

**WPLYW MODYFIKACJI I TEMPERATURY FORMY  
NA WLAŚCIWOŚCI MECHANICZNE STOPU AlSi7Mg**W. ORŁOWICZ<sup>1</sup>, M. MRÓZ<sup>2</sup>, M. TUPAJ<sup>3</sup>Katedra Odlewnictwa i Spawalnictwa, Politechnika Rzeszowska  
ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów**STRESZCZENIE**

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu modyfikacji tytanem (0,140%), borem (0,002%) i sodem (0,005%, 0,010%, 0,015%, 0,020%) lub strontem (0,015%, 0,040%, 0,060%) oraz temperatury formy (420<sup>0</sup>C, 450<sup>0</sup>C lub 470<sup>0</sup>C) i obróbki cieplnej (przesycanie 535 <sup>0</sup>C/5h/woda, starzenie 175 <sup>0</sup>C/5h/powietrze) na wytrzymałość na rozciąganie, umowną granicę plastyczności i twardość stopu AlSi7Mg. Najwyższe wartości R<sub>m</sub>, R<sub>0,2</sub> i HB uzyskano dla stopu zawierającego 0,010% sodu lub 0,015% strontu, odlanego do formy o temperaturze 420<sup>0</sup>C, a następnie obrobionego cieplnie (przesyconego i starzonego).

*Key words: Al-Si alloy, modification, structural parameters, mechanical properties.*

**1. WSTĘP**

Stop AlSi7Mg z uwagi na dobre właściwości mechaniczne i technologiczne (lejność, spawalność, skrawalność), znajduje szerokie zastosowanie w praktyce przemysłowej. Dla uzyskania wymaganych właściwości użytkowych odlewu należy dobrać skład chemiczny, zapewnić wysoką jakość ciekłego stopu, opracować skuteczny system zasilania, dobrać szybkość chłodzenia ciekłego stopu oraz obróbkę cieplną.

Podstawowymi pierwiastkami stopowymi w stopie AlSi7Mg są krzem i magnez. Dodatek krzemu poprawia właściwości odlewnicze stopu, między innymi lejność i zdolność do samozasilania, co skutkuje redukcją porowatości skurczowej [1]. Właściwości mechaniczne stopu istotnie zależą od kształtu, rozmiaru i rozłożenia wydzieleni krzemu. Drobne, sferyczne wydzielenia i mała odległość między nimi w eutektyce (ni-

---

<sup>1</sup> prof. dr hab. inż., aworlow@prz.rzeszow.pl

<sup>2</sup> dr inż., mfmroz@prz.rzeszow.pl

<sup>3</sup> mgr inż., mirek@prz.rzeszow.pl

ska wartość parametru strukturalnego  $\lambda_E$ ), decydują o wysokich właściwościach mechanicznych stopu. Mały dodatek magnezu pozwala na umocnienie roztworu stałego  $\alpha(\text{Al})$  drobnymi wydzieleniami fazy  $\text{Mg}_2\text{Si}$  w trakcie obróbki cieplnej. Nadmierna zawartość magnezu z uwagi na jego dużą podatność do tworzenia tlenków może jednak wpłynąć niekorzystnie na właściwości mechaniczne stopu [2].

Przy obecności żelaza w stopie tworzą się między innymi takie fazy międzymetaliczne jak  $\alpha(\text{Al}_{15}\text{Fe}_3\text{Si}_2)$ ,  $\beta(\text{Al}_5\text{FeSi})$  oraz  $\pi(\text{Al}_8\text{Mg}_3\text{FeSi}_6)$ . Wzrost ilości dużych wydzieleni fazy międzymetalicznych obniża właściwości mechaniczne, a w szczególności plastyczność stopu. Szczególnie niekorzystnie oddziałują na właściwości plastyczne twarde i kruche płytkowe wydzielenia fazy  $\beta$  [3].

Wodór powoduje zagazowanie ciekłego stopu wpływając niekorzystnie na jego jakość. Porowatość gazowa wpływa na obniżenie właściwości mechanicznych. Prawidłowo wykonana rafinacja ciekłego stopu pozwala na istotne wyeliminowanie porowatości gazowej i usunięcie tlenków, poprzez to wpływa na podwyższenie właściwości mechanicznych stopu.

Pod pojęciem modyfikacji rozumie się procesy technologiczne, w których poprzez oddziaływanie odpowiednimi dodatkami wprowadzanymi do ciekłego stopu, wpływa się na przebieg jego krystalizacji, celem uzyskania drobnoziarnistej struktury odlewu. Procesy te dotyczą rozdrobnienia roztworu stałego  $\alpha$  (Al), uszlachetniania eutektyki oraz zmiany morfologii wydzieleni krzemu [4]. Rozdrobnienie struktury w procesie modyfikacji poprawia właściwości mechaniczne stopu.

Dla zmiany kształtu wydzieleni krzemu, na bardziej korzystny z uwagi na właściwości mechaniczne, do ciekłego stopu wprowadza się dodatek sodu lub strontu. Te dwa pierwiastki są najczęściej stosowane w praktyce przemysłowej do modyfikacji eutektyki. Modyfikujący wpływ tych pierwiastków polega na zmianie morfologii wydzieleni krzemu eutektycznego z płytkowej na włóknistą, co skutkuje wzrostem właściwości mechanicznych.

Jednym z głównych narzędzi technologicznych, którym można oddziaływać na przebieg procesu krystalizacji jest szybkość chłodzenia. Wywołanie dużego przechłodzenia w okresie krzepnięcia stopu, poprzez jego szybkie chłodzenia umożliwia uzyskanie drobnych wydzieleni krzemu i drobnych wydzieleni fazy międzymetalicznych zawierających żelazo [2] oraz drobnych wydzieleni fazy  $\text{Mg}_2\text{Si}$  [5]. Rozdrobnienie struktury wpływa korzystnie na właściwości mechaniczne stopów Al-Si.

Obróbkę cieplną stopów Al-Si-Mg prowadzi się w celu uzyskania zadawalającej kombinacji właściwości wytrzymałościowych i plastycznych. Obejmuje ona przesycaenie oraz naturalne lub sztuczne starzenie. Przesycaenie polega na wygrzaniu stopu w temperaturze poniżej temperatury przemiany eutektycznej i ma na celu rozpuszczenie wydzieleni  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , które powstały podczas krystalizacji stopu, ujednorodnienie koncentracji pierwiastków na przekroju dendrytów fazy  $\alpha$  (w szczególności Mg i Si) [5] oraz zmianę morfologii wydzieleni krzemu. W trakcie przesycaenia wydzielenia krzemu ulegają sferoidyzacji i wzrastają drogą koagulacji. Szybkość sferoidyzacji wydzieleni krzemu jest większa w stopie modyfikowanym, w porównaniu do stopu niemodyfikowanego, w którym tylko drobne wydzielenia krzemu ulegają sferoidyzacji po czasie 10 do 15

godzin [6]. Wynika stąd praktyczny wniosek, że poprzez prawidłowo wykonany zabieg modyfikacji można skrócić czas obróbki cieplnej. W odlewach podanych skróconej obróbce cieplnej, pomijającej proces przesycaenia, morfologia wydzielań krzemu nie ulega zmianie podczas starzenia, z uwagi na zbyt niską temperaturę procesu (160-220<sup>0</sup>C). Zmiana właściwości mechanicznych stopu w tym przypadku jest następstwem procesów wydzieleniowych, przebiegających w roztworze stałym  $\alpha$  [7].

Celem niniejszej pracy było określenie wpływu modyfikacji sodem lub strontem stopu AlSi7Mg uprzednio modyfikowanego tytanem-borem oraz wpływu szybkości chłodzenia na jego mikrostrukturę i właściwości mechaniczne po obróbce cieplnej.

## 2. PRZYGOTOWANIE MATERIAŁU I METODYKA BADAŃ

Materiałem do badań był produkcyjny stop AlSi7Mg modyfikowany sodem lub strontem. Wsad metalowy, który stanowił stop hutniczy AlSi7Mg, topiono w piecu komorowym gazowym. Następnie ciekły metal przelano do dwóch elektrycznych pieców oporowych, gdzie wykonano zabieg rafinacji. Po zakończeniu procesu rafinacji zgarnięto nagromadzone żuźle i tlenki. W obu piecach wykonano modyfikację stopu tytanem i borem z zastosowaniem takiej samej ilości zaprawy AlTi5B1. W piecu pierwszym przeprowadzono zabieg modyfikacji sodem, a w piecu drugim zabieg modyfikacji strontem.

Modyfikację stopu AlSi7Mg sodem wykonano wprowadzając do ciekłego metalu sól metaliczny, w ilości niezbędnej dla uzyskania założonych poziomów zawartości tego pierwiastka (0,005%Na, 0,010%Na, 0,015%Na lub 0,020%Na). Dla każdego wariantu modyfikacji stopu sodem odlano próbki do badań właściwości mechanicznych. Próbki odlewano do formy kokilowej podgrzanej do temperatury 420<sup>0</sup>C, 450<sup>0</sup>C lub 470<sup>0</sup>C. Skład chemiczny stopu AlSi7Mg po modyfikacji sodem podano w tabeli 1.

Tabela 1. Skład chemiczny stopu AlSi7Mg modyfikowanego sodem  
Table 1. Chemical composition of AlSi7Mg alloy after modification sodium

Zawartość pierwiastków, % wag.								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	B	Na	Al
7,10	0,25	0,04	0,10	0,30	0,14	0,0002	0,005	reszta
7,10	0,26	0,03	0,10	0,28	0,14	0,0002	0,010	reszta
7,09	0,25	0,03	0,10	0,28	0,14	0,0002	0,015	reszta
7,09	0,26	0,03	0,10	0,27	0,14	0,0002	0,020	reszta

W drugim elektrycznym piecu oporowym wykonano zabieg modyfikacji strontem wprowadzając sukcesywnie do kąpieli metalowej stront w postaci zaprawy AlSr10. Założono następujące warianty modyfikacji strontem: 0,015%Sr, 0,040%Sr i 0,060%Sr. Z każdego wariantu modyfikacji stopu strontem odlano próbki do badań właściwości mechanicznych. Próbki odlewano do formy kokilowej podgrzanej do temperatury 420<sup>0</sup>C, 450<sup>0</sup>C lub 470<sup>0</sup>C. Skład chemiczny stopu AlSi7Mg po modyfikacji strontem przedstawia tabela 2.

Tabela 1. Skład chemiczny stopu AlSi7Mg modyfikowanego strontem  
 Table 1. Chemical composition of AlSi7Mg alloy after modification strontium

Zawartość pierwiastków, % wag.								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	B	Sr	Al
7,10	0,25	0,03	0,10	0,30	0,14	0,0002	0,015	reszta
7,09	0,24	0,03	0,10	0,29	0,14	0,0002	0,040	reszta
7,08	0,25	0,03	0,10	0,28	0,14	0,0002	0,060	reszta

Próbki do badań właściwości mechanicznych poddano obróbce cieplnej. Przyjęte parametry obróbki cieplnej są stosowane w praktyce przemysłowej (przesycanie 535<sup>0</sup>C/5h/woda o temperaturze 20<sup>0</sup>C, starzenie 175<sup>0</sup>C/5h/powietrze).

Stacyną próbę rozciągania wykonano zgodnie z normą PN-EN10602-1 +AC1 na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej UTS10D z rejestracją komputerową. Stosowano próbki okrągłe o średnicy 10 mm. Wyznaczono umowną granicę plastyczności R<sub>0,2</sub>, wytrzymałość na rozciąganie R<sub>m</sub>. Pomiary wykonano na czterech próbkach. Wyniki przyjęte do opracowania zależności są średnią arytmetyczną pomiarów. Pomiary twardości wykonano z zastosowaniem twardościomierza Wilson-Wolper, metodą Brinella, zgodnie z normą PN-EN-10003-1 na przygotowanych drogą frezowania uchwytach próbek. Wyniki są średnią arytmetyczną z pięciu pomiarów.

Badania mikrostruktury wykonano z zastosowaniem mikroskopu optycznego Neophot 2 wyposażonego w zaawansowany system analizy obrazu MultiScan v. 08. Badania strukturalne obejmowały wyznaczenie parametru strukturalnego l<sub>max</sub> (maksymalna długość wydzielen krzemu).

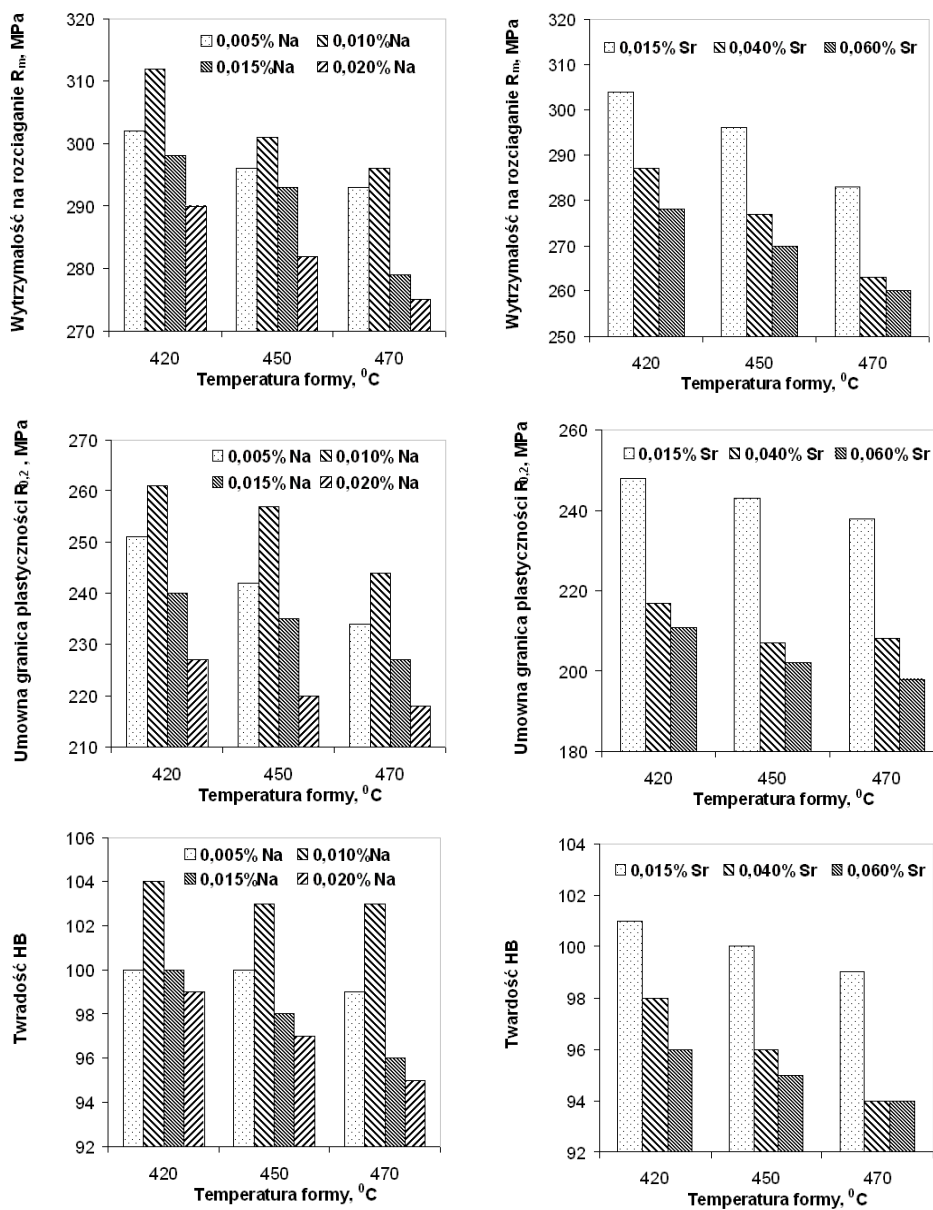
### 3. WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań właściwości mechanicznych stopu AlSi7Mg modyfikowanego sodem lub strontem przedstawiono na rysunku 1.

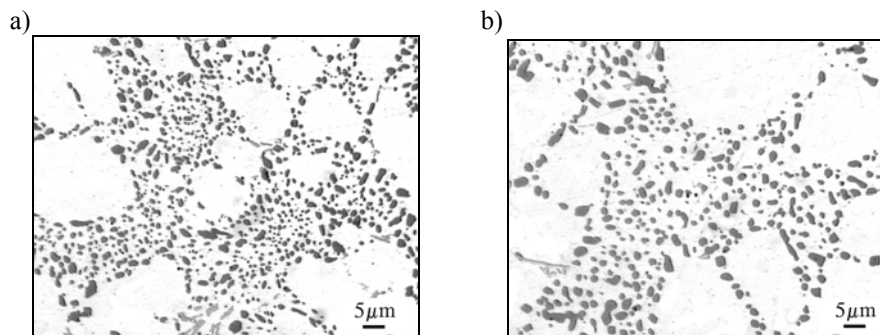
Uzyskane rezultaty wskazują na silne oddziaływanie temperatury formy (szybkości chłodzenia ciekłego stopu). Największa szybkość chłodzenia ciekłego stopu występowała w przypadku formy nagrzanej do temperatury 420<sup>0</sup>C. Próbki uzyskane z formy o tej temperaturze wykazały najwyższe wartości R<sub>m</sub>, R<sub>0,2</sub> i HB, zarówno w przypadku stopu modyfikowanego sodem jak i w przypadku stopu modyfikowanego strontem. Porównanie wyników badań wskazuje, że wyższe wartości analizowanych właściwości uzyskano w przypadku modyfikacji stopu sodem (0,010% Na).

Przykładowe mikrostruktury stopu AlSi7Mg modyfikowanego sodem (0,010% Na) lub strontem (0,015% Sr), odlanego do formy o temperaturze 420<sup>0</sup>C i obrobionego cieplnie (przesycanie 535<sup>0</sup>C/5h/H<sub>2</sub>O<sub>20</sub><sup>0</sup>C, starzenie 175<sup>0</sup>C/5h/powietrze) przedstawiono na rysunku 2.

Stwierdzić można znacznie większe wydzielenia krzemu w stopie modyfikowanym strontem niż w stopie modyfikowanym sodem.



Rys. 1. Wpływ temperatury formy i zawartości sodu lub strontu na  $R_m$ ,  $R_{0,2}$  i HB stopu AlSi7Mg  
 Fig. 1. Influence of permanent mould temperature and additions sodium or strontium on UTS, YS and hardness of AlSi7Mg alloy



Rys. 2. Mikrostruktury obrobionego cieplnie stopu AlSi7Mg; a) po modyfikacji sodem (0,010% Na), b) po modyfikacji strontem (0,015% Sr). Temperatura kokili 420<sup>0</sup>C  
 Fig. 2. Microstructures of AlSi7Mg alloy after heat treatment; a) after modification sodium (0,010% Na), b) after modification strontium (0,015% Sr). Temperature of permanent mould 420<sup>0</sup>C

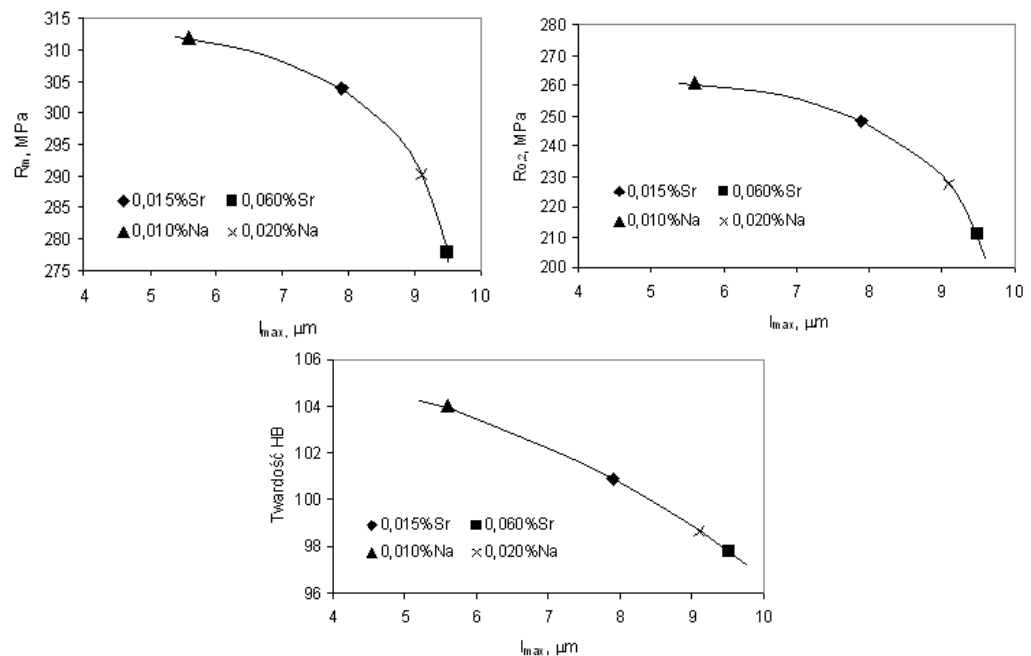
Wartości parametru strukturalnego wydzielen krzemu  $l_{max}$  oceniono dla odlewów wykonanych w formie metalowej nagrzanej do temperatury 420 °C, ponieważ przy takiej temperaturze uzyskano najwyższe wartości  $R_m$ ,  $R_{0,2}$  i HB. Analizowano stopy z dodatkiem 0,010%Na i 0,020%Na oraz 0,015%Sr i 0,060%Sr, ponieważ przy takich zawartościach modyfikatora uzyskano najwyższe lub najniższe wartości  $R_m$ ,  $R_{0,2}$  i HB. Przy analizie małe wydzielenia faz międzymetalicznych traktowano jak wydzielenia krzemu. Wartości parametru strukturalnego  $l_{max}$  po modyfikacji 0,010% Na wynosi 5,6 μm, po modyfikacji 0,020% Na wynosi 9,1 μm, natomiast po modyfikacji 0,015% strontem  $l_{max} = 7,9$  μm i po modyfikacji 0,060% strontem  $l_{max} = 9,5$  μm.

Uzyskane rezultaty pozwoliły na opracowanie wykresów ujmujących wpływ parametru strukturalnego  $l_{max}$  na  $R_m$ ,  $R_{0,2}$  i HB (rys. 3). Stwierdzono, że wzrostowi wartości parametru  $l_{max}$ , odpowiada zmniejszenie wartości analizowanych właściwości.

Wpływ wielkości wydzielen krzemu na właściwości mechaniczne wyjaśnić można podatnością tych wydzielen do tworzenia pęknięć krótkich. Pęknięcia zarodkują na największych wydzieleniach krzemu lub na granicy tych wydzielen z osnową, a następnie propagują poprzez osnowę do sąsiednich cząstek krzemu [8]. Uzyskane rezultaty potwierdzają sygnalizowany w literaturze kierunek wpływu parametru strukturalno  $l_{max}$  na analizowane właściwości użytkowe stopu Al7SiMg.

#### 4. PODSUMOWANIE

Najkorzystniejsze wartości  $R_m$ ,  $R_{0,2}$  i HB uzyskano dla stopu zawierającego 0,010% sodu lub 0,015% strontu. Wprowadzenie nadmiernej ilości sodu lub strontu wpłynęło na wzrost wartości parametru strukturalnego  $l_{max}$  wydzielen krzemu, co spowodowało obniżenie wartości  $R_m$ ,  $R_{0,2}$  i HB.



Rys. 3. Wpływ parametru  $l_{max}$  na  $R_m$ ,  $R_{0,2}$  i HB  
 Fig. 3. Effect of  $l_{max}$  silicon particles on UTS, YS and hardness

Szybkość chłodzenia stopu uzyskana w przypadku formy o temperaturze  $420^{\circ}\text{C}$  (najniższa stosowana temperatura formy) pozwoliła uzyskać najwyższe wartości analizowanych właściwości, zarówno w grupie stopu modyfikowanego sodem jak i w grupie stopu modyfikowanego strontem. Jest to związane z korzystnym wpływem wzrostu szybkości chłodzenia na obniżenie wartości parametru  $l_{max}$  wydzielen krzemu w eutektyce.

#### LITERATURA

- [1] Baresi J., Kerr M.J., Wang H., Couper M.J.: Effect of magnesium, iron, cooling rate on mechanical properties of Al-7-Si-Mg foundry alloys. AFS Transactions, 2000, vol. 117, 563-570.
- [2] Ravi M., Pillai U.T.S., Pai B.C., Damodaran A.D., Dwarakadasa E.S.: Mechanical properties of cast Al-7Si-0.3 Mg (LM 25/356). International Journal Cast Metals Res., 1998, 11, 113-125.
- [3] Tang S.K., Sriharan T.: Morphology of  $\beta$ -AlFeSi intermetallic in Al-7Si alloy castings. Materials Science and Technology, August 1998, vol. 14, 738-742.
- [4] Crepeau P.N.: Effect of iron in Al-Si casting alloys: a critical review. AFS Transactions, 1995, vol. 103, 361-366.

- [5] Brown P.E., Adams C.M.: Rapidly solidified alloy structures. AFS Transactions, vol. 69, 1961, 879-883.
- [6] Rantó V., Roósz A.: The effect of cooling rate and composition on the secondary dendrite arm spacing during solidification. Part I Al-Cu-Si alloy. International Journal Cast Metals Res., 2001, 13, 337-342.
- [7] Radhakrishna K., Seshan S., Seshandri M.R.: Dendrite arm spacing in aluminum alloy casting. AFS Transactions, 1980, vol. 88, 695-702.
- [8] Shivkumar S., Ricci Jr. S., Apelian D.: Influence of solution parameters and simplified supersaturating treatments on tensile properties of A356 alloy. AFS Transactions, 1990, vol. 180, 913-922.

*Pracę wykonano w ramach umowy U-6583/DS realizowanej w Politechnice Rzeszowskiej.*

#### **EFFECT OF MODIFICATION AND MOLD TEMPERATURE ON MECHANICAL PROPERTIES OF AlSi7Mg ALLOY**

##### **SUMMARY**

Results of the effect of modification with titanium (0.140%Ti), boron (0.002%B) and sodium (0.005%, 0.010%, 0.015%, 0.020%) or strontium (0.015%, 0.040%, 0.060%), as well as that of mold/die temperature (420<sup>0</sup>C, 450<sup>0</sup>C or 470<sup>0</sup>C) and heat treatment (solution heat treatment at 535<sup>0</sup>C/5h/water, aging at 175<sup>0</sup>C/5h/air) on mechanical properties of the AlSi7Mg alloy are presented. The highest values of R<sub>m</sub>, R<sub>0.2</sub> and HB were achieved for the alloy containing 0.010% of sodium or 0.015% of strontium, cast into dies having a temperature of 420<sup>0</sup>C, and then heat treated (solution heat treatment and aging).

Recenzował: Prof. Stanisław Rządkosz