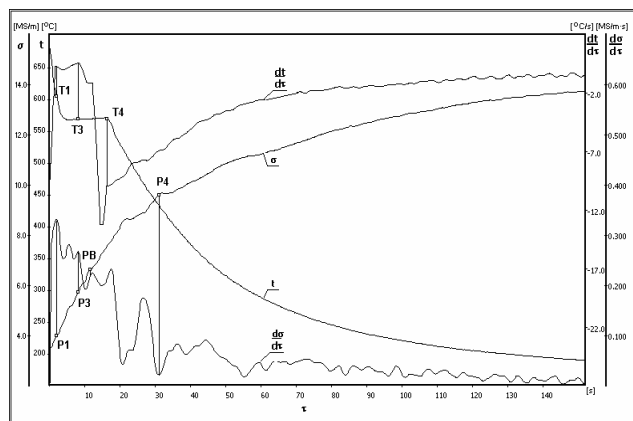
Fig. 3. Crystallization curves and particular characteristic points T1÷T4 and P1÷P4 for AK7-10% SiC composite



Temperatura °C	T1		T3		T4			
	608		571		565			
Przewodność MS/m	P1		P3		PB		P4	
	4.1		5.5		6.8		9.4	

Rys. 4. Krzywe krystalizacji oraz określone charakterystyczne punkty T1÷T4 i P1÷P4 dla siluminu AK11

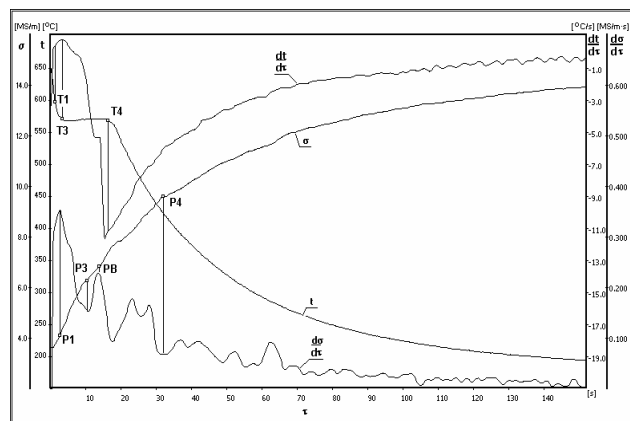
Fig. 4. Crystallization curves and particular characteristic points T1÷T4 and P1÷P4 for AK11 alloy



Temperatura °C	T1	T3	T4
	610	568	568
Przewodność MS/m	P1	P3	P4
	3,9	5,7	6,6

Rys. 5. Krzywe krystalizacji oraz określone charakterystyczne punkty T1÷T4 i P1÷P4 dla kompozytu AK11-5% SiC

Fig. 5. Crystallization curves and particular characteristic points T1÷T4 and P1÷P4 for AK11-5% SiC composite

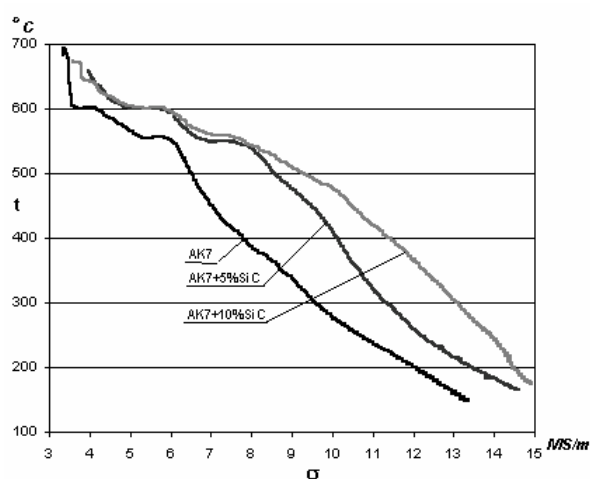


Temperatura °C	T1	T3	T4
	614	568	567
Przewodność MS/m	P1	P3	P4
	4,0	5,7	6,7

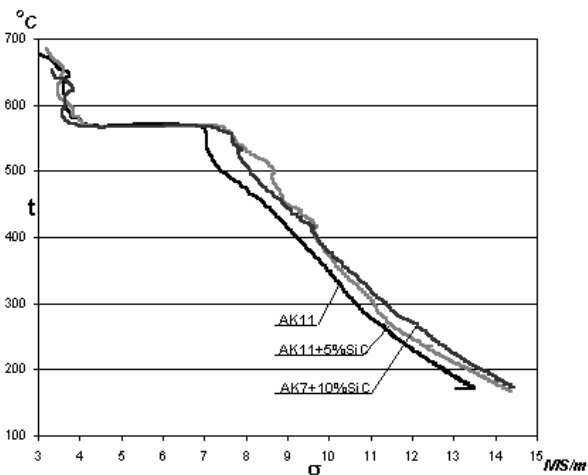
Rys. 6. Krzywe krystalizacji oraz określone charakterystyczne punkty T1÷T4 i P1÷P4 dla kompozytu AK11-10% SiC

Fig. 6. Crystallization curves and particular characteristic points T1÷T4 and P1÷P4 for AK11-10% SiC composite

a)



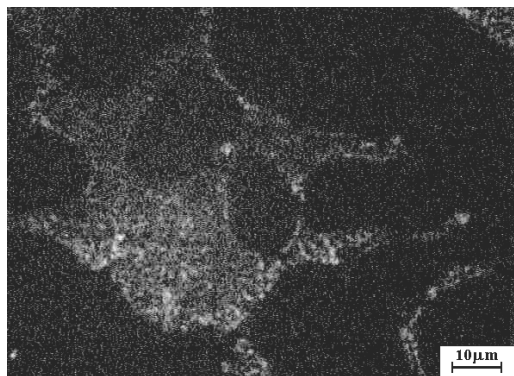
b)



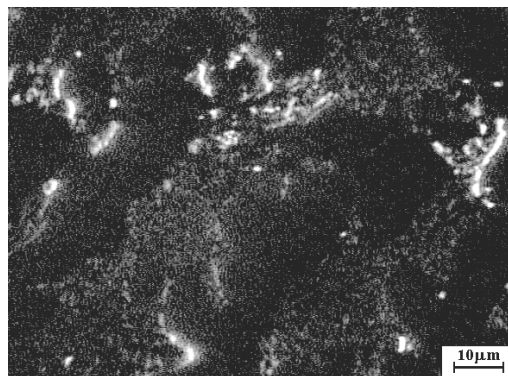
Rys. 7. Zmiany przewodności elektrycznej w czasie krystalizacji: a) siłuminu AK7 i kompozytów wykonanych na jego podstawie, b) siłuminu AK11 i kompozytów wykonanych na jego podstawie

Fig. 7. Changes in electric conductivity during crystallization: a) AK7 alloy and AK7 matrix composites, b) AK11 alloy and AK11 matrix composites

a)



b)



Rys. 8. Mikrostruktury otrzymane w świetle spolaryzowanym: a) stop AK7, b) kompozyt AK7-10% SiC. Widoczne jasne wydzielenia cząstki SiC

Fig. 8. Microstructures received in polarized light: a) AK7 alloy, b) AK7-10% SiC composite. Visible bright SiC particles

oraz elektrycznych $\sigma = f(\tau)$ i $d\sigma/d\tau = f(\tau)$ wykonane jednocześnie metodą ATD-AED dla badanych stopów i kompozytów. W tabelach pod wykresami przedstawiono wartości temperatury t i przewodności elektrycznej właściwej σ w charakterystycznych „pikach” na pierwszych pochodnych krzywych krystalizacji.

Na rysunku 7 przedstawiono porównawcze wykresy krzepnięcia siluminów i kompozytów wykonanych na ich osnowach.

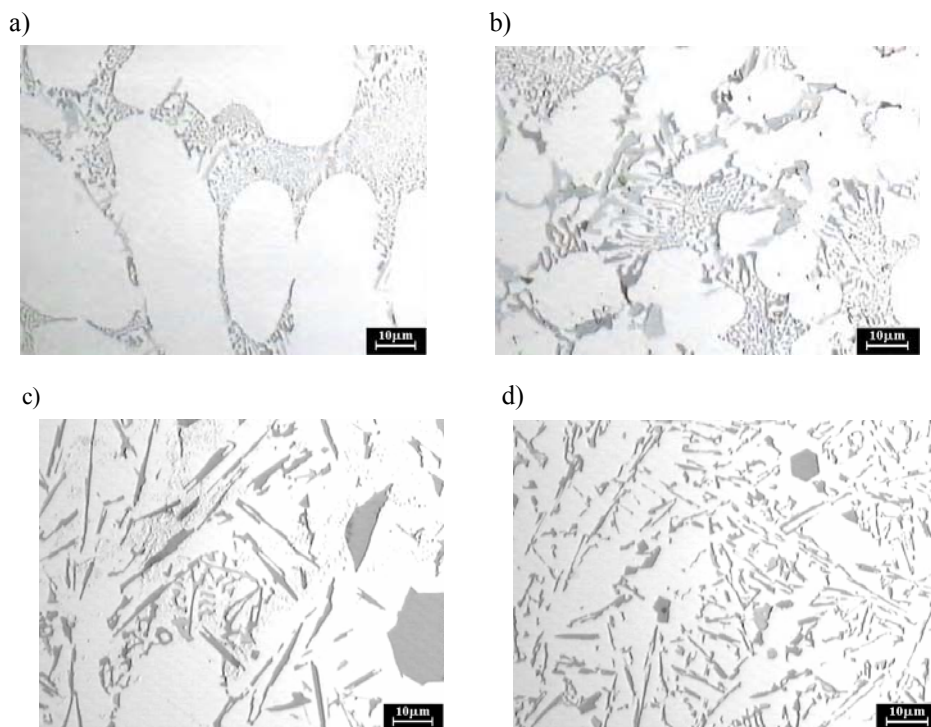
Przeprowadzono również badania metalograficzne z użyciem mikroskopu optycznego Neophot 32. Wyniki tych badań przedstawiono na rysunkach 8 i 9.

uległy temperatury krystalizacji fazy α (punkt T1) oraz eutektyki α +Si (punkt T3).

Natomiast znacznie wzrosła przewodność elektryczna kompozytu w czasie krystalizacji fazy α (punkt P1), eutektyki α +Si (punkt P3) i α +Mg₂Si+Si (punkt PA) oraz końca krystalizacji kompozytu w porównaniu z siluminem wyjściowym (rys. 7a).

Badania metalograficzne wykazały, że cząstka zbrojąca występuje w zmodyfikowanej wcześniej eutektyce α +Si (rys. 8b).

Nie stwierdzono znacznych różnic w przebiegu krystalizacji kompozytu wykonanego na osnowie siluminu AK11 w porównaniu ze stopem wyjściowym (rys. 7b).



Rys. 9. Mikrostruktury stopów i kompozytów aluminiumowych: a) stop AK7, b) kompozyt AK7-10% SiC, c) stop AK11, d) kompozyt AK11-10% SiC

Fig. 9. Microstructures of aluminium alloys and composites: a) AK7 alloy, b) AK7-10% SiC composite, c) AK11 alloy, d) AK11-10% SiC composite

WNIOSKI

W czasie wprowadzania cząstki zbrojącej do osnowy stwierdzono korzystny wpływ magnezu - jako składnika stopowego siluminu AK7 - na proces wytwarzania kompozytu. Podczas sporządzania kompozytu na bazie siluminu AK11 otrzymano znaczne ilości żużla.

Uzyskane wyniki badań krystalizacji metodą ATD-AED (rys. 1-3) wykazały znaczne różnice w zapisach graficznych temperatury t i przewodności elektrycznej właściwej σ siluminu AK7 i kompozytów sporządzonych na jego osnowie. Dodatek węgla krzemu jako cząstki zbrojącej spowodował pojawienie się dodatkowego „piku” TA na krzywych termicznych (rys. 2, 3), przedstawiającego krystalizację eutektyki potrójnej α +Mg₂Si+Si [6, 7]. Niewielkiej zmianie

Zwiększeniu uległa temperatura końca krystalizacji,

pokrywając się z krystalizacją eutektyki α +Si (rys. 5, 6). Wzrost ten spowodował zmianę morfologii krzemu eutektycznego w kompozycie (rys. 9d).

Ogólnie można stwierdzić, że zarejestrowane przebiegi krystalizacji t , $dt/d\tau$ oraz σ i $d\sigma/d\tau$ wykazują katalityczny wpływ cząstki zbrojącej na przebieg procesu krystalizacji kompozytów aluminiumowych.

Analiza wartości liczbowych w charakterystycznych punktach T i P pozwala odpowiednio charakteryzować kinetykę krystalizacji kompozytów aluminiumowych.

LITERATURA

- [1] Hyla I., Śleziona J., Kompozyty aluminium-cząstki ceramiczne, Kompozyty odlewane, CIATF, Opole 1995.
- [2] Dudyk M., Kosibór K., Krystalizacja kompozytów aluminiowych, Archiwum Odlewnictwa, Rocznik 1, Katowice 2001.
- [3] Fraś E., Janas A., Kolbus A., Odlewany kompozyt aluminiowy *in situ* umacniany cząstkami borku tytanu, Kompozyty (Composites) 2001, 1, 1, 23-27.
- [4] Nowicki J., Materiały kompozytowe, Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź 1993.
- [5] Dudyk M., Wasilewski P., Ciućka T., Pezda J., Simultaneous recording of crystalization process of aluminium alloys with ATD and AED methods, Archives of Metalurgy 1998, 43, 4, PAN, Warszawa - Kraków.
- [6] Pietrowski S., Siluminy tłokowe, Monografia, Krzepnięcie Metali i Stopów, Opole 1997, z. 29.
- [7] Mondolfo L.F., Aluminium Alloys, Structure and Properties, Moskwa 1979.
- [8] Sękowski K., Piaskowski J., Wojtowicz Z., Atlas struktur znormalizowanych stopów odlewniczych, WNT, Warszawa.

Recenzent
Zbigniew Lech