

Otrzymano: 19 czerwca 2017 / Zaakceptowano: 17 października 2017 / Zamieszczono na WWW: 17 listopada 2017

*obróbka cieplna, wyżarzanie ujednorodniające,
utwardzanie dyspersyjne, stopy aluminium,
właściwości mechaniczne*

Aleksandra JARCO^{1*}

WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE STOPÓW EN AC-45000 (AlSi6Cu4) i AlSi17CuNiMg PO OBRÓBCE CIEPLNEJ

W artykule zaprezentowano wyniki badań wpływu różnych wariantów obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne dwóch stopów: EN AC-45000 (AlSi6Cu4) i AlSi17CuNiMg, które poddano wyżarzaniu ujednorodniającemu, utwardzaniu dyspersyjnemu oraz obróbce polegającej na połączeniu tych dwóch zabiegów. Badania właściwości mechanicznych przeprowadzono na znormalizowanych próbkach odlanych w koliach. Ujednorodnianie znacząco wpłynęło na poprawę plastyczności stopu w porównaniu do stopu wyjściowego, dlatego przeprowadzono je przed utwardzaniem dyspersyjnym. Pozwoliło to na uzyskanie wzrostu wydłużenia badanych stopów przy zachowaniu bardzo dobrych właściwości wytrzymałościowych (wytrzymałości na rozciąganie R_m i twardości HB) w odniesieniu do stopu po standardowej obróbce T6 (przesycaniu i sztucznym starzeniu). Ponadto przeprowadzona obróbka cieplna wpłynęła pozytywnie na postać wydzielań krzemu powodując ich rozdrobnienie, częściową sferoidyzację i koagulację.

1. WPROWADZENIE

Klasyczną obróbką cieplną siluminów zawierających Cu i Mg jest utwardzanie dyspersyjne, które składa się z dwóch zabiegów przesycania oraz starzenia [1,2]. W wyniku tej obróbki uzyskuje się znaczący wzrost wytrzymałości na rozciąganie R_m i twardości HB przy równoczesnym obniżeniu wartości wydłużenia A_5 oraz udarności KC stopu [3-5].

Wyżarzanie ujednorodniające prowadzone w wysokich temperaturach i przy długich czasach wygrzewania umożliwia, dzięki zmianom dyfuzyjnym, zmniejszenie mikrosegregacji składu stopu, poprzez usunięcie różnic koncentracji pierwiastków w kryształach [6-9]. Poprzedzenie utwardzania dyspersyjnego zabiegiem ujednorodniania ma na celu zminimalizowanie negatywnego wpływu utwardzania wydzieleniowego na plastyczność stopu.

Badania zrealizowano dla dwóch siluminów, podeutektycznego EN AC-45000 (AlSi6Cu4), który jest stosowany na średnio oraz wysoko obciążone odlewy, także cienkościennie, o wysokiej wytrzymałości w temperaturze do 200°C, m.in. obudowy sprzęgieł, głowice cylindrów i tłoków, bloki silników [10] oraz nadeutektycznego

¹ Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji

* E-mail: ajarco@ath.bielsko.pl

AlSi17CuNiMg wykorzystywanego na silnie obciążone odlewy tłoków silników spalinowych oraz korpusy i bloki cylindrowych sprężarek [11,12].

2. METODOLOGIA BADAŃ

Skład chemiczny badanych stopów EN AC-45000 (AlSi6Cu4) i AlSi17CuNiMg podano w tabeli 1.

Tabela 1. Skład chemiczny stopów EN AC-45000 (AlSi6Cu4) i AlSi17CuNiMg, % wag.
Table 1. Chemical composition of the EN AC-45000 (AlSi6Cu4) and AlSi17CuNiMg alloys, wt. %

Rodzaj stopu		Skład chemiczny / mass %									
		Si	Cu	Zn	Fe	Mg	Ni	Mn	Ti	Inne	Al
1	EN AC-45000 (AlSi6Cu4)	6,49	3,96	0,75	0,48	0,27	0,03	0,45	0,14	0,08	reszt.
2	AlSi17CuNiMg	16,2	1,35	0,03	0,35	0,75	1,0	0,20	0,05	0,03	reszt.

Próbki do badań właściwości mechanicznych odlano w znormalizowanych formach metalowych (kokilach) wykonanych wg PN-88/H-88002. Temperatura stopu w czasie zalewania wynosiła 700°C dla pierwszego stopu oraz 720°C dla drugiego stopu.

Następnie przeprowadzono różne warianty obróbki cieplnej przyjmując dla obu stopów takie same parametry (tabela 2) tj. temperaturę (t) i czas (τ) poszczególnych zabiegów.

Tabela 2. Parametry obróbki cieplnej dla stopów EN AC-45000 (AlSi6Cu4) i AlSi17CuNiMg
Table 2. Parameters of the heat treatment for the EN AC-45000 (AlSi6Cu4) and AlSi17CuNiMg alloys

Oznaczenie	Rodzaj obróbki cieplnej	Parametry		
		t , °C	τ , h	
O3p	wyżarzanie ujednorodniające (chłodzenie z piecem)	515	10	
T6	utwardzanie dyspersyjne (chłodzenie w wodzie $t_w=20^\circ\text{C}$)	przesycanie	485	2
		sztuczne starzenie	180	3,5
O3p+T6	wyżarzanie ujednorodniające + utwardzanie dyspersyjne			

Temperatura w komorze pieca w czasie obróbki cieplnej była na bieżąco rejestrowana i utrzymywana w przedziale $\pm 5^\circ\text{C}$ od wartości zadanej.

Po przeprowadzonej obróbce cieplnej wykonano badania właściwości mechanicznych stopów (wytrzymałości na rozciąganie R_m i wydłużenia A_5) na próbkach o średnicy $\varnothing 10$ mm (początkowa długość pomiarowa $L_0=50$ mm) zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2010P. Statyczna próba rozciągania została wykonana na maszynie wytrzymałościowej ZD-20.

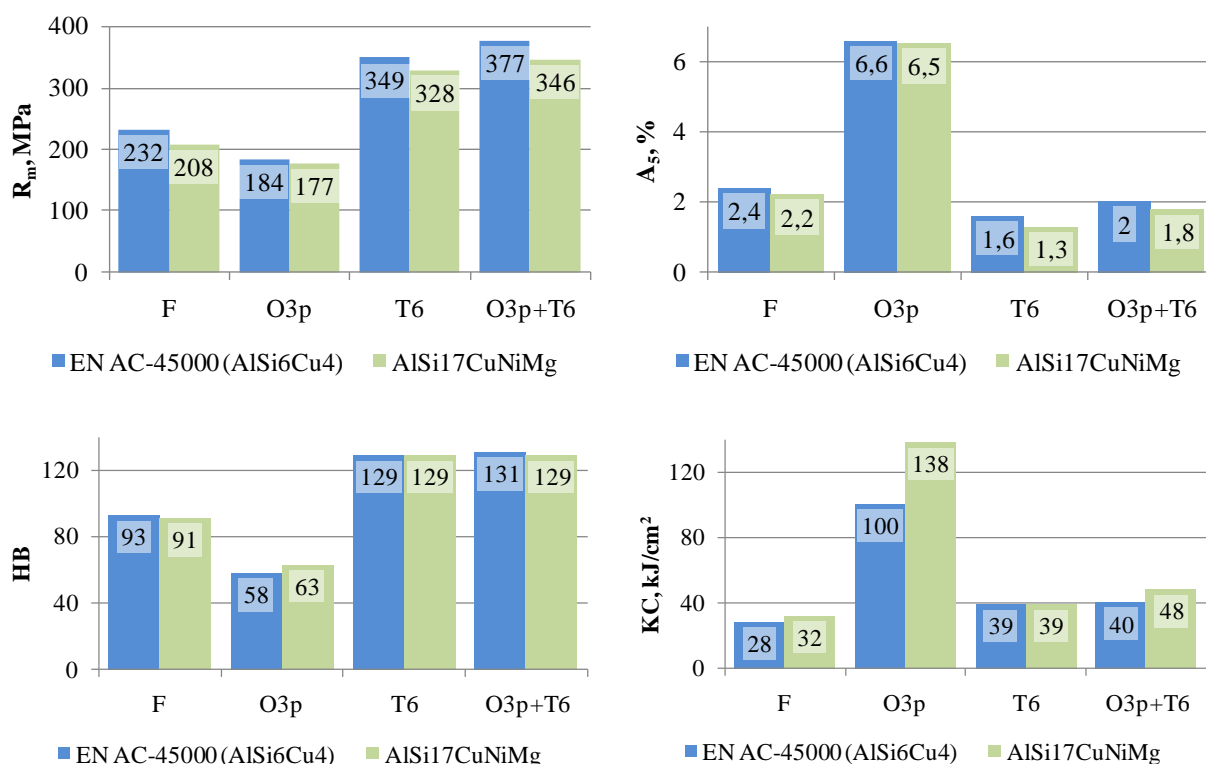
Pomiar twardości *HB* metodą Brinella wykonano, z wykorzystaniem twardościomierza typu PRL 82, kulką stalową o średnicy $\varnothing 10$ mm obciążoną przez 30 sekund siłą 9807 N.

Udarność *KC* zmierzono młotem Charpy'ego typu VEB 50 J, w oparciu o metodę uproszczoną [13], wykorzystując odlewane próbki cylindryczne $\varnothing 12$ mm z naciętym karbem (rowek o szerokości i głębokości 1 mm, promień zaokrąglenia rowka 0,5 mm).

Zdjęcia mikrostruktur badanych stopów wykonano wykorzystując świetlny mikroskop metalograficzny Neophot 32.

3. WYNIKI BADAŃ

Na podstawie przeprowadzonych badań właściwości mechanicznych (R_m , A_5 , *HB* i *KC*) sporządzono wykresy (rys. 1) umożliwiające porównanie efektów poszczególnych wariantów obróbki cieplnej dla badanych stopów w odniesieniu do stopu wyjściowego (F).



Rys. 1. Uzyskane właściwości mechaniczne (R_m , A_5 , *HB*, *KC*) stopów EN AC-45000 (AlSi6Cu4) i AlSi17CuNiMg po różnych wariantach obróbki cieplnej w odniesieniu do stopu nieobrobionego cieplnie (F)

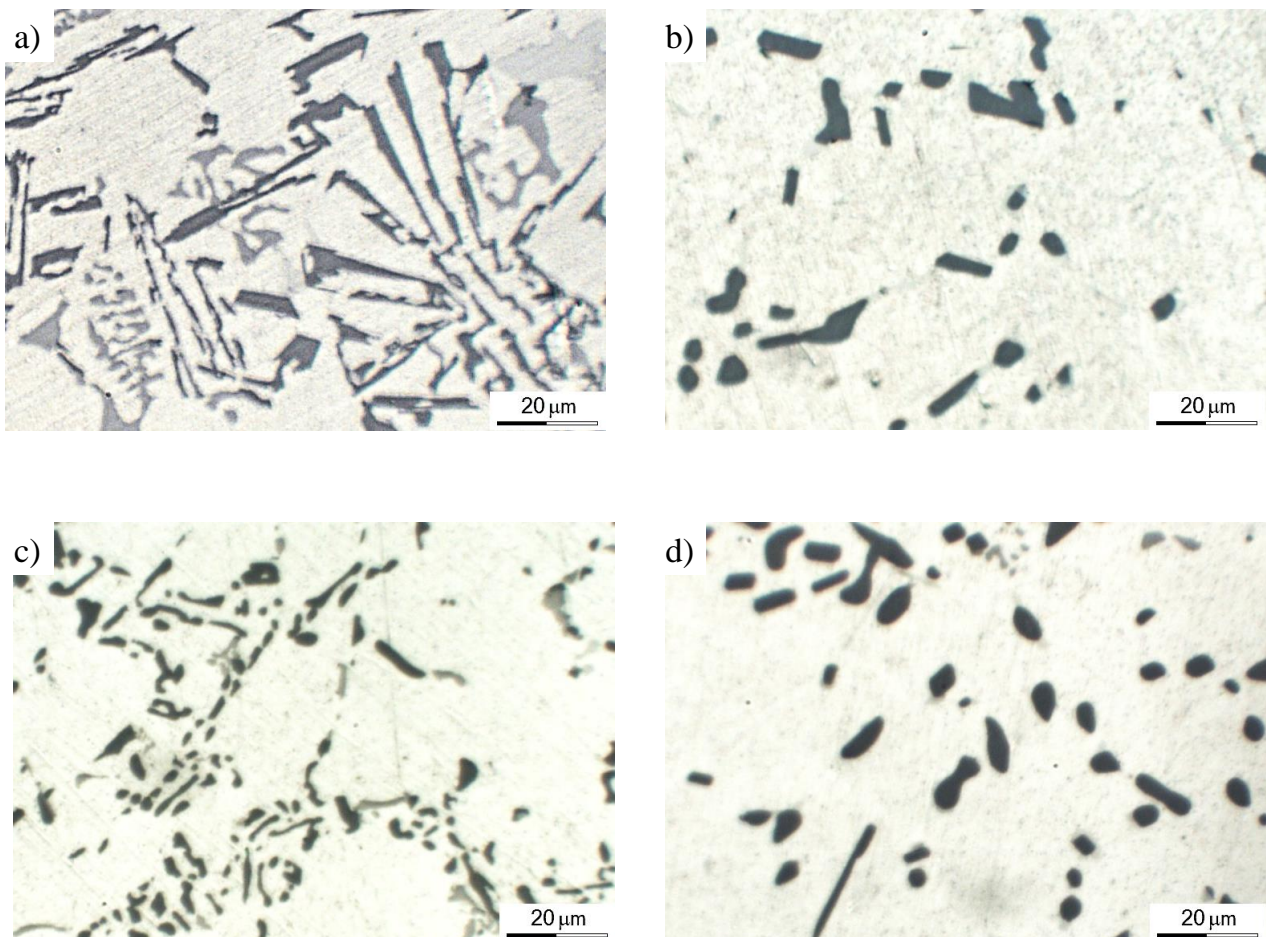
Fig. 1. Results of the mechanical properties (R_m , A_5 , *HB*, *KC*) for the EN AC-45000 (AlSi6Cu4) and AlSi17CuNiMg alloys after different variants of heat treatment in relation to the alloy without the heat treatment (F)

Poprzedzenie utwardzania dyspersyjnego zabiegiem wyżarzania ujednorodniającego w przypadku obu stopów powoduje nieznaczny wzrost wytrzymałości na rozciąganie R_m w odniesieniu do stopu po obróbce T6. Natomiast wydłużenie A_5 stopu EN AC-45000

(AlSi6Cu4) wzrasta o 25%, a stopu AlSi17CuNiMg o 39% w porównaniu do stopu po utwardzaniu wydzieleniowym. Twardość *HB* obu stopów pozostaje na tym samym poziomie, jak po obróbce T6. Udarność *KC* dla stopu AlSi17CuNiMg rośnie o 23%.

Zastosowanie wyłącznie wyżarzania ujednorodniającego dla obu stopów spowodowało spadek wytrzymałości na rozciąganie R_m przy jednoczesnym niemal trzykrotnym wzroście wydłużenia A_5 w porównaniu do stopu wyjściowego (F). Ujednorodnianie wpływa także na obniżenie twardości *HB* o 38% dla stopu EN AC-45000 (AlSi6Cu4) i 31% dla stopu AlSi17CuNiMg oraz powoduje ponad trzykrotny wzrost udarności *KC* dla stopu EN AC-45000 (AlSi6Cu4) i ponad czterokrotny dla stopu AlSi17CuNiMg w stosunku do stopu wyjściowego (F).

Przeprowadzenie różnych wariantów obróbki cieplnej wpłynęło również na zmianę mikrostruktury badanych stopów. Na rysunku 2 przedstawiono mikrostrukturę stopu EN AC-45000 (AlSi6Cu4) w stanie wyjściowym (F) oraz po wyżarzaniu ujednorodniającym, utwardzaniu dyspersyjnym i po obróbce cieplnej polegającej na połączeniu tych dwóch zabiegów.



Rys. 2. Mikrostruktury stopu EN AC-45000 (AlSi6Cu4): a) stop wyjściowy (F), b) po wyżarzaniu ujednorodniającym (O3p), c) po utwardzaniu dyspersyjnym (T6), d) po obróbce O3p+T6

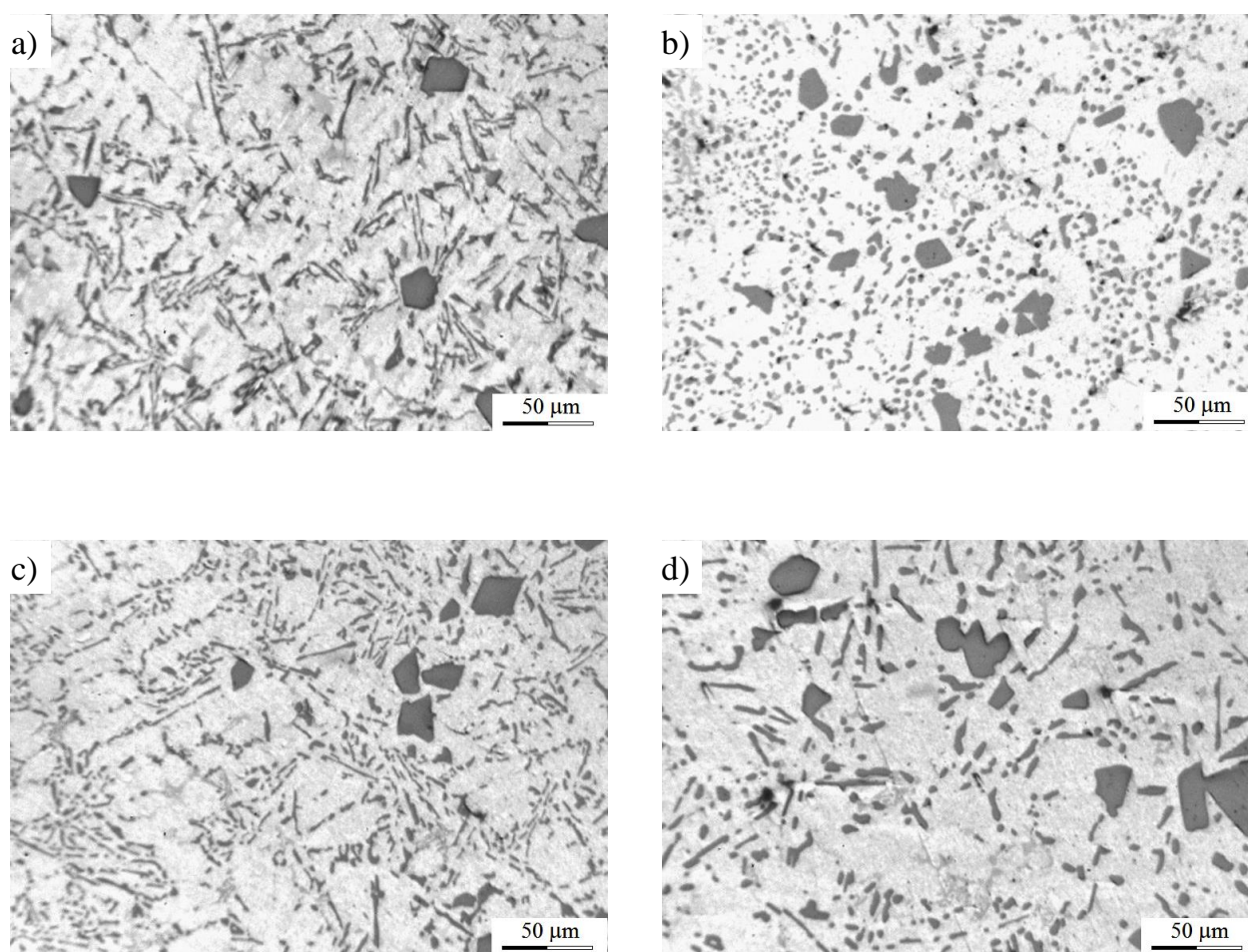
Fig. 2. Microstructures of the EN AC-45000 (AlSi6Cu4) alloy, a) initial alloy (F), b) after homogenizing (O3p), c) after dispersion hardening (T6), d) after O3p+T6 treatment

Stop nieobrobiony cieplnie (rys. 2a) charakteryzuje się ostrymi wydzieleniami niezmodyfikowanego krzemu eutektycznego na tle fazy α , który ulega rozdrobnieniu, zaokrągleniu i koagulacji po przeprowadzeniu wyżarzania ujednorodniającego (rys. 2b).

Natomiast utwardzanie wydzieleniowe powoduje duże rozdrobnienie wydzielań krzemu eutektycznego oraz częściowe zaokrąglenie jego krawędzi (rys. 2c).

Po zastosowaniu obróbki cieplnej polegającej na połączeniu ujednorodniania z obróbką T6 następuje wyraźne rozdrobnienie i częściowa sferoidyzacja wydzielań krzemu eutektycznego (rys. 2d).

Mikrostrukturę stopu AlSi17CuNiMg w stanie wyjściowym (F) oraz po przeprowadzeniu różnych wariantów obróbki pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Mikrostruktury stopu AlSi17CuNiMg, a) stop wyjściowy (F), b) po wyżarzaniu ujednorodniającego (O3p), c) po utwardzaniu dyspersyjnym (T6), d) po obróbce O3p+T6

Fig. 3. Microstructures of the AlSi17CuNiMg alloy, a) initial alloy (F), b) after homogenizing (O3p), c) after dispersion hardening (T6), d) after O3p+T6 treatment

Mikrostrukturę stopu wyjściowego (rys. 3a) charakteryzują nieregularne wydzielenia krzemu pierwotnego oraz płytkowe wydzielenia niezmodyfikowanego krzemu eutektycznego na tle fazy α .

Ujednorodnianie wpływa na zmianę morfologii wydzielen krzemu, które uległy sferoidyzacji i dużemu rozdrobnieniu (rys. 3b).

Zastosowanie obróbki cieplnej T6, również wpłynęło na zmianę kształtu wydzielen krzemu eutektycznego i nadeutektycznego powodując ich częściowe rozdrobnienie (rys. 3c). Połączenie wyżarzania ujednorodniającego z utwardzaniem dyspersyjnym powoduje natomiast zaokrąglenie oraz rozdrobnienie wydzielen krzemu (rys. 3d).

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań stopów EN AC-45000 (AlSi6Cu4) i AlSi17CuNiMg można stwierdzić, że wyżarzanie ujednorodniające powoduje znaczący wzrost wydłużenia A_5 i udarności KC oraz spadek wytrzymałości na rozciąganie R_m i twardości HB w odniesieniu do pozostałych wariantów obróbki cieplnej i stopu wyjściowego.

Połączenie ujednorodniania i utwardzania dyspersyjnego pozwala otrzymać najlepszą wytrzymałość na rozciąganie R_m i twardość HB przy jednoczesnym zachowaniu dobrych właściwości plastycznych. Jest to spowodowane zmianą kształtu wydzielen krzemu, które ulegają rozdrobnieniu i sferoidyzacji, co powoduje wzrost wydłużenia A_5 i udarności KC stopu przy jednoczesnym utrzymaniu wytrzymałości na rozciąganie R_m i twardości HB na wysokim poziomie w stosunku do stopu po obróbce T6 (przesycaniu i sztucznym starzeniu).

Poprzez dobór rodzaju obróbki cieplnej można otrzymać odpowiednie parametry wytrzymałościowe stopu w zależności od jego przeznaczenia i wymagań eksploatacyjnych, uzyskując na przykład dobrą plastyczność i udarność, lecz mniejszą wytrzymałość lub odwrotnie (bardzo wysoką wytrzymałość i twardość kosztem właściwości plastycznych).

LITERATURA

- [1] MOHAMED A.M.A., SAMUEL F.H., 2012, *Heat treatment – conventional and novel applications*, InTech.
- [2] PEZDA J., 2014, *Wpływ wybranych parametrów obróbki cieplnej na jakość technologiczną części maszyn odlewanych z siluminów*, Wydawnictwo Naukowe ATH, Bielsko-Biała.
- [3] GÓRNY Z., 1992, *Odlewnicze stopy metali nieżelaznych*, WNT, Warszawa.
- [4] SJÖLANDER E., SEIFEDDINE S., 2010, *The heat treatment of Al-Si-Cu-Mg casting alloys*, Journal of Materials Processing Technology, 210/10, 1249-1259.
- [5] ZOLOTOREVSKY V.S., BELOV N.A., GLAZOFF M.V., 2007, *Casting aluminium alloys*, Elsevier, Oxford.
- [6] DOMKE W., 1989, *Vademecum materiałoznawstwa*, WNT, Warszawa.
- [7] JARCO A., PEZDA J., 2015, *Impact of various types of heat treatment on mechanical properties of the EN AC-AlSi6Cu4 alloy*, Archives of Foundry Engineering, 15/2, 35-38.
- [8] JARCO A., PEZDA J., 2015, *Wpływ rodzaju obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne stopu EN AC-AlSi7Mg*, V Międzynarodowa Konferencja Studentów oraz Doktorantów Inżynier XXI wieku, Wydawnictwo Naukowe ATH, Bielsko-Biała, 229-234.
- [9] JARCO A., PEZDA J., 2016, *Effect of different variants of heat treatment on mechanical properties of the AlSi17CuNiMg alloy*, Archives of Foundry Engineering, 16/2, 41-44.
- [10] MEDLEN D., BOLIBRUCHOVA D., 2012, *The influence of remelting on the properties of AlSi6Cu4 alloy modified by antimony*, Archives of Foundry Engineering, 12/1, 81-86.
- [11] PIĄTKOWSKI J., MATUŁA T., 2015, *The microstructure and mechanical properties of the AlSi17Cu5 alloy after heat treatment*, Archives of Metallurgy and Materials, 60/3, 1813-1817.

- [12] PIĄTKOWSKI J., WIESZAŁA R., 2014, *Wpływ stopnia przegrzania na parametry stereologiczne pierwotnych kryształów krzemu w stopie AlSi17Cu5*, *Rudy i Metale Nieżelazne Recykling*, 59/6, 292-299.
- [13] PONIEWIERSKI Z., 1989, *Krystalizacja, struktura i właściwości siluminów*, WNT, Warszawa.

THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE EN AC-45000 (AlSi6Cu4) AND AlSi17CuNiMg ALLOYS AFTER HEAT TREATMENT

In the paper are presented results of a research work concerning effects of various variants of heat treatment operations on mechanical properties of the EN AC-45000 (AlSi6Cu4) and AlSi17CuNiMg alloys, after homogenizing treatment, after dispersion hardening treatment, and after treatment consisting in combination of these two mentioned earlier treatments. Tests of the mechanical properties were performed on standardized specimens poured in metal moulds. The homogenizing had a significant effect on improvement of plasticity of the alloy, comparing to raw alloy, and therefore such treatment was performed before dispersion hardening, what enabled obtainment of increased elongation of the investigated alloys, maintaining very good mechanical properties (tensile strength R_m and hardness HB), referring to the alloy after standard T6 treatment (solution and artificial ageing treatment). Moreover, performed heat treatment had advantageous effect on shape of silicon precipitations, resulting in refining, partial spheroidizing and coagulation of the silicon precipitations.

Keywords: *heat treatment, homogenizing, dispersion hardening, aluminum alloys, mechanical properties*