

Poprawa plastyczności stopu AlSi11 przez zastosowanie wyżarzania zmiękczającego

Improvement of plasticity of the AlSi11 alloy due to soft annealing treatment

Aleksandra Jarco<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Akademia Techniczno-Humanistyczna, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji, ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała

<sup>1</sup> Bielsko-Biała University, Department of Production Engineering and Automation, ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała, Poland

E-mail: ajarco@ath.bielsko.pl

Received: 9.06.2016. Accepted in revised form: 30.09.2016.

© 2016 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/iod.2016.18

**Streszczenie**

**Abstract**

W artykule przedstawiono badania dotyczące możliwości zwiększenia plastyczności okołoeutektycznego stopu AlSi11 przez zastosowanie wyżarzania zmiękczającego. Dla dwóch przyjętych wielkości wejściowych, tj. temperatury i czasu wygrzewania, w oparciu o trójwartościowy plan przeprowadzono badania pozwalające na przedstawienie zmian wytrzymałości na rozciąganie ( $R_m$ ) oraz wydłużenia ( $A_5$ ) w zależności od parametrów wyżarzania zmiękczającego (temperatury z przedziału 280°C do 370°C i czasu od 2 godzin do 8 godzin).

Dla średnich wartości z przyjętych zakresów temperatury i czasu uzyskano wzrost wydłużenia  $A_5$  o około 40% w odniesieniu do wartości wyjściowej. Największy wzrost  $A_5$  wyniósł 96%, w porównaniu do stopu wyjściowego, dla wygrzewania w temperaturze 370°C przez 8 godzin, równocześnie nieznacznie spadła wytrzymałość  $R_m$ , w granicach 15%.

**Słowa kluczowe:** stopy aluminium, wyżarzanie zmiękczające, wydłużenie, wytrzymałość na rozciąganie

The paper presents research on the possibility of improving the plasticity of near-eutectic AlSi11 alloy by the use of soft annealing treatment. For two assumed input quantities, i.e. temperature and duration of the soaking treatment, based on the trivalent testing plan, have enabled the presentation of changing tensile strength ( $R_m$ ) and elongation ( $A_5$ ) in function of the soft annealing parameters (temperature in the range from 280°C to 370°C and time from 2 hours to 8 hours).

For average values of assumed range of temperature and time there was an increase in elongation ( $A_5$ ) of about 40% compared to the starting value. The highest increase in elongation ( $A_5$ ) amounted to 96%, compared to the initial alloy, which was obtained in the case of the soaking treatment at temperature 370°C for 8 hours, the tensile strength ( $R_m$ ) decreased simultaneously within limits of 15%.

**Keywords:** aluminum alloys, soft annealing, elongation, tensile strength

**1. Wprowadzenie**

Siluminy dzięki dobrym parametrom odlewniczym, odporności na korozję i małemu ciężarowi właściwemu są szeroko stosowane na odlewy w przemyśle maszynowym [1], przede wszystkim w motoryzacji, gdzie są wykorzystywane między innymi na odlewy głowic i tłoków silników spalinowych, wsporników, obudowy skrzyni biegów itp. [2-4].

**1. Introduction**

The Al-Si based alloys, owing to good casting properties, corrosion resistance and low specific gravity, are widely used in machinery industries [1], first of all in the automotive industry, where the Al-Si based alloys are used, among other things, to the production of combustion engine's cylinder head and piston castings, brackets, gearbox housings, etc. [2-4].

W dużej mierze na właściwości mechaniczne, a w szczególności na wydłużenie ( $A_5$ ) stopu, wpływa kształt wydzielen krzemu eutektycznego, który w postaci nieregularnych płytek o ostrych krawędziach sprzyja propagacji pęknięć pod wpływem naprężeń zewnętrznych [4–6].

Utwardzanie dyspersyjne jest typową obróbką cieplną siluminów, zawierających miedź i/lub magnez [7], która powoduje znaczący wzrost wytrzymałości na rozciąganie oraz twardości przy jednoczesnym spadku plastyczności stopu [8–10]. Natomiast wyżarzanie zmiękczające wpływa na koagulację składników wydzielonych z roztworu stałego na granicy ziaren oraz rozdrobnienie wydzielen krzemu [11–13], znacząco poprawiając plastyczność stopu.

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu wyżarzania zmiękczającego na wydłużenie ( $A_5$ ) oraz wytrzymałość na rozciąganie ( $R_m$ ) okołoeutektycznego stopu AlSi11 w zależności od temperatury i czasu wygrzewania.

## 2. Metodologia badań

Badanie przeprowadzono dla okołoeutektycznego stopu AlSi11, którego skład chemiczny podano w tabeli 1.

Tabela 1. Skład chemiczny stopu AlSi11, % wag.

Table 1. Chemical composition of the AlSi11 alloy, wt. %

Si	Cu	Zn	Fe	Mg	Ni	Mn	Pb	Ti	Al
10,9	0,45	0,19	0,82	0,22	0,01	0,06	0,05	0,09	reszta/rest

Próbki do badań właściwości mechanicznych (wytrzymałości na rozciąganie –  $R_m$  i wydłużenia –  $A_5$ ) odlano w znormalizowanych kokilach [14], podgrzanych przed zalaniem do temperatury 300°C. Temperatura stopu podczas zalewania wynosiła 730°C.

To a high degree, the mechanical properties, and especially the elongation ( $A_5$ ) of the alloy, depend on the shape of eutectic silicon precipitations having form of irregular lamella with sharp boundaries; which conduce to propagation of cracks due to external stresses [4–6].

The dispersion hardening belongs to typical heat treatments of the Al-Si based alloys with contents of copper and/or magnesium [7], which results in a significant increase of tensile strength and hardness, with simultaneous reduction of plasticity of the alloy [8–10]. Whereas, the soft annealing effects on coagulation of the components separated from the solid solution on boundaries of grain, and on refinement of silicon precipitations [11–13], considerably improving plasticity of the alloy.

The aim of the performed investigations was to determine the effect of soft annealing on the elongation ( $A_5$ ) and the tensile strength ( $R_m$ ) of near-eutectic AlSi11 alloy in function of temperature and time of the soaking treatment.

## 2. Methodology of the investigations

The investigations were performed for the near-eutectic AlSi11 alloy, having its chemical composition presented in the Table 1.

Test bars to determination of the mechanical properties (tensile strength –  $R_m$  and elongation –  $A_5$ ) were poured in standardized metal moulds [14], heated to a temperature 300°C prior to pouring. Temperature of the alloy during the pouring amounted to 730°C.

Tabela 2. Parametry wyżarzania zmiękczającego stopu AlSi11

Table 2. Parameters of the soft annealing for the AlSi11 alloy

Nr układu planu / Systems of investigations plan	Parametry wyżarzania zmiękczającego / Parameters of the soft annealing	
	Temperatura $T$ , °C / Temperature $T$ , °C	Czas $\tau$ , h / Time $\tau$ , h
1	280	2
2		5
3		8
4	325	2
5		5
6		8
7	370	2
8		5
9		8

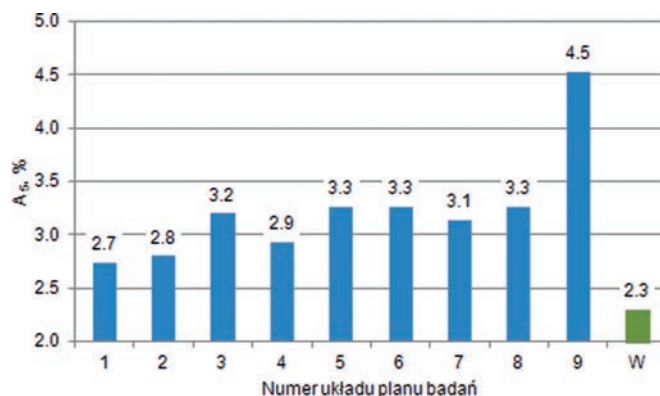
Następnie wykonano dziewięć wariantów wyżarzania zmiękczającego z chłodzeniem na powietrzu próbek przeznaczonych do badania właściwości mechanicznych ( $R_m$  i  $A_5$ ). Ilość wariantów przeprowadzonej obróbki cieplnej wynika z przyjętego planu frakcyjnego trójwartościowego dla dwóch wielkości wejściowych – temperatury i czasu wygrzewania (tabela 2) wygenerowanego w module DOE (*Design of Experiments*) oprogramowania Statistica.

W trakcie obróbki cieplnej temperatura w komorze pieca była monitorowana w sposób ciągły i utrzymywana w przedziale  $\pm 5^\circ\text{C}$  od wartości zadanej.

Badania właściwości mechanicznych ( $R_m$  i  $A_5$ ) stopu przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2010P [15] na próbkach pięciokrotnych o średnicy  $\phi 10$  mm. Statyczna próba rozciągania została zrealizowana na maszynie wytrzymałościowej ZD-20.

### 3. Opis uzyskanych wyników

Uzyskane wartości wydłużenia względnego ( $A_5$ ) dla poszczególnych układów planu badań (tabela 2) w odniesieniu do stopu nieobrobionego cieplnie (W) przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Wartości wydłużenia ( $A_5$ ) dla wyżarzania zmiękczającego stopu AlSi11

Fig. 1. Values of the elongation ( $A_5$ ) for the soft annealing of the AlSi11 alloy

Na podstawie uzyskanych wyników badań wykonano wykres (rys. 2) przedstawiający wpływ temperatury i czasu wyżarzania zmiękczającego na zmianę wydłużenia ( $A_5$ ) stopu AlSi11.

Przeprowadzona obróbka cieplna spowodowała również zmiany wytrzymałości na rozciąganie ( $R_m$ ) badanego stopu (rys. 3) dla poszczególnych układów planu badań (tabela 2) w porównaniu ze stopem nieobrobionym cieplnie (W, rys. 3).

Podobnie jak to miało miejsce w przypadku wydłużenia, na podstawie uzyskanych wyników badań w zakresie wytrzymałości na rozciąganie ( $R_m$ ), przedstawiono w formie graficznej (rys. 4) wpływ zmiany temperatury i czasu na  $R_m$ .

In the next step nine variants of soft annealing were performed with cooling air of the test bars destined to test the mechanical properties ( $R_m$  and  $A_5$ ). The number of performed heat treatment variants was based on the trivalent fractional plan for two input parameters – temperature and time of the soaking operation (Table 2) generated in the DOE (Design of Experiments) module of Statistica.

During the whole course of the heat treatment, the temperature in the chamber of the furnace was continuously monitored and maintained within an interval  $\pm 5^\circ\text{C}$  from the preset value.

Measurements of the mechanical properties ( $R_m$  and  $A_5$ ) of the alloy were performed according to the PN-EN ISO 6892-1:2010P standard [15] on quintuple test bars with diameter  $\phi 10$  mm. Static tensile test was performed with use of the ZD-20 strength tester.

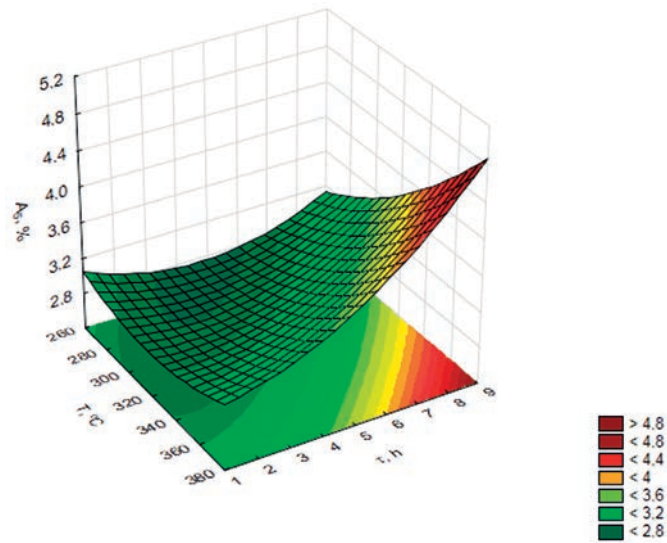
### 3. Description of obtained results

Obtained values of the unit elongation ( $A_5$ ) for successive systems of the investigation plan (Table 2) in relation to the alloy without the heat treatment (W) are presented in the Figure 1.

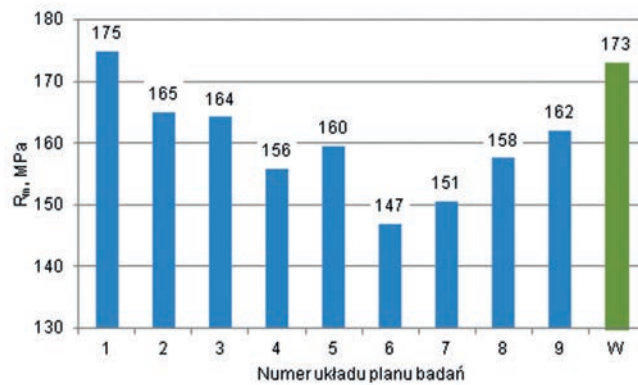
Based on obtained results of the investigations developed as shown (Fig. 2) are depicted the effects of temperature and time of the soft annealing treatment on change of the elongation ( $A_5$ ) of the AlSi11 alloy.

Accomplished heat treatment has also resulted in changed tensile strength ( $R_m$ ) of the investigated alloy (Fig. 3) for individual systems of the investigations plan (Table 2), compared to the alloy without the heat treatment (W, Fig. 3).

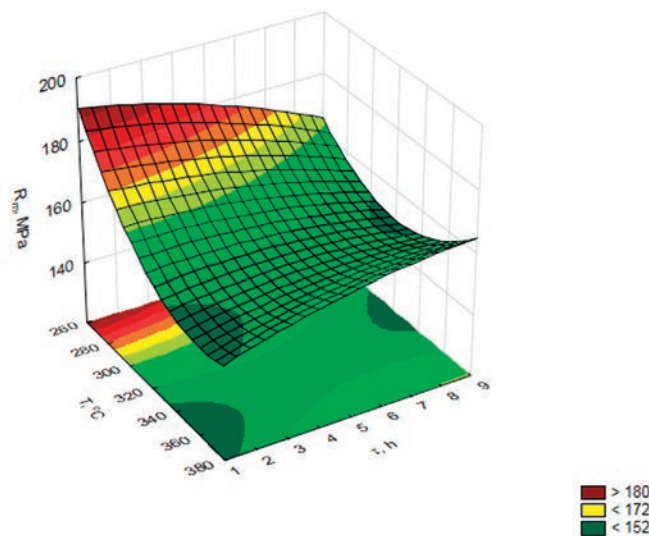
Similarly like in case of the elongation, based on obtained results of the investigations of tensile strength ( $R_m$ ), the effect of temperature and time on change of the  $R_m$  was presented graphically (Fig. 4).



Rys. 2. Wpływ temperatury i czasu wyżarzania zmiękczającego na wydłużenie względne ( $A_5$ ) dla stopu AISi11  
 Fig. 2. Effect of temperature and time of the soft annealing treatment on the unit elongation ( $A_5$ ) for the AISi11 alloy



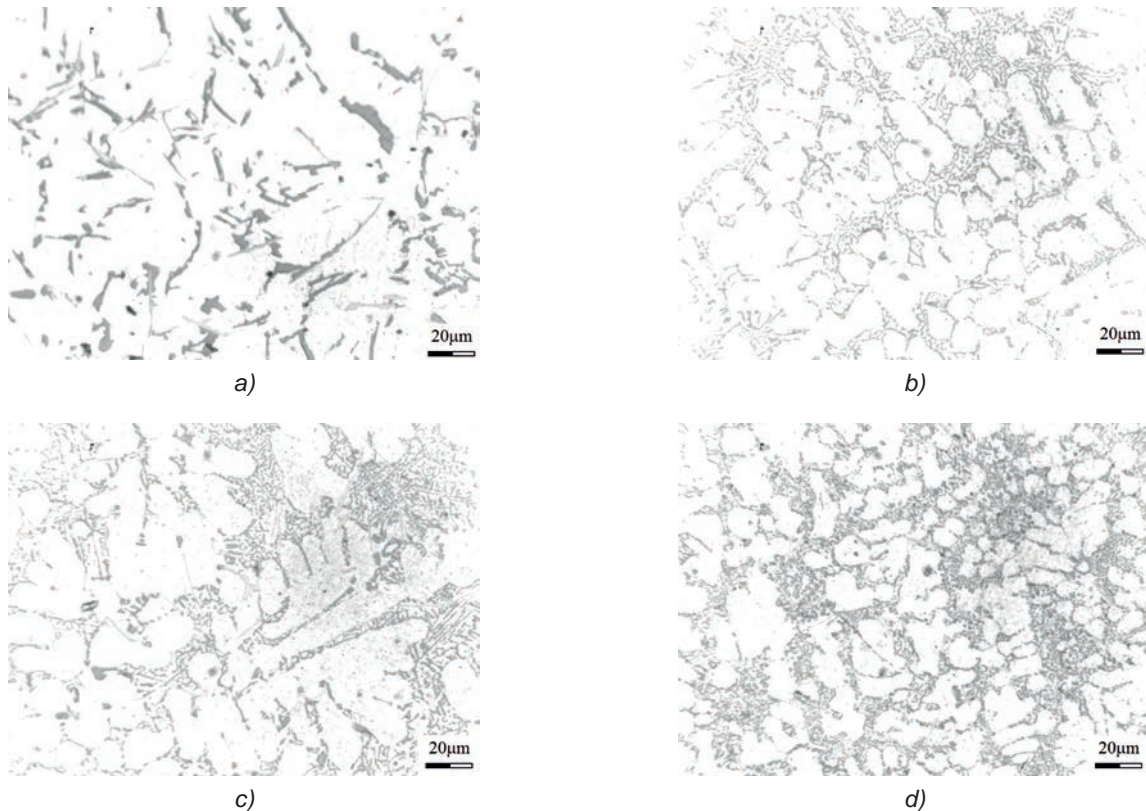
Rys. 3. Wartości wytrzymałości na rozciąganie ( $R_m$ ) dla wyżarzania zmiękczającego stopu AISi11  
 Fig. 3. Values of the tensile strength ( $R_m$ ) for the soft annealing of the AISi11 alloy



Rys. 4. Wpływ temperatury i czasu wyżarzania zmiękczającego na wytrzymałość na rozciąganie ( $R_m$ ) dla stopu AISi11  
 Fig. 4. Effect of temperature and time of the soft annealing on the tensile strength ( $R_m$ ) of the AISi11 alloy

Wyżarzanie zmiękczające powoduje zmiany w mikrostrukturze badanego stopu. Na [rysunku 5](#) pokazano strukturę stopu wyjściowego oraz po obróbce cieplnej dla najniższej ( $T = 280^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 2\text{ h}$ ), średniej ( $T = 325^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 5\text{ h}$ ) i najwyższej ( $T = 370^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 8\text{ h}$ ) przyjętej temperatury i czasu wygrzewania.

The soft annealing has resulted in changes in microstructure of the investigated alloy. In [Figure 5](#) are presented structures of the initial alloy and the alloy after the heat treatment for the lowest ( $T = 280^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 2\text{ h}$ ), for average ( $T = 325^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 5\text{ h}$ ), and for the highest ( $T = 370^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 8\text{ h}$ ) assumed temperature and time of the soaking treatment.



Rys. 5. Mikrostruktura stopu AlSi11: a) stop wyjściowy oraz po wyżarzaniu zmiękczającym dla następujących parametrów: b)  $T = 280^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 2\text{ h}$ , c)  $T = 325^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 5\text{ h}$ , d)  $T = 370^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 8\text{ h}$

Fig. 5. Microstructure of the AlSi11 alloy: a) initial alloy, and the alloy after the soft annealing for the following parameters: b)  $T = 280^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 2\text{ h}$ , c)  $T = 325^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 5\text{ h}$ , d)  $T = 370^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 8\text{ h}$

Mikrostruktura stopu wyjściowego ([rys. 5a](#)) charakteryzuje się wydzieleniami krzemu eutektycznego w postaci dużych i nieregularnych płytek o ostrych krawędziach oraz pojedynczymi wydzieleniami krzemu pierwotnego. Na mikrostrukturach stopu po wyżarzaniu zmiękczającym ([rys. 5b,c,d](#)) można zauważyć wyraźną zmianę postaci wydzielań krzemu eutektycznego. Następuje rozdrobnienie i koagulacja wydzielań krzemu, co korzystnie wpływa na wzrost plastyczności stopu.

Microstructure of the initial alloy ([Fig. 5a](#)) is characterized by precipitations of eutectic silicon in the form of big and irregular lamellas with sharp boundaries and single precipitations of primary silicon. On microstructures of the alloy after soft annealing ([Fig. 5b,c,d](#)) a distinct change of form of precipitations of the eutectic silicon can be seen. There occurs a refinement and coagulation of precipitations of the silicon, having a beneficial effect on increased plasticity of the alloy.

#### 4. Wnioski

Uzyskane wyniki badań dotyczące właściwości mechanicznych stopu AlSi11 poddanego operacji wyżarzania zmiękczającego wskazują znaczącą poprawę wydłużenia ( $A_5$ ) przy nieznacznym spadku wytrzymałości na rozciąganie ( $R_m$ ) w odniesieniu do stopu nieobrobionego

#### 4. Conclusions

The obtained results of the investigations concerning mechanical properties of the AlSi11 alloy after soft annealing treatment point to considerable improvement of the elongation ( $A_5$ ) and a slight reduction of the tensile strength ( $R_m$ ), when compared to the alloy without heat

cieplnie. Otrzymany wzrost wartości wydłużenia względnego ( $A_5$ ) dla poszczególnych układów zastosowanego planu badań mieści się w granicach od 17% do 95% w porównaniu do stanu pierwotnego. Największy spadek  $R_m$ , o 15%, w stosunku do stopu wyjściowego uzyskano po wygrzewaniu w temperaturze 325°C przez 8 godzin. Efektem wyżarzania zmiękczającego są również zmiany w mikrostrukturze badanego stopu (wydzielenia krzemu eutektycznego ulegają dużemu rozdrobnieniu). Zastosowanie wyżarzania zmiękczającego, przy odpowiednim doborze temperatury i czasu wygrzewania, umożliwia poprawę plastyczności badanego stopu przy zachowaniu jego dobrych właściwości wytrzymałościowych.

treatment. The resulting increase of unit elongation ( $A_5$ ) for the individual systems of the implemented test plan is included within limits from 17% to 95%, compared to the initial state. The highest decrease of the  $R_m$ , with 15%, compared to the initial alloy, was observed after soaking at temperature 325°C for 8 hours. Changes in microstructure of the investigated alloy (precipitations of eutectic silicon are finely divided) also result from soft annealing. Implementation of the soft annealing treatment, with a suitable selection of temperature and time of the soaking treatment, enables improvement of plasticity of the investigated alloy while maintaining its good mechanical properties.

## Podziękowania

Niniejszy artykuł powstał ze środków finansowych w ramach „Dotacji celowej na prowadzenie badań naukowych lub prac rozwojowych oraz zadań z nimi związanych służących rozwojowi młodych naukowców oraz uczestników studiów doktoranckich” w Katedrze Technologii Maszyn i Automatyzacji Wydziału Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej.

## Acknowledgement

The present study was financed from funds within the framework of “The grant-in aid for research work or development work and for projects connected with such work, serving the development of young scientists or Phd students” at Department of Production Engineering and Automation, Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science, Bielsko-Biala University.

## Literatura/References

1. Zolotarevsky V.S., N.A. Belov, M.V. Glazoff. 2006. *Casting Aluminium Alloys*. Oxford: Elsevier.
2. Dobrzański L.A. 2006. *Materiały inżynierskie i projektowanie materiałów*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
3. Górny Z. 1992. *Odlewnicze stopy metali nieżelaznych*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
4. Poniewierski Z. 1989. *Krystalizacja, struktura i właściwości siluminów*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
5. Drar H., I.L. Svensson. 2007. „Improvement of tensile properties of Al–Si alloys through directional solidification”. *Materials Letters* 61 (2) : 392–396. DOI: 10.1016/j.matlet.2006.04.112.
6. Pezda J. 2015. „Effect of the T6 heat treatment on change of mechanical properties of the AlSi12CuNiMg alloy modified with strontium”. *Archives of Metallurgy and Materials* 60 (2) : 627–632. DOI: 10.1515/amm-2015-0183.
7. Mohamed A.M.A., F.H. Samuel. 2012. A review on the heat treatment of Al–Si–Cu/Mg casting alloys. W *Heat Treatment – Conventional and Novel Applications*, ed. F. Czerwinski, 55–72. Rijeka: InTech.
8. Sjölander E., S. Seifeddine. 2010. „The heat treatment of Al–Si–Cu–Mg casting alloys”. *Journal of Materials Processing Technology* 210 (10) : 1249–1259. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.03.020.
9. Pedersen L., L. Arnberg. 2001. „The effect of solution heat treatment and quenching rates on mechanical properties and microstructures in AlSiMg foundry alloys”. *Metallurgical and Materials Transactions A* 32 (3) : 525–532. DOI: 10.1007/s11661-001-0069-y.
10. Moustafa M.A., F.H. Samuel, H.W. Doty. 2003. „Effect of solution heat treatment and additives on the hardness, tensile properties and fracture behaviour of Al–Si (A413.1) automotive alloys”. *Journal of Materials Science* 38 (22) : 4523–4534. DOI: 10.1023/A:1027385619114.
11. Praca zbiorowa. 1974. *Mały poradnik odlewnika*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
12. Oshikiri J., O. Umezawa, N. Nakamura. 2012. „Microstructural softening of eutectic and hyper-eutectic Al–Si–X continuous casts by annealing”. *Transactions of the Materials Research Society of Japan* 37 (1) : 39–43.
13. Oshikiri J., O. Umezawa, N. Nakamura. 2011. Softening and fatigue fracture of Al–Si–X alloy casts. W *JSAE Annual Congress*, 5–8. Pacifico Yokohama, Japan: Society of Automotive Engineers of Japan, Inc. Pobrane z: [http://kamome.lib.ynu.ac.jp/dspace/bitstream/10131/7944/1/B-57%20JSAE19-11\\_20115041.pdf](http://kamome.lib.ynu.ac.jp/dspace/bitstream/10131/7944/1/B-57%20JSAE19-11_20115041.pdf) [dostęp: 12.04.2016].
14. PN-H-88002:1988 Odlewnicze stopy aluminium – Odlewanie i przygotowanie próbek do badań właściwości mechanicznych (norma wycofana).
15. PN-EN ISO 6892-1:2010 Metale – Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.