

Optymalizacja zabiegów rozdrobnienia ziarna i modyfikacji eutektyki
w pod- i okołoeutektycznych stopach Al-Si

Optimization of grain refinement and modification of the eutectic in hypo-
and transeutectic Al-Si alloys

Krzysztof Saja¹

¹ Instytut Odlewnictwa, Zakład Stopów Metali Nieżelaznych, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

¹ Foundry Research Institute, Department of Non-Ferrous Alloys, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Poland

E-mail: krzysztof.saja@iod.krakow.pl

Received: 19.07.2016. Accepted in revised form: 31.12.2016.

© 2016 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/iod.2016.23

Streszczenie

Abstract

Zabiegi rozdrobnienia ziarna i modyfikacji eutektyki krzemowej w siluminach pod- i okołoeutektycznych należą do ważnych czynników kształtujących ich mikrostrukturę oraz właściwości fizyko-mechaniczne i technologiczne. Z uwagi na ten fakt w publikacji zostały podjęte zadania odpowiedniego, optymalnego doboru dodatków rozdrabniających α Al – roztwór stały oraz modyfikujących eutektykę krzemową (α Al + β Si), w zależności od stopnia eutektyczności układu Al-Si. Wytopy realizowane były w Zakładzie Stopów Metali Nieżelaznych Instytutu Odlewnictwa w Krakowie zgodnie z planem doświadczeń. Otrzymane wyniki badania właściwości mechanicznych (R_m , $R_{p0.2}$, A_5 , Z i HB) poddane zostały obróbce statystycznej. Wyniki te, na podstawie opracowanej interpretacji graficznej, pozwalają w łatwy sposób na właściwy dobór ilości rozdrabniacza (Ti5B1) i modyfikatora krzemu eutektycznego (AlSr10), w zależności od zawartości krzemu (w % wag.) w układzie Al-Si.

The procedures of grain refinement and modification of a silicon eutectic in hypo- and transeutectic silumins belong to important factors shaping their microstructure as well as physico-mechanical and technological properties. Due to this fact, the study attempts to address a proper, optimal, selection of refining additions α Al – a solid solution as well as additions modifying the silicon eutectic (α Al + β Si), depending on the eutecticity degree of the Al-Si system. The melts were realized at the Department of Non-Ferrous Metal Alloys of the Foundry Research Institute in Kraków, according to the experiment schedule. The obtained results of the examinations of the mechanical properties (R_m , $R_{p0.2}$, A_5 , Z and HB) underwent statistical treatment. The results, based on elaborate graphic interpretation, enable an easy selection of the amount of refiner (Ti5B1) and modifier of the eutectic silicon (AlSr10), depending on the silicon content (at wt. %) in the Al-Si system.

Słowa kluczowe: stopy Al-Si, rozdrobnienie ziarna, modyfikacja eutektyki, właściwości mechaniczne

Keywords: Al-Si alloys, grain refinement, eutectic modification, mechanical properties

1. Wprowadzenie

Stopy aluminium z krzemem, tzw. siluminy, należą do grupy materiałowej, do której często sięgają konstruktorzy zarówno ze względu na ich właściwości technologiczne, jak i mechaniczne. Znajdują one zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, np. motoryzacyjnego,

1. Introduction

Aluminium alloys with silicon – the so-called silumins – belong to a group of materials often used by constructors, owing to their technological and mechanical properties. They are applied in various branches of industry, e.g. the automotive, aircraft, precision mechanics and

lotniczego, precyzyjnego, a także elektromaszynowego w urządzeniach gospodarstwa domowego i innych. Stopy tej grupy charakteryzuje względnie mała gęstość, stosunkowo niska temperatura topnienia, dobre przewodnictwo cieplne i elektryczne; posiadają także relatywnie wysokie właściwości mechaniczne i odlewnicze (dobra lejność, akceptowalny skurcz odlewniczy), zdolność do obróbki ubytkowej i znaczną odporność na działanie korozyjne otoczenia.

Istotną wadą tych stopów jest skłonność do tworzenia gruboziarnistej mikrostruktury (dotyczy to przede wszystkim odlewów wykonywanych w formach piaskowych, ceramicznych i grubościennych odlewów kokilowych), która w niekorzystny sposób wpływa na właściwości mechaniczne odlewów [1,2].

Drobnoziarnistą mikrostrukturę stopów Al-Si uzyskuje się na drodze uszlachetniania przez dodanie do kąpieli metalowej rozdrabniaczy ziaren roztworu stałego α Al i modyfikatorów eutektyki krzemowej (α Al + β Si). Ilość wprowadzonych do kąpieli metalowej dodatków rozdrabniających ziarno czy modyfikujących jest stosunkowo niewielka, co przyczynia się do tego, że nie można traktować ich jako dodatków stopowych.

Proces modyfikacji, szczególnie podeutektycznych siluminów, stanowi jeden z ważniejszych czynników decydujących o mikrostrukturze, która wpływa w znacznym stopniu na poprawę właściwości mechanicznych wyrobu końcowego [1–6].

Innym ważnym aspektem, który ujawnia się podczas analizy obrazów metalograficznych podeutektycznych siluminów wraz ze wzrostem zawartości krzemu, jest spadek ilości fazy α Al oraz zwiększanie się ilości eutektyki (α Al + β Si), co ilustruje rysunek 1.

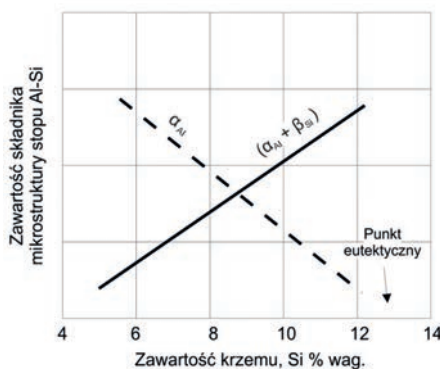
electromechanical industry, in household appliances and others. Alloys from this group are characterized by relatively low density and melting point, as well as good thermal and electrical conduction; they also exhibit relatively high mechanical and casting properties (good castability, acceptable casting contraction), the ability for subtractive manufacturing and a significant resistance to the corrosive operation of the environment.

An important disadvantage of these alloys is their tendency to form a coarse-grained microstructure (this mainly refers to casts made in sand and ceramic moulds as well as thick-walled gravity die casts), which negatively affects the mechanical properties of the casts [1,2].

The fine-grained microstructure of the Al-Si alloys is obtained by way of adding solid solution grain refiners α Al and silicon eutectic modifiers (α Al + β Si) into the metal bath. The amount of the grain-refining or modifying additions introduced into the metal bath is relatively small, and so, they cannot be treated as alloy additions.

The process of modification, especially of eutectic silumins, is one of the major factors determining the microstructure, which significantly improves the mechanical properties of the final product [1–6].

Another important aspect, which reveals itself during the analysis of the metallographic images of hypoeutectic silumins with the increase of the silicon content, is the drop of the amount of phase α Al and the increase of the amount of eutectic (α Al + β Si), which is illustrated by Figure 1.



Rys. 1. Zmiana struktury fazowej siluminów w zależności od zawartości krzemu [1]

Fig. 1. Change in the phase structure of silumins, depending on the silicon content [1]

Prezentowane powyżej wydzielenia faz składników mikrostruktury można poddawać procesowi modyfikacji, przy czym rozdrobnienie roztworu stałego α Al prowadzi się przez wprowadzenie takich pierwiastków, które tworzą z podstawowymi składnikami stopu Al układy typu perytektycznego lub eutektycznego. Warunki te spełniają następujące pierwiastki: Ti, Zr, V, B, Sc, Nb.

The phase precipitations of the microstructure components presented above can undergo a modification process, where the refinement of the solid solution α Al is conducted by way of introducing such elements which form peritectic or eutectic systems with the basic components of the Al alloy. These conditions are fulfilled by the following elements: Ti, Zr, V, B, Sc, Nb. Some

Skutecznymi modyfikatorami eutektyki ($\alpha\text{Al} + \beta\text{Si}$), dającymi jej postać uszlachetnioną, są: sód, potas, beryl, stront i wapń [1,3]. Nierzadko wymiennie są tu też Sb [3] czy Bi, chociaż niektórzy uważają, że bizmut ogranicza efekt modyfikacji strontem i borem w siluminach [7].

Analizując literaturę, można znaleźć dużą liczbę modyfikatorów stosowanych do stopów aluminium, jednakże ich skład w większości przypadków ogranicza się do modyfikacji wybranej fazy i nie uwzględnia zawartości krzemu w stopie.

Prace nad tym zagadnieniem stanowiły podstawę do opracowania planu doświadczenia, który by w sposób klarowny weryfikował wpływ poszczególnych dodatków rozdrabniających roztwór stały i modyfikujących eutektykę, a także pozwalał uzyskiwać optymalne właściwości stopu końcowego.

2. Plan doświadczeń

Celem pracy było kompleksowe zbadanie jednoczesnego oddziaływania takich grup pierwiastków na podstawie właściwości mechanicznych (wytrzymałości i plastyczności).

Podstawę badań optymalnego doboru dodatków modyfikujących oparto na planie badań eksperymentalnych. W badaniach zastosowano plan doświadczeń drugiego rzędu (na sześćianie), kompozycyjny, o trzech poziomach badanych czynników (tab. 1) [8]. Skład chemiczny próbek odlewanych, podanych w tabeli 1, określono na spektrometrze emisyjnym typu GDS 850A (LECO).

effective modifiers of eutectic ($\alpha\text{Al} + \beta\text{Si}$), which provide its refined form, are: sodium, potassium, beryllium and calcium [1,3]. Often, they are also substituted by Sb [3] or Bi, though some claim that bismuth limits the effect of modification with strontium and boron in silumins [7].

In the analysis of the literature, one can find a large amount of modifiers used for aluminium alloys; however, their composition, in most cases, comes down to the modification of a selected phase and does not consider the silicon content in the alloy.

The studies of this issue constituted the basis for the elaboration of the experiment schedule, which clearly verified the effect of the particular additions refining the solid solution and modifying the eutectic, and this made it possible to obtain the optimal properties of the final alloy.

2. Experiment schedule

The aim of the research was a complex examination of the simultaneous effect of such a group of elements on the basis of the mechanical properties (strength and plasticity).

The basis for the tests aiming at the optimal selection of the modifying additions was the schedule of the experimental studies. In the research, a compositional experiment schedule of the second order (with a cube) was applied, with three levels of the examined components (Tab. 1) [8]. The chemical composition of the cast samples given in Table 1 was determined by means of the emission spectrometer GDS 850A (LECO).

Tabela 1. Plan doświadczeń

Table 1. Experiment schedule

Nr próbki / Sample no.	Oznaczenie badanych czynników wejściowych w wartościach kodowanych / Denotation of examined input factors in coded values			Zakładane wartości badanych czynników wejściowych w wartościach rzeczywistych, % wag. / Assumed values of examined input factors in actual values, wt. %			Oznaczenie badanych czynników wejściowych na podstawie analizy spektrometrycznej, % wag. / Denotation of examined input factors based on a spectrometric analysis, wt. %		
	X ₁	X ₂	X ₃	Si	Ti	Sr	Si	Ti	Sr
1.	1	-1	-1	11,0	0,05	0,01	11,5	0,05	0,010
2.	-1	-1	+1	5,0	0,05	0,07	5,6	0,04	0,070
3.	-1	+1	-1	5,0	0,25	0,01	5,5	0,33	0,010
4.	+1	+1	+1	11,0	0,25	0,07	11,5	0,57	0,090
5.	0	0	-1	8,0	0,15	0,01	7,5	0,21	0,010
6.	0	0	+1	8,0	0,15	0,07	9,0	0,17	0,070
7.	0	-1	0	8,0	0,05	0,04	8,5	0,04	0,030
8.	0	+1	0	8,0	0,25	0,04	8,7	0,31	0,035
9.	-1	0	0	5,0	0,15	0,04	5,4	0,18	0,050
10.	+1	0	0	11,0	0,15	0,04	11,9	0,16	0,030
11.	0	0	0	8,0	0,15	0,04	8,4	0,18	0,040

Badanymi czynnikami wejściowymi były zawartości: X1 (Si), X2 (Ti), X3 (Sr). Wielkości wyjściowe to: R_m (Y1), $R_{p0,2}$ (Y2), HBW (Y3), A_5 (Y4), Z (Y5).

Przedmiot badań stanowił w zasadzie podwójny stop materiałów wsadowych układu Al-Si niezawierający w swoim składzie takich dodatków stopowych, jak miedź czy magnez. Skład chemiczny został przedstawiony w tabeli 2. Różne zawartości krzemu w stopie uzyskiwano poprzez dodatek zaprawy aluminium-krzem lub rozcieńczanie stopu bazowego aluminium.

The examined input factors were the following values: X1 (Si), X2 (Ti), X3 (Sr). The output values are: R_m (Y1), $R_{p0,2}$ (Y2), HBW (Y3), A_5 (Y4), Z (Y5).

The test subject was basically constituted by a binary alloy of the charge materials from the Al-Si system, which did not contain such alloy additions as copper or magnesium. The chemical composition is presented in Table 2. The different silicon contents were obtained with the addition of an aluminium-silicon master alloy or by way of diluting the base aluminium alloy.

Tabela 2. Skład chemiczny doświadczalnego stopu poddawanego zabiegom rozdrobnienia i modyfikacji ziarna, % wag.

Table 2. Chemical composition of the experimental alloy exposed to refining and grain modification, wt. %

Oznaczenie stopu / Alloy denotation	Si	Cu	Mg	Mn	Fe	Ni	Zn	Ti	Sr	Al
Stop specjalny / Special alloy	6,98	0,001	0,001	0,002	0,11	0,004	0,005	0,006	0,0007	reszta/ residue

3. Stanowisko pomiarowe

Przeprowadzenie opisanych badań wymagało wykonania specjalnego stanowiska do przeprowadzenia wytopów zgodnie z przyjętym wcześniej planem eksperymentów. Stanowisko to składało się z: pieca topielnego, piaskowych form odlewniczych, kokil odlewniczych, rejestratora temperatury oraz oprzyrządowania pomocniczego. Ogólny widok tego stanowiska przedstawiony został na rysunku 2.

3. Measuring station

The realization of the described tests required the construction of a dedicated station for melts according to the assumed experiment schedule. The station consisted of: a melting furnace, sand casting moulds, gravity dies, a temperature recorder and supplementary equipment. A general view of the station is presented in Figure 2.



Rys. 2. Ogólny widok stanowiska do badań modyfikacji podeutektycznych stopów aluminium

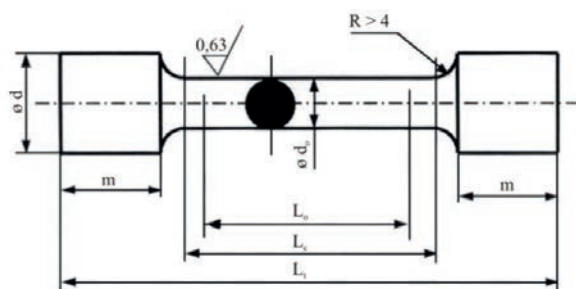
Fig. 2. General view of the test station for hypoeutectic aluminum alloys modification

Jako rozdrabniacz ziaren α Al użyto zapraw typu ALEASTER Ti5B1, natomiast do modyfikacji eutektyki użyto zaprawy typu LSM Sr10. Na bazie deklarowanych przez producentów składów chemicznych oraz wprowadzonej korekty po wytopach wstępnych (szczególnie duże odchyłki wykazywała zaprawa Ti5B1) przeprowadzono numeryczne obliczenia namiaru wsadu przy wykorzystaniu autorskiego programu. Działania takie przyczyniły się do uzyskania przyjętych składów chemicznych pierwiastków, które przedstawiono w tabeli 1.

The ALEASTER Ti5B1 master alloys were used as the grain refiner α Al, whereas for the eutectic modification, the LSM Sr10 master alloy was applied. Based on the chemical components declared by the producers and the introduced correction after the initial melts (the Ti5B1 master alloy exhibited especially high deviations), numerical calculations of the charge burden were conducted with the use of an original program designed by the authors. Such operations contributed to obtaining the assumed chemical element components, which are shown in Table 1.

4. Badanie właściwości mechanicznych

Badania właściwości mechanicznych prowadzone były w akredytowanym Zespole Laboratoriów Badawczych Instytutu Odlewnictwa. Próba wytrzymałości wykonana była na maszynie wytrzymałościowej typu Instron 8800M. Badania twardości zostały przeprowadzone (wg Brinella) na twardościomierzu Alpha-Sundbyberg. Do badań wytrzymałościowych posłużyły próbki (rys. 3) uzyskane po przeprowadzeniu obróbki ubytkowej stożka o średnicy 22 mm. W tabeli 3 przedstawiono wszystkie uzyskane wyniki.



Nr próbki / Sample no.	5
d_0 [mm]	10
d [mm]	12
m [mm]	40
L_0 [mm]	50
L_c [mm]	60
L_t [mm]	150

Rys. 3. Próbkę wytrzymałościowe wykonane na drodze obróbki ubytkowej obróbki wałka o średnicy $\varnothing 22$ mm (wg PN-EN 10002-1 AC-1)

Fig. 3. Strength samples made by way of subtractive manufacturing of a $\varnothing 22$ mm diameter cone (according to PN-EN 10002-1 AC-1)

Efekty modyfikacji (tab. 3) oceniane były na podstawie przeprowadzonej analizy graficznej otrzymanych wyników badania właściwości mechanicznych z poszczególnych wytopów, przy różnych zawartościach krzemu w stopie oraz różnym dodatku modyfikatorów, jakimi były zaprawa Ti5B1 (modyfikator fazy (α Al)) oraz Sr (modyfikator eutektyki (α Al + β Si)). Wyniki te przedstawiono na rysunkach 4–6.

Na podstawie rysunku 4 należy stwierdzić, że zmiany zawartości krzemu w stopie mają znaczny wpływ na badane właściwości mechaniczne. Wzrost jego zawartości wpływa pozytywnie na podwyższenie twardości (HB), natomiast można zaobserwować w dość znacznym stopniu tendencję spadku wytrzymałości na rozciąganie (R_m). Ponadto widoczny jest niewielki wpływ na umowną granicę plastyczności ($R_{p0,2}$) oraz ewidentny wpływ na obniżenie wydłużenia (A_5) i przewężenia (Z).

Analizując modyfikator ziarna w postaci zaprawy Ti5B1 w stopach pod- i okołoeutektycznych (rys. 5), można zauważyć, że wraz ze wzrostem zawartości w stopie zaprawy modyfikującej następuje korzystny jej wpływ na podwyższenie wytrzymałości na rozciąganie (R_m) i umownej granicy plastyczności ($R_{p0,2}$). Na podstawie map rozkładu dodatków modyfikujących i krzemu można zaobserwować dominujący wpływ krzemu na parametry reprezentujące właściwości plastyczne stopu, takie jak wydłużenie (A_5) i przewężenie (Z) oraz twardość stopu HBW.

4. Examination of mechanical properties

The examinations of the mechanical properties were performed in the accredited Team Research Laboratories of the Foundry Research Institute. The strength tests were conducted by means of the Instron 8800M testing machine. The hardness measurements were performed (according to Brinell) on the Alpha-Sundbyberg hardness tester. For the strength tests, samples were used (Fig. 3) which were obtained after the performing of a subtractive manufacturing process on the cone, with an average diameter of 22 mm. Table 3 shows all the obtained results.

The effects of the modification (Tab. 3) were evaluated based on the graphic analysis of the results of the examination of the mechanical properties of particular melts, with different silicon contents in the alloy and different modifier additions, i.e. the Ti5B1 master alloy (modifier of phase (α Al)) and Sr (modifier of eutectic (α Al + β Si)). These results are presented in Figures 4–6.

On the basis of Figure 4, one can state that the changes in the silicon content in the alloy have a significant effect on the examined mechanical properties. An increase of its content positively affects the increase of hardness (HB), whereas one can observe a significant tendency for a drop of the tensile strength (R_m). Also, one can see a slight effect on the yield strength ($R_{p0,2}$) as well as an evident effect in the form of reduced elongation (A_5) and contraction (Z).

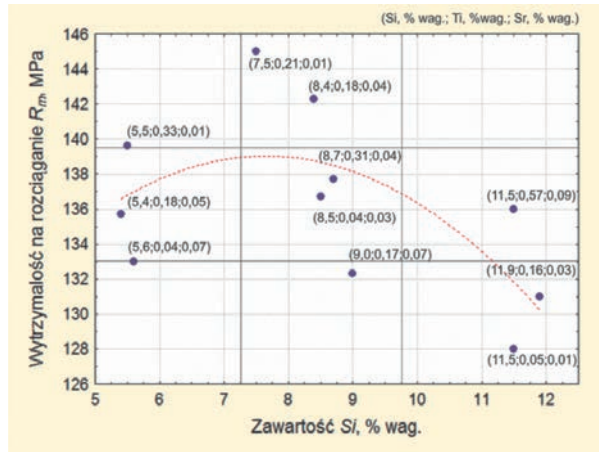
In the analysis of the grain modifier in the form of the Ti5B1 master alloy in hypo- and transeutectic alloys (Fig. 5), one can notice that with the increase of the modifier content in the alloy, we can observe an advantageous effect on the increase of the tensile strength (R_m) and the yield strength ($R_{p0,2}$). Based on the distribution maps of the modifying additions and silicon, we can observe a dominant effect of silicon on the parameters representing the plastic properties of the alloy, such as elongation (A_5) and contraction (Z), as well as hardness HBW of the alloy.

Tabela 3. Zestawienie wyników badań

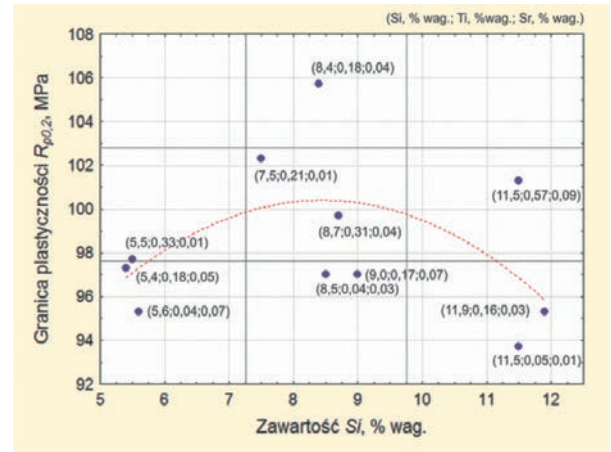
Table 3. Compilation of test results

Nr/No.	Oznaczenie badanych czynników wejściowych w wartościach kodowanych / Denotation of examined input factors in coded values			Właściwości mechaniczne / Mechanical properties									
	Si (X1)	Ti (X2)	Sr (X3)	R _{p0,2} , MPa		R _m , MPa		A ₅ , %		Z, %		HB, HBW 5/125	
1.	(+)1	(-)1	(-)1	95	93,7	128	128,0	3,6	3,33	4,3	3,90	48,4	50,2
				95		127		2,6		3,5		51,7	
				91		129		3,8		*23,2		50,5	
2.	(-)1	(-)1	(+)1	94	95,3	132	133,0	18,0	17,90	19,9	20,33	41,7	41,8
				97		131		18,1		20,2		39,8	
				95		136		17,6		20,9		43,9	
3.	(-)1	(+)1	(-)1	93	97,7	135	139,3	*12,6	19,15	*11,6	21,35	41,6	44,3
				98		144		21,2		23,5		47,3	
				102		139		17,1		19,2		44,1	
4.	(+)1	(+)1	(+)1	100	101,3	133	136,0	4,4	4,53	3,6	4,70	53,5	50,6
				103		137		4,5		6,2		47,7	
				101		138		4,7		4,3		50,5	
5.	(0)1	(0)1	(-)1	104	102,3	145	145,0	10,2	9,47	10,4	10,70	45,3	46,4
				103		145		10,2		11,6		45,9	
				100		145		8,0		10,1		48,0	
6.	(0)1	(0)1	(+)1	99	97,0	134	132,3	9,8	8,27	9,0	8,33	46,1	45,0
				97		129		6,8		9,3		44,9	
				95		134		8,2		6,7		43,9	
7.	(0)1	(-)1	(0)1	90	97,0	132	136,7	9,1	10,63	10,4	10,97	43,5	42,9
				99		140		11,0		13,6		44,1	
				102		138		11,8		8,9		41,1	
8.	(0)1	(+)1	(0)1	105	99,7	140	137,7	8,7	8,13	9,0	8,10	44,2	46,8
				100		138		7,9		8,2		46,9	
				94		135		7,8		7,1		49,4	
9.	(-)1	(0)1	(0)1	94	97,3	135	135,7	19,2	19,60	*1,6	23,20	41,1	41,8
				101		135		19,2		24,4		39,8	
				97		137		20,4		22,0		44,6	
10.	(+)1	(0)1	(0)1	95	95,3	133	131,0	3,2	3,60	3,2	3,57	47,1	49,0
				97		134		4,7		3,6		51,7	
				94		126		2,9		3,9		48,3	
11.	(0)1	(0)1	(0)1	102	105,7	142	142,3	10,1	9,47	11,0	15,70	45,5	46,6
				108		142		9,0		15,8		47,3	
				107		143		9,3		20,3		47,0	

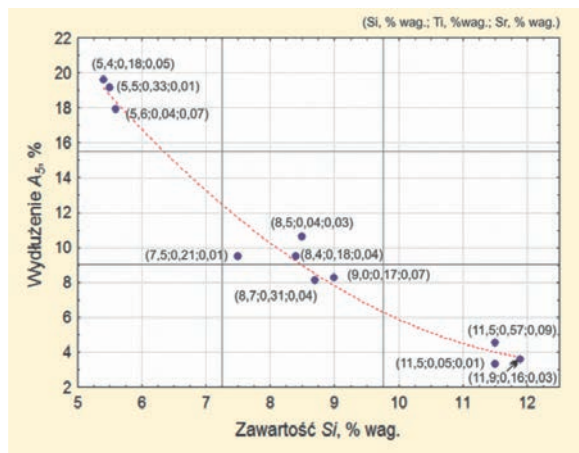
Uwaga: * Wynik uznany jako błędny lub o wątpliwym znaczeniu (mocno odbiegający od pozostałych uzyskanych wartości) /
Note: * A result recognized as an error or of a doubtful significance (strongly deviating from the remaining values)



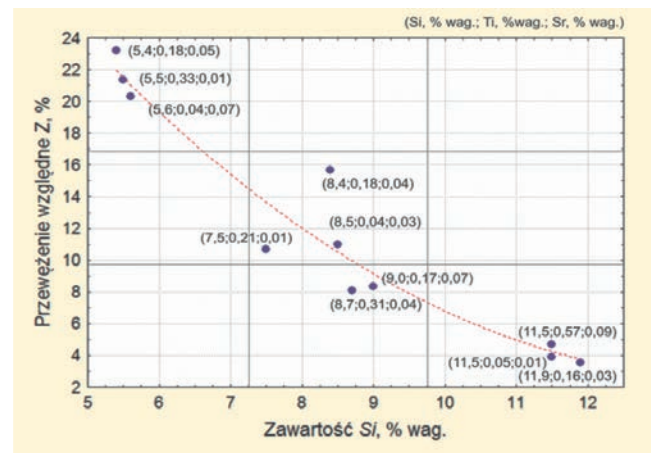
a)



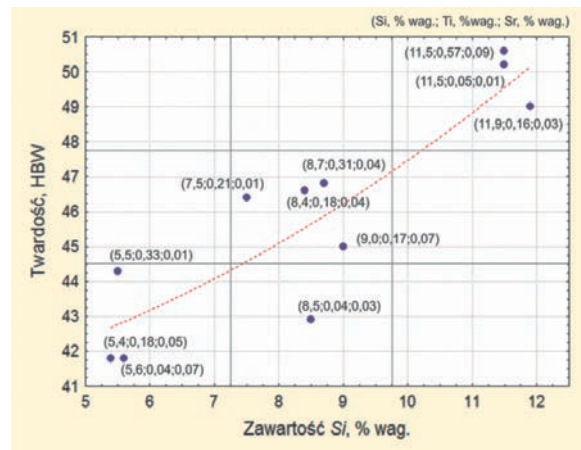
b)



c)

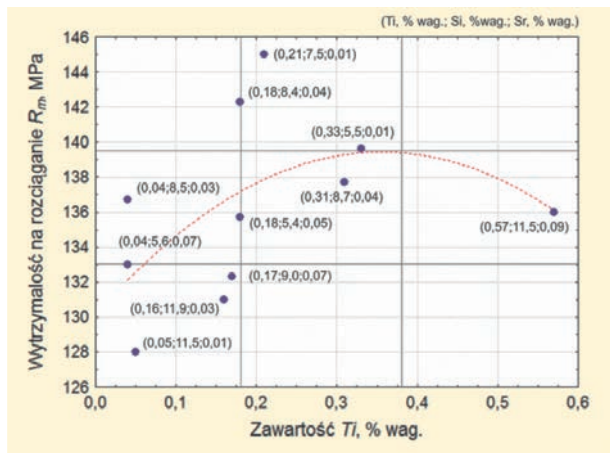


d)

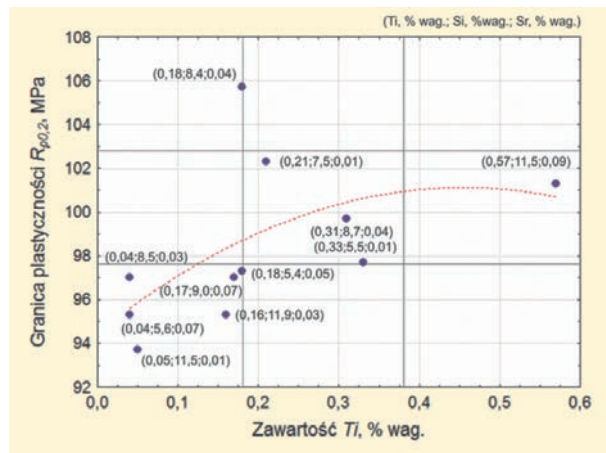


e)

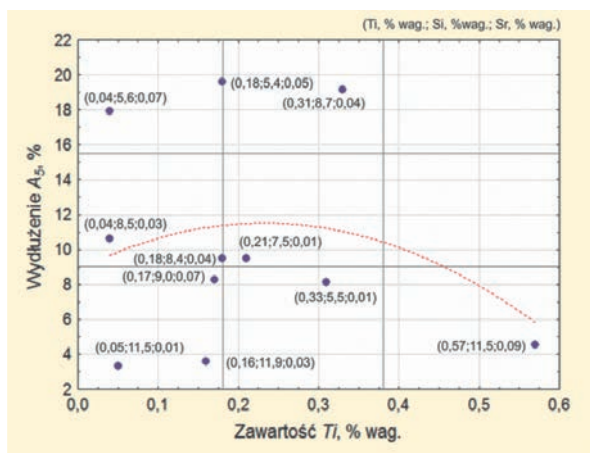
Rys. 4. Wpływ zawartości krzemu na: a) R_m , b) $R_{p0.2}$, c) A_5 , d) Z , e) HB
Fig. 4. Effect of silicon content on: a) R_m , b) $R_{p0.2}$, c) A_5 , d) Z , e) HB



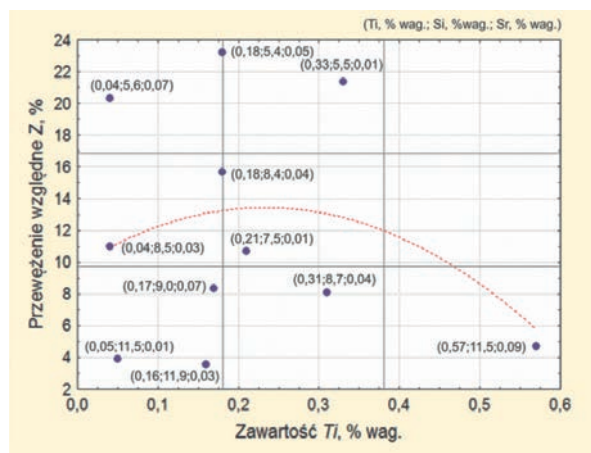
a)



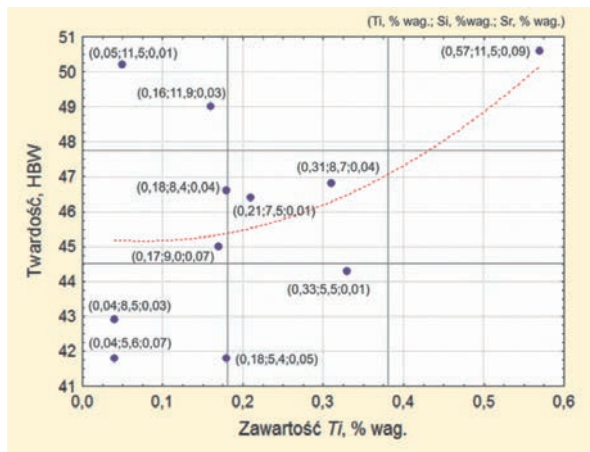
b)



c)

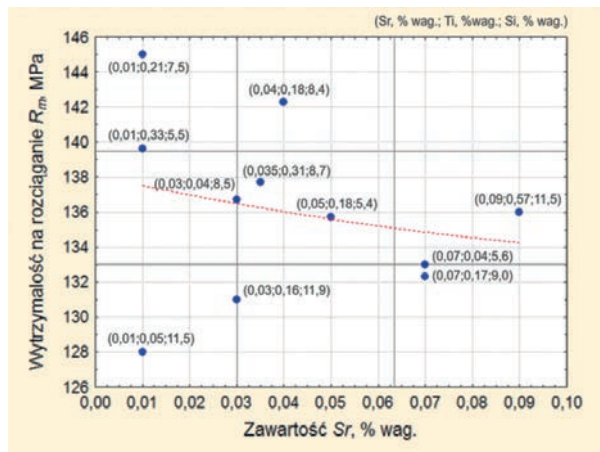


d)

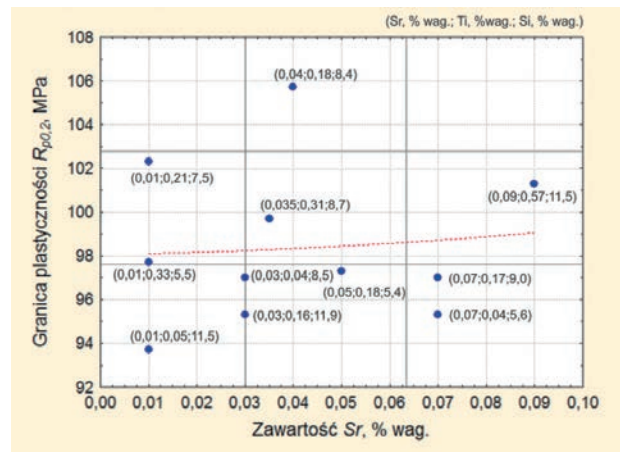


e)

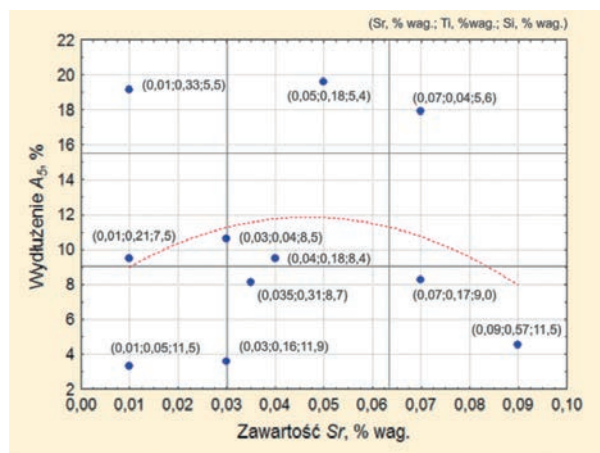
Rys. 5. Wpływ zawartości tytanu na: a) R_m , b) $R_{p0.2}$, c) A_5 , d) Z, e) HB
 Fig. 5. Effect of titanium content on: a) R_m , b) $R_{p0.2}$, c) A_5 , d) Z, e) HB



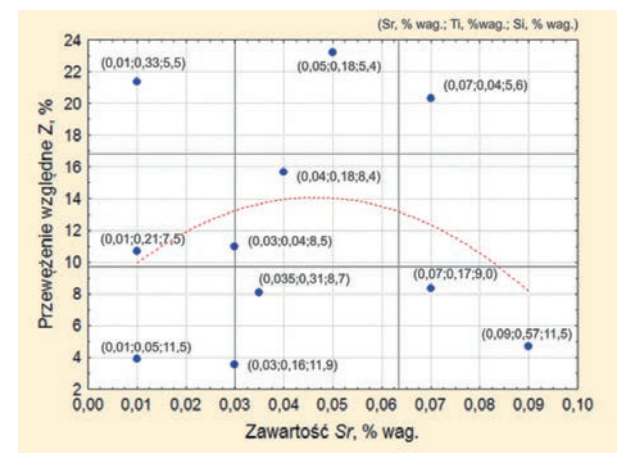
a)



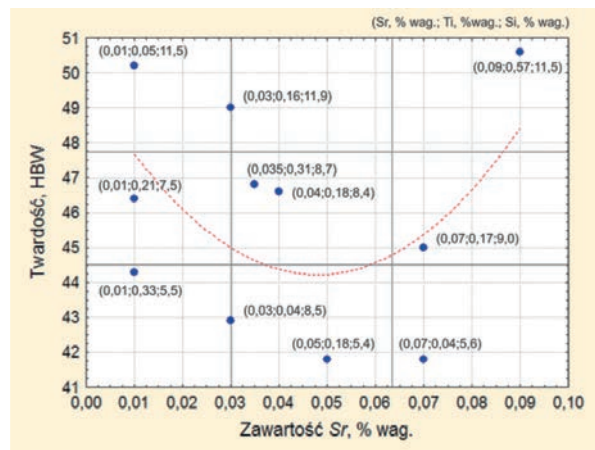
b)



c)



d)



e)

Rys. 6. Wpływ zawartości strontu na: a) R_m , b) $R_{p0.2}$, c) A_5 , d) Z , e) HB
 Fig. 6. Effect on strontium content on: a) R_m , b) $R_{p0.2}$, c) A_5 , d) Z , e) HB

Zmiany zawartości strontu w stopie (rys. 6) nie wpływają w sposób znaczący na parametry wytrzymałościowe (R_m , $R_{p0.2}$), natomiast sprzyjają wzrostowi plastyczności, co odbywa się kosztem spadku twardości HB. Także w przypadku analizy wykresów wpływu strontu należy brać pod uwagę zawartość krzemu w stopie.

The changes in the strontium content in the alloy (Fig. 6) do not have a significant effect on the strength parameters (R_m , $R_{p0.2}$), while they favour the increase of plasticity, which occurs at the expense of a drop of hardness HB. Also in the analysis of the diagrams of the strontium effect, one should consider the silicon content in the alloy.

5. Badania mikrostruktury

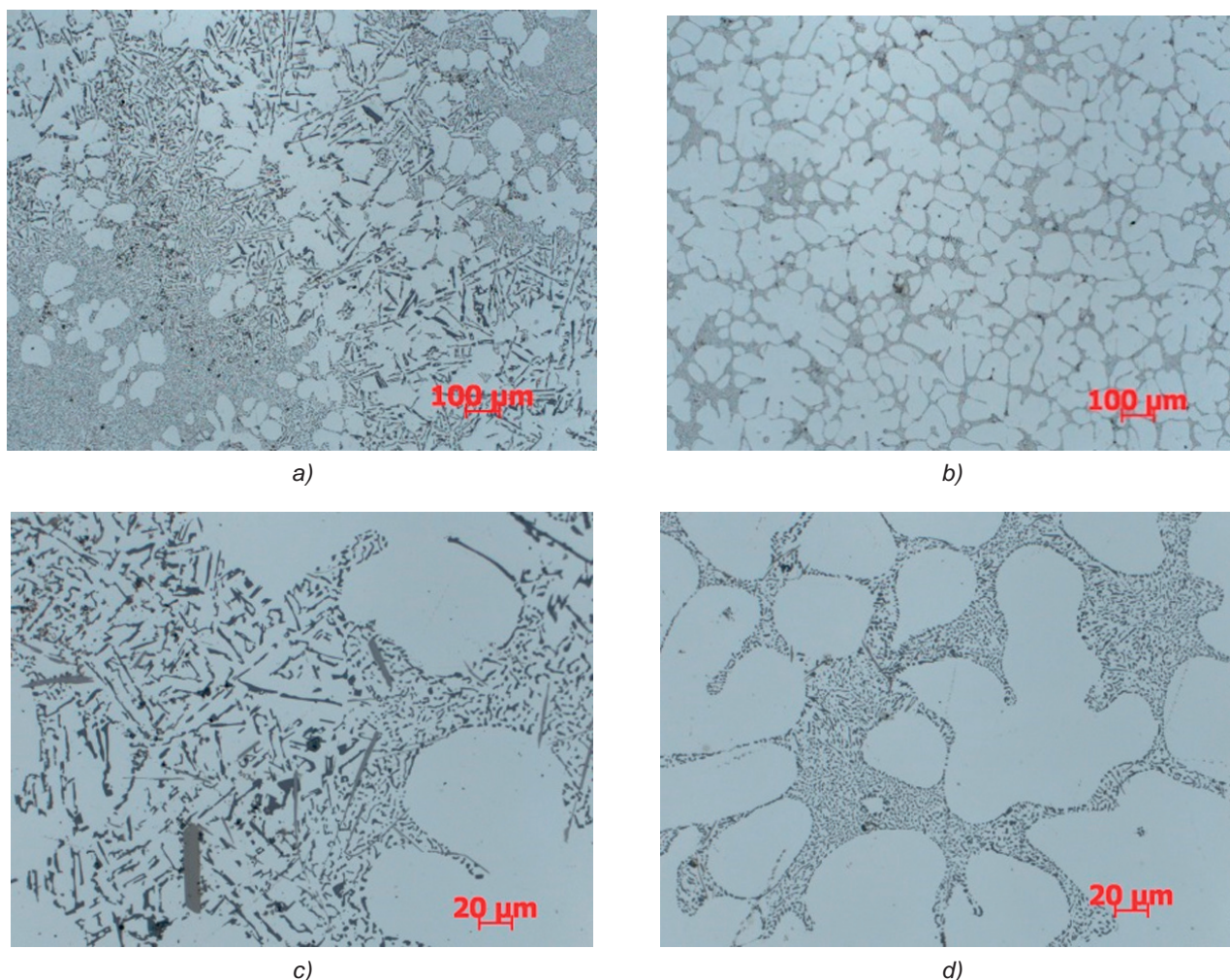
Obserwacje mikrostruktury wybranych próbek o numerze 4 i 9 (wg planu doświadczeń) wykonano za pomocą mikroskopu A X10 OBSERVER Z1m. Badania mikrostruktury dokonano przy powiększeniach 100 \times , 500 \times na zglądach nietrawionych.

W badanych mikrostrukturach zaobserwowano w próbce numer 4 zbyt małą skuteczność modyfikacji. Można więc wnioskować, iż w tym przypadku ilości dodatków modyfikujących lub ich wzajemna interakcja na badany stop były na zbyt niskim poziomie i nie zapewniały pełnej modyfikacji wykonanych odlewów wałków o średnicy 22 mm. Natomiast w próbce nr 9 (wg planu eksperymentu) struktura miała charakter zmodyfikowanej w sposób prawidłowy. Wyniki badań wyselekcjonowanych próbek przy różnym powiększeniu zostały przedstawione na [rysunku 7](#).

5. Microstructure examinations

The observations of the microstructure of the selected samples, i.e. no. 4 and 9, according to the experiment schedule, were performed by means of the A X10 OBSERVER Z1m microscope. The microstructure examinations were conducted with magnifications 100 \times and 500 \times , on non-etched microsections.

In the tested microstructures, in sample no. 4, insufficient effectiveness of the modification was observed. And so, we can infer that, in this case, the amount of the modifying additions or their interaction had too little effect on the examined alloy and they did not ensure full modification of the 22 mm diameter roll casts. In turn, in sample no. 9, according to the experiment schedule, the structure was modified in the appropriate manner. The test results of the selected samples with different magnifications have been presented in [Figure 7](#).



Rys. 7. Mikrostruktury wybranych próbek ($\varnothing 22$, forma piaskowa): a) próbka nr 4, pow. 100 \times , b) próbka nr 9, pow. 100 \times , c) próbka nr 4, pow. 500 \times , d) próbka nr 9, pow. 500 \times

Fig. 7. Microstructures of selected samples ($\varnothing 22$, sand mould): a) sample no. 4, magn. 100 \times , b) sample no. 9, magn. 100 \times , c) sample no. 4, magn. 500 \times , d) sample no. 9, magn. 500 \times

6. Wnioski

W wyniku przeprowadzonego wstępnego eksperymentu można stwierdzić, że:

1. Wzrost zawartości krzemu w stopie wpływa pozytywnie na HB, natomiast obniża właściwości mechaniczne (R_m) i plastyczne (A_5) i Z.
2. Zawartość tytanu w stopie pod- i okołoeutektycznym sprzyja wzrostowi parametrów wytrzymałościowych (R_m , $R_{p0.2}$), natomiast nieznacznie obniża plastyczność.
3. Stront ogólnie nie wpływa w sposób znaczący na parametry wytrzymałościowe (R_m , $R_{p0.2}$), natomiast sprzyja wzrostowi plastyczności, co odbywa się kosztem spadku twardości HB.
4. Otrzymane wyniki wskazują na występowanie złożonego układu zależności matematycznych, które będą przedmiotem dalszych opracowań i publikacji.

Podziękowania

Artykuł powstał na podstawie badań przeprowadzonych w projekcie statutowym w 2014 r. pt.: „Wieloskładnikowe modyfikatory do podeutektycznych siluminów” (zlec. nr 4002/00).

Literatura/References

1. Praca zbiorowa. 2014. *Sprawozdanie z projektu statutowego za rok 2014 pt. „Wieloskładnikowe modyfikatory do podeutektycznych siluminów”*. Kraków: Instytut Odlewnictwa.
2. Pezda J. 2014. „Wpływ wybranych parametrów obróbki cieplnej na jakość technologiczną części maszyn odlewanych z siluminów”. *Rozprawy Naukowe* nr 51. Bielsko-Biała: Wydawnictwo Naukowe ATH.
3. Wasilewski P. 1993. *Krzepnięcie metali i stopów. Siluminy – modyfikacja i jej wpływ na strukturę i właściwości*. Katowice, Bielsko-Biała, Częstochowa, Opole: PAN.
4. Czekaj E. 2011. *Beznikłowe siluminy tłokowe o podwyższonej stabilności wymiarowej*. Kraków: Instytut Odlewnictwa.
5. Poniewierski Z. 1966. *Modyfikacja siluminów*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
6. Saja K., A. Białobrzęski. 2012. Continuous sodium modification of nearly-eutectic aluminium alloys W *Machines, Technologies, Materials: IX International Congress 2012: Proceedings*, http://mech-ing.com/journal/Archive/2012/12/89_Saja.
7. Romankiewicz F. 2002. „Wpływ bizmutu na modyfikację stopu AlSi7 strontem i borem”. *Archiwum Odlewnictwa* 2 (4) : 434–439.
8. *Tablitsy planov eksperimenta dlya faktornykh i polinomialnykh modeley*. 1982. Spravochnoye izdanie pod red. B.B. Nalimova. Moskva: Izdatelstvo „Metallurgiya”.

6. Conclusions

As a result of the preliminary experiment, we can conclude that:

1. An increase of the silicon content in the alloy positively affects HB, while lowering the mechanical properties (R_m) and plastic properties (A_5) as well as Z.
2. The titanium content in a hypo- and transeutectic alloy favours an increase of strength parameters (R_m , $R_{p0.2}$), while slightly lowering plasticity.
3. Strontium has basically no significant effect on the strength parameters (R_m , $R_{p0.2}$), whereas it favours a plasticity increase, which takes place at the expense of a drop of hardness HB.
4. The obtained results point to the existence of a complex system of mathematical relations, which will be the subject of further elaborations and publications.

Acknowledgements

The article has been created based on the research performed within the statutory project in 2014, entitled: “Multi-component modifiers for hypoeutectic silumins” (project no. 4002/00).

