

**Ocena wpływu wybranych parametrów odlewania ciśnieniowego na strukturę  
siluminu AlSi9Cu3**

**Evaluation of selected parameters of pressure casting on the structure of silumin  
AlSi9Cu3**

*Łukasz Pałyga<sup>1</sup>, Mateusz Stachowicz<sup>1</sup>, Kazimierz Granat<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Politechnika Wrocławska, Katedra Odlewnictwa, Tworzyw Sztucznych i Automatyki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 25,  
50-370 Wrocław

<sup>1</sup>Wroclaw University of Technology, Department of Foundry Engineering, Plastics and Automation,  
ul. Smoluchowskiego 25, 50-372 Wrocław, Poland

E-mail: [mateusz.stachowicz@pwr.edu.pl](mailto:mateusz.stachowicz@pwr.edu.pl)

Received: 02.09.2015. Accepted in revised form: 31.03.2016.

© 2016 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/iod.2016.04

**Streszczenie**

*W artykule zaprezentowano wyniki badań wpływu wybranych parametrów odlewania na strukturę odlewów, wykonanych pod wysokim ciśnieniem na maszynie odlewniczej firmy BÜHLER typ H630-B, ze stopu AlSi9Cu3 z grupy EN AB-46000 przy zmiennych parametrach pracy tłoka. Badania przeprowadzono na odpowiednio przygotowanych próbkach pobranych z odlewów wspornika oparcia foteli. Do oceny struktury odlewów zastosowano skaningowy mikroskop elektronowy, którego oprogramowanie EDS pozwala na określenie składu stopu wraz z uwzględnieniem rozmieszczenia pierwiastków oraz przeprowadzono pomiary twardości odlewów i mikrotwardości składników struktury. Po przeprowadzeniu serii badań dokonano oceny struktury na zglądach metalograficznych próbek odlewów wykonanych przy zmiennych parametrach zalewania, w trakcie II i III fazy odlewania ciśnieniowego. Stwierdzono, że przy małych prędkościach tłoka krystalizują większe wydzielenia charakteryzujące się bardzo dużą twardością. Zwiększanie prędkości tłoka powoduje rozdrobnienie struktury wyrobu, jednakże zmniejszenie ciśnienia intensyfikacji III fazy wpływa na spadek twardości odlewu.*

*Słowa kluczowe:* odlewnictwo ciśnieniowe, struktura, silumin, mikrotwardość, SEM

**Summary**

*The article presents the results of investigations of the effect of selected casting parameters on the structure of casts made under high pressure by means of the casting machine produced by BÜHLER, type H630-B, out of the AlSi9Cu3 alloy from the EN AB-46000 group, with varying parameters of the piston operation. The investigations were performed on appropriately prepared specimen sampled from casts of an armchair back bracket. For the evaluation of the cast structure a scanning electron microscope was used, whose EDS software allows for determining the composition of the alloy with the consideration of the distribution of the elements. Also, measurements of the cast hardness and the structure component microhardness were performed. After a series of tests, evaluation of the structure of the microsections of the samples of casts made with varying casting parameters, during phase II and III of the pressure casting process, was performed. It was established that, at low piston rates, larger precipitations crystallize, which were characterized by very high hardness. Increasing the piston rate causes refinement of the product structure; however, decreasing the pressure of intensification of phase III leads to a drop of the cast hardness.*

*Keywords:* pressure casting, structure, silumin, microhardness, SEM

## 1. Wprowadzenie

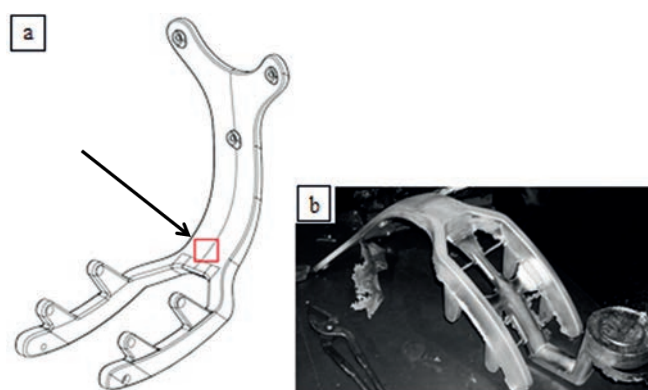
Odlewnictwo wysokociśnieniowe (ang. *High-Pressure Die Casting*), jako jedna z najdynamiczniej rozwijających się gałęzi przemysłu odlewniczego, zajmuje się wytwarzaniem elementów maszyn i urządzeń zarówno tych wykorzystywanych powszechnie, jak i tych wyspospecjalistycznych [1]. Najbardziej rozpowszechnione maszyny do odlewania ciśnieniowego wyposażone są w zimną, poziomą komorę, do której dostarczany jest ciekły stop w sposób manualny lub zautomatyzowany. Standardowymi materiałami dla tej metody wytwarzania są stopy aluminium, a w szczególności siluminy, o szerokim spektrum zawartości krzemu. Wykładnikiem wysokiej oceny jakościowej wytworzonych wg tej metody odlewów jest bez wątpienia trójfazowy proces zalewania wnętrza formy. Etap I charakteryzuje się wolnym suwem tłoka, który ma za zadanie wypełnić przestrzeń kokili. W następnym etapie występuje impulsywne przyspieszenie tłoka, w celu wyeliminowania jak największej ilości gazów w formie. Finalny etap wyróżnia się radykalnym wzrostem ciśnienia, mającym na celu doprasowanie metalu we wnęce kokili. O ile pierwsza z faz ma znaczenie względnie marginalne dla parametrów odlewu wykonanego w ten sposób, o tyle dwie kolejne mają fundamentalny wpływ na jakość otrzymanego wyrobu.

W poniższym artykule podjęto próbę oceny wpływu wybranych parametrów odlewania ciśnieniowego na strukturę wyrobu pokazanego na rysunku 1.

## 1. Introduction

High pressure die casting, as one of the most dynamically developing branches of the casting industry, deals with the production of elements of machines and devices, both those commonly used and the highly specialized ones [1]. The most popularized pressure casting machines are equipped with a cold horizontal chamber, to which hot alloy is supplied in the manual or automated manner. The standard materials for this production method are aluminium alloys, especially silumins, of a wide spectrum of silicon content. The exponent of a high qualitative assessment of the casts produced with this method is undoubtedly the three-phase process of pouring the material into the mould cavity. Stage I characterizes in a slow piston stroke, whose task is to fill the space of the gravity die. The following stage involves an impulsive acceleration of the piston, with the purpose to eliminate as much gas from the mould as possible. The final stage characterizes a radical increase of pressure, aiming at ultimate moulding of the metal in the gravity die. While the first phase is of marginal importance for the parameters of the thus produced cast, the two following ones have a fundamental effect on the quality of the obtained product.

This article attempts at evaluating the effect of the selected pressure casting parameters on the structure of the product shown in Figure 1.



Rys. 1. Rysunek odlewu: a) miejsce pobrania próbki do badań, b) widok odlewu wraz z układem wlewowym  
Fig. 1. Drawing of a cast: a) area of test specimen sampling, b) view of the cast with the gating system

Wspornik oparcia fotela biurowego wykonano, z typowego dla tego rodzaju elementów stopu AlSi9Cu3, na zmodernizowanej maszynie odlewniczej BÜHLER H-630B. Modernizacja polegała na wymianie dotychczas stosowanego systemu sterowania na nowszej generacji sterownik PLC [2,3], realizujący proces aktywacji parametrów zalewania, takich m.in. jak: prędkość tłoka podczas procesu oraz ciśnienie intensyfikacji (multiplikacji). Odlewanie, z różnymi nastawami poszczególnych zaworów odpowiedzialnych za proces zalewania ciśnieniowego, może mieć wpływ na jakość produkowanych

The bracket of an office armchair back was made of the AlSi9Cu3 alloy, typical for this type of element, by means of the modernized casting machine BÜHLER H-630B. The modernization consisted in replacing the control system applied so far by a newer generation PLC controller [2,3], implementing the process of activation of such casting parameters as: piston rate during the process and pressure of intensification (multiplication). The casting process, with different setpoints of the particular valves responsible for the pressure casting process, can affect the quality of the manufactured products, and

wyrobów, a analiza struktury i rozmieszczenia występowania wad może znacząco podnieść konkurencyjność i opłacalność produkcji.

## 2. Metoda badań i wyniki

Po pobraniu ciekłego metalu z głównego pieca topialnego do kadzi transportowej, każdorazowo przeprowadzano 10-minutowy proces rafinacji azotem [4,5]. Stabilizowana w czasie cyklu badań temperatura stopu wynosiła od 720°C do 740°C. W celu zapewnienia najwyższej jakości odlewom dokonano również pomiaru indeksu gęstości stopu, który powinien w stanie stałym i w temperaturze otoczenia zawierać się w przedziale 2,5–2,8 g/cm<sup>3</sup>. Po realizacji zestawionego w tabeli 1 planu badań indeks ten mieścił się w wymaganym zakresie.

Spośród serii wykonanych odlewów wybrano cztery, oznaczone jako: A, B, C, D, które charakteryzowały się zróżnicowanymi parametrami zalewania (tabela 1) i zróżnicowaną jakością.

Tabela 1. Zestawienie wartości ustawień zaworów II i III fazy oraz zmierzonych dla nich wartości prędkości tłoka i ciśnienia intensyfikacji

Table 1. Compilation of the values of valve setpoints of phase II and III and the measured values of piston rates and intensification pressure

Oznaczenie odlewu / Cast denotation	Wartość otwarcia zaworu II fazy, % / Value of valve opening of phase II, %	Prędkość tłoka, m/s / Piston rate, m/s	Wartość otwarcia zaworu III fazy, % / Value of valve opening of phase III, %	Ciśnienie intensyfikacji, bar / Intensification pressure, bar
A	10	0,30	80	345
B	20	0,75	80	345
C	60	1,20	50	290
D	80	2,30	20	245

Próbki do badań metalograficznych i analizy składu chemicznego pobrano z wybranego obszaru surowych odlewów (rys. 1a) i docinano na wymiar 30 mm × 15 mm × 10 mm, które preparowano za pomocą standardowych materiałów szlifujących: papierami wodnymi o granulacji od 150 do 4000. Następnie polerowano z wykorzystaniem tarcz i płynnych środków chłodząco-smarujących sporządzonych na bazie krzemionki koloidalnej. Po procesie polerowania próbek obserwowano je w stanie nietrawionym (rys. 2).

Pierwszym etapem badań była ocena powierzchni zglądu pod kątem widocznych wad odlewniczych i wykonanie, za pomocą mikroskopu świetlnego (przy powiększeniu do 500×) zdjęć makrostruktury próbek pobranych z odlewów A, B, C i D (rys. 2), na których pokazano m.in. miejsca występowania wad wewnętrznych.

Na podstawie rysunku 2 stwierdzono, że dwie pierwsze próbki (tj. A i B) charakteryzują się znaczną ilością wad odlewniczych w postaci porowatości. Zaobser-

the analysis of the structure and distribution of defects can significantly raise the competitiveness and cost-effectiveness of production.

## 2. Method and test results

After sampling the liquid metal from the central melting furnace for the transporting ladle, each time, a one minute process of nitrogen refinement was performed [4,5]. The temperature stabilized during the cycle equaled from 720°C to 740°C. In order to assure the highest possible quality of the casts, a measurement of the alloy density index was performed: the latter, in solid state and at ambient temperature, should be in the range of 2.5–2.8 g/cm<sup>3</sup>. After the implementation of the test schedule included in Table 1, the index was within the required range.

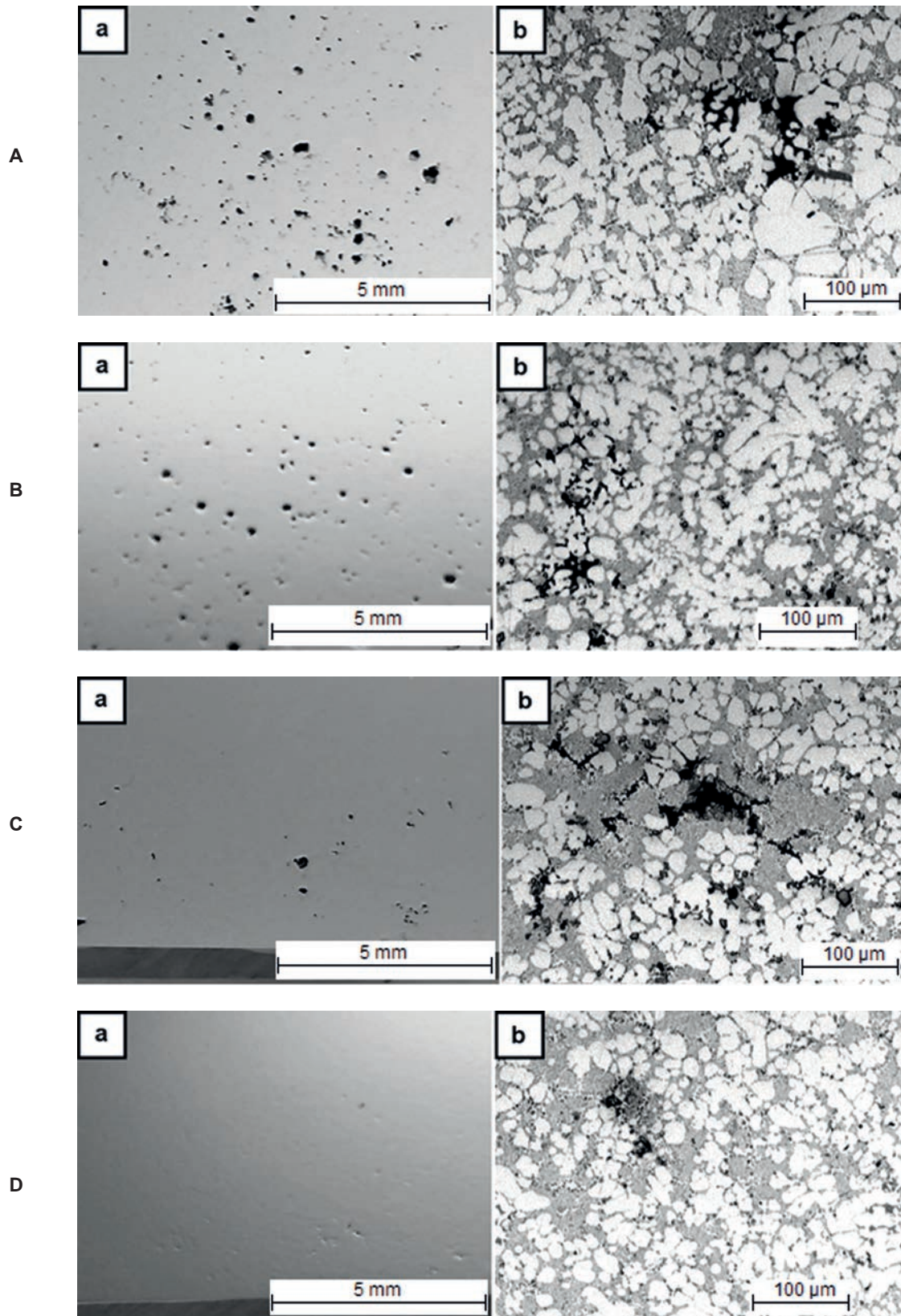
From among the series of the produced casts, four were selected, denoted as: A, B, C, D, which characterized diversified casting parameters (Table 1) and quality.

The specimen for the metallographic tests and chemical composition analysis were sampled and sized to 30 mm × 15 mm × 10 mm from the selected area of raw casts (Fig. 1a), which were prepared with the use of standard grinding materials: water papers, granulation from 150 to 4000. Next, they were polished by means of discs and liquid cooling and lubricating agents made with a colloidal silica base. After the process of polishing, they underwent observation in the non-etched state (Fig. 2).

The first stage of the tests consisted in evaluating the surface of the microsections in respect of casting defects and making images of the macrostructure of the specimen sampled from casts A, B, C and D (Fig. 2), with the use of a light microscope (magnification up to 500×), which show the areas of internal defects.

Based on Figure 2, it was established that the first two samples (i.e. A and B) characterize a significant number of casting defects in the form of porosity. This





Rys. 2. Widoki próbek odlewów A, B, C, i D: a) zdjęcie powierzchni, b) makrostruktura, nietrawione  
Fig. 2. View of samples of casts A, B, C and D: a) photograph of the surface, b) macrostructure, non-etched

wowano to na zdjęciach powierzchni próbek (rys. 2Aa i rys. 2Ba) oraz w makrostrukturach (rys. 2Ab i rys. 2Bb). Kolejna próbka, C, uwidacznia mniejszą skłonność do powstawania zagazowań (rys. 2Ca i 2Cb). Ostatnia próbka wyróżnia się śladowymi ilościami mikroporowatości, jak i na powierzchni, tak i w makrostrukturze (rys. 2Da i rys. 2Db).

Na rysunku 3 pokazano zdjęcia mikrostruktury odlewów ze wskazaniem wydzieleni oraz wad odlewniczych. Próbka pobrana z odlewu A pochodziła z miejsca, w którego sąsiedztwie znajdowała się rozległa jama skurczowa. Ze względu na obecność jamy skurczowej odlew można uznać za wadliwy. Jak wynika z analizy zdjęć przedstawionych na rysunkach 2 i 3, w strukturze odlewu A (przykład A) dostrzeżono typową wadę odlewów ciśnieniowych, w postaci mikroporowatości [7]. W tym przypadku na tle roztworu  $\alpha$  i eutektyki  $\alpha + \text{Si}$  (rys. 3A) nie występują charakterystyczne gruboziarniste wydzielenia fazy zidentyfikowanej jako  $\text{AlSiFeMn}$  [6]. Zauważono je dopiero przy powiększeniu 500 $\times$  (rys. 3Ab). Za pomocą mikrotwardościomierza firmy INNOVATEST model 412D [8] określono mikrotwardość tego typu wydzieleni z następującymi parametrami: obciążenie – 1,96 N, czas nacisku – 10 s. Mikrotwardość, typowych w odlewie A, wydzieleni fazy  $\text{AlSiFeMn}$  wynosiła 560 HV.

W strukturze odlewu B (rys. 3Ba i 3Bb), wykonanego ze zwiększoną w stosunku do odlewu A prędkością tłoka równą 0,75 m/s i jednakowym ciśnieniem intensyfikacji wynoszącym 345 barów, stwierdzono mikroporowatość na granicy ziaren na zdjęciu wykonanym z powiększeniem 500 $\times$  w otoczeniu fazy  $\text{AlSiFeMn}$  (rys. 3Bb). W odróżnieniu od poprzedniego odlewu charakterystyczne wydzielenia twardej fazy  $\text{AlSiFeMn}$  były dobrze widoczne już przy powiększeniu 200 $\times$  (rys. 3Ba).

W przypadku odlewu C (rys. 2C oraz 3C), wykonanego z typowymi dla tego typu elementów wyposażenia biurowego parametrami zalewania (prędkość tłoka 1,2 m/s i obniżone ciśnienie intensyfikacji 290 barów), w jego strukturze zauważono zmniejszoną, w stosunku do odlewu B, ilość niezgodności odlewniczych w postaci porowatości. Ponadto struktura charakteryzowała się większym rozdrobnieniem ziaren roztworu  $\alpha$  i wydzieleni eutektyki  $\alpha + \text{Si}$ . Zauważono również zwiększoną ilość występowania rozdrobnionej fazy  $\text{AlSiFeMn}$  (rys. 3Cb).

Analizując powierzchnię próbki z odlewu D (rys. 2D i 3D), wytworzonego ze zwiększonymi, w stosunku do pozostałych odlewów, parametrami nastawy zaworu prędkości tłoka – 2,3 m/s i minimalnym ciśnieniu intensyfikacji wynoszącym 245 barów, nie stwierdzono wad odlewniczych. Stwierdzono natomiast sporadycznie występujące, drobnoziarniste wydzielenia fazy  $\text{AlSiFeMn}$ , które dostrzeżono przy powiększeniu 500 $\times$  (rys. 3Db).

Kolejnym etapem badań nad wpływem parametrów zalewania na strukturę odlewanych elementów była analiza składu chemicznego próbek metalograficznych,

was observed in the photographs of the sample surface (Fig. 2Aa and 2Ba) and in the macrostructures (Fig. 2Ab and 2Bb). The consecutive sample, C, exhibits a lower tendency for gassiness (Fig. 2Ca and 2Cb). The last sample is distinguished by trace amounts of microporosity, both on the surface and in the macrostructure (Fig. 2Da and 2Db).

Figure 3 shows photographs of the microstructure of the casts, exhibiting the precipitations and the casting defects. The specimen sampled from cast A came from the area adjoining an extensive contraction cavity. Due to the presence of the contraction cavity, the cast can be treated as defective. According to the analysis of the photographs presented in Figures 2 and 3, in the structure of cast A (example A), a typical defect of pressure casts was spotted, in the form of microporosity [7]. In this case, on the background of solution  $\alpha$  and eutectic  $\alpha + \text{Si}$  (Fig. 3A), no characteristic coarse-grained precipitations of the phase identified as  $\text{AlSiFeMn}$  are present [6]. The latter were observed only with the magnification of 500 $\times$  (Fig. 3Ab). By means of the microhardness tester by INNOVATEST, model 412D [8], the microhardness of this type of precipitations was determined, with the following parameters: load – 1.96 N, pressure time – 10 s. The microhardness of the precipitations of phase  $\text{AlSiFeMn}$ , typical of cast A, equaled 560 HV.

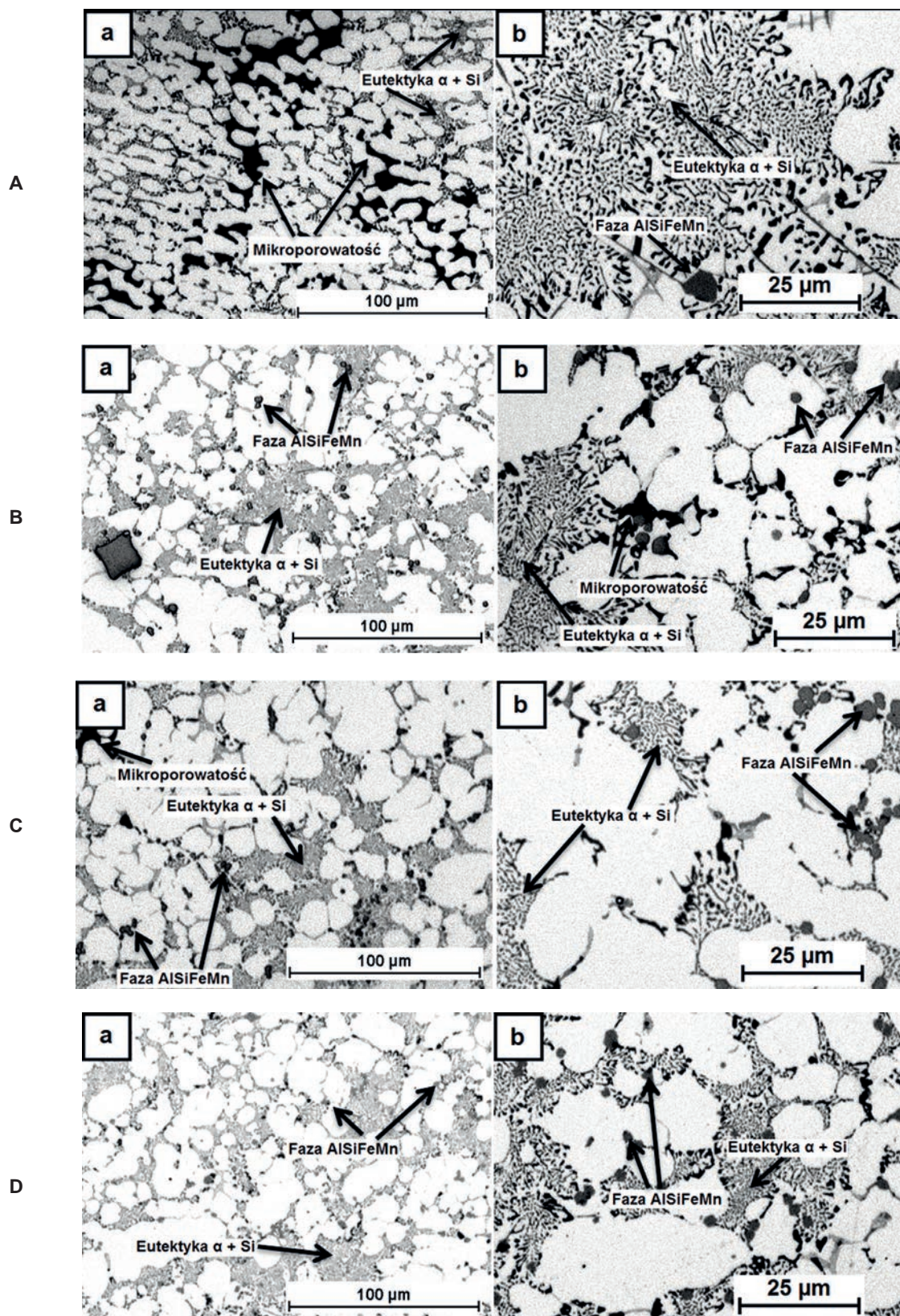
In the structure of cast B (Fig. 3Ba and 3Bb), made at a higher piston rate than that in the case of cast A, equaling 0.75 m/s, and under a similar intensification pressure equaling 345 bars, microporosity was observed at the grain boundary in the photograph taken with the magnification of 500 $\times$ , surrounded by phase  $\text{AlSiFeMn}$  (Fig. 3Bb). Contrary to the previous cast, the precipitations characteristic to the hard  $\text{AlSiFeMn}$  phase were visible already with the magnification of 200 $\times$  (Fig. 3Ba).

In the case of cast C (Fig. 2C and 3C), made with the casting parameters typical for this type of office equipment elements (piston rate 1.2 m/s, lowered intensification pressure 290 bars), a smaller amount of casting defects in the form of porosity was observed as compared to cast B. What is more, the structure characterized in a higher grain refinement of solution  $\alpha$  and precipitations of eutectic  $\alpha + \text{Si}$ . Also, an increased amount refined  $\text{AlSiFeMn}$  phase was observed (Fig. 3Cb).

In the analysis of the surface of the specimen from cast D (Fig. 2D and 3D), made with higher parameters of the valve setpoint of the piston rate – 2.3 m/s, as compared to the remaining casts, and under the minimal intensification pressure equaling 245 bars, no casting defects were identified, whereas sporadic fine-grained precipitations of phase  $\text{AlSiFeMn}$  were observed with the magnification of 500 $\times$  (Fig. 3Db).

The following stage of the studies on the effect of the casting parameters on the structure of the cast elements was analyzing the chemical composition of the metallographic samples, which complements the discussion on the presence of phases and precipitations in the





Rys. 3. Zdjęcia z mikroskopu świetlnego próbek odlewów A, B, C i D: a) pow. 200 $\times$ , b) pow. 500 $\times$ ; nietrawione  
Fig. 3. Light microscope images of samples of casts A, B, C and D: a) magnification 200 $\times$ , b) magnification 500 $\times$ ;  
non-etched



która uzupełnia dyskusję nad występowaniem faz i wzdzieleń w strukturze badanych odlewów wykonywanych ze zmiennymi parametrami zalewania. Widok powierzchni oraz ocenę ilościową składu stopu wykonano za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) marki HITACHI model TM-3000 [9].

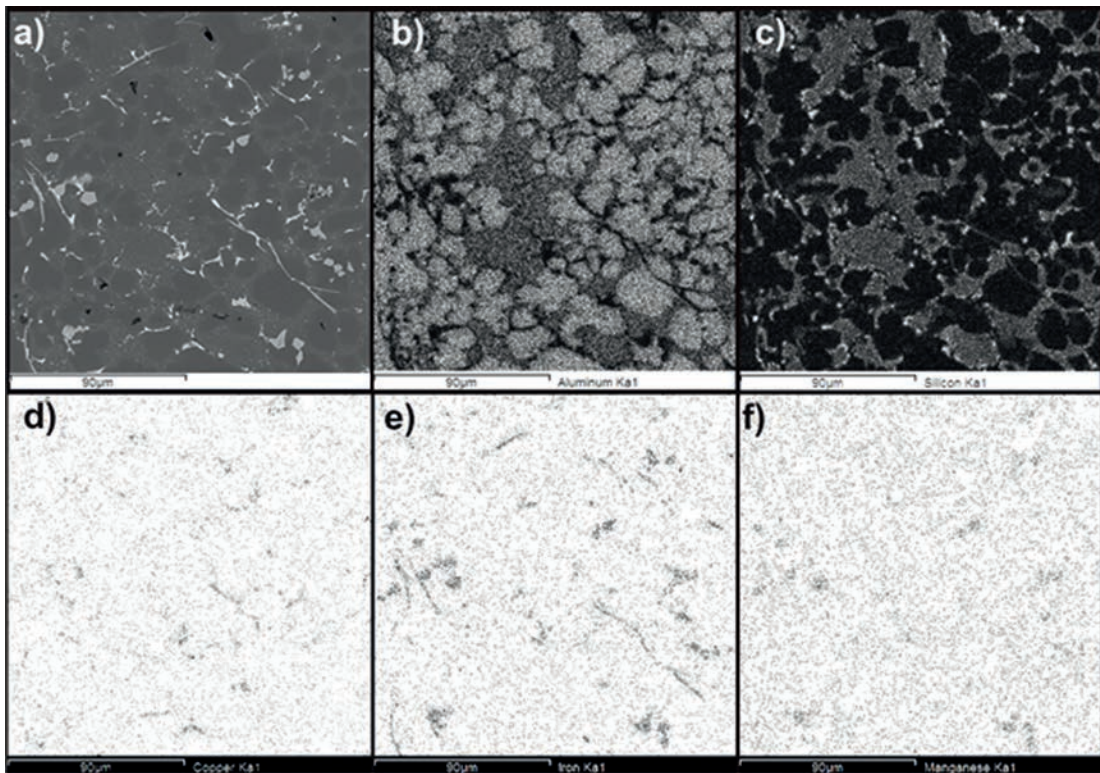
Na [rysunku 3](#) zestawiono analizę rozmieszczenia najważniejszych pierwiastków w próbce pobranej z odlewu A.

Analizując [rysunek 4](#), stwierdzono, że dyslokacja aluminium jest relatywnie równomierna, natomiast zauważono segregację pierwiastków, których stężenia pokazano na zdjęciach z analizy zawartości: krzemu ([rys. 4c](#)), miedzi ([rys. 4d](#)) oraz żelaza ([rys. 4e](#)). Na zdjęciach widoczne są obszary znacznego stężenia i segregacji dodatków stopowych, co może mieć dalszy, negatywny wpływ na właściwości mechaniczne [10], a w szczególności na wytrzymałość [11] i twardość [12] materiału odlewu. W przypadku analizy występowania związków Fe stwierdzono występowanie warkoczy przecinających ziarna tworzące strukturę stopu ([rys. 4e](#)).

structure of the investigated casts made with varying casting parameters. The image of the surface and the quantitative analysis of the alloy composition were provided by the scanning electron microscope (SEM) by HITACHI, model TM-3000 [9].

[Figure 3](#) presents the analysis of the distribution of the most important elements in the specimen sampled from cast A.

In the analysis of [Figure 4](#), it was established that the dislocation of aluminium is relatively uniform, whereas segregation was observed of the elements whose concentrations are shown in the images from the composition analysis: silicon ([Fig. 4c](#)), copper ([Fig. 4d](#)) and iron ([Fig. 4e](#)). In the photographs, it is possible to see areas of a significant concentration and segregation of alloy additions, which can have a further negative effect on the mechanical properties [10], especially strength [11] and hardness [12], of the cast material. In the analysis of the Fe compounds, the presence of tails intersecting the grains forming the alloy structure was established ([Fig. 4e](#)).

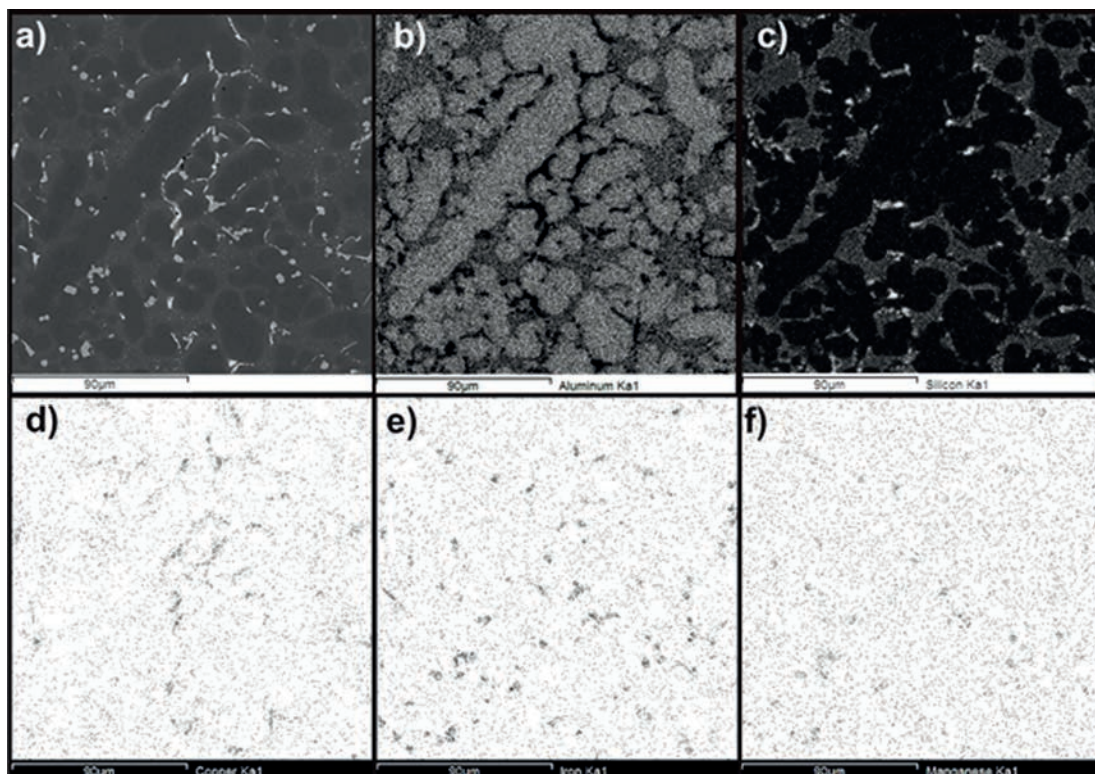


Rys. 4. Analiza rozmieszczenia najważniejszych pierwiastków w próbce stopu pobranej z odlewu A: a) widok z SEM struktury, powiększenie 1000× oraz rozmieszczenie: b) Al, c) Si, d) Cu, e) Fe, f) Mn

Fig. 4. Analysis of the distribution of the most important elements in the sample of cast A: a) SEM image of the structure, magnification 1000× and the distribution: b) Al, c) Si, d) Cu, e) Fe, f) Mn

Następnie wykonano analogiczną analizę rozmieszczenia najważniejszych pierwiastków w próbce stopu pobranej z odlewu B, którą zestawiono na [rysunku 5](#).

Next, an analogical analysis was performed of the distribution of the most important elements in the specimen sampled from cast B, which is presented in [Figure 5](#).



Rys. 5. Analiza rozmieszczenia najważniejszych pierwiastków w próbce stopu pobranej z odlewu B: a) widok z SEM struktury, powiększenie 1000× oraz rozmieszczenie: b) Al, c) Si, d) Cu, e) Fe, f) Mn

Fig. 5. Analysis of the distribution of the most important elements in the sample of cast B: a) SEM image of the structure, magnification 1000× and the distribution: b) Al, c) Si, d) Cu, e) Fe, f) Mn

Po obserwacji [rysunku 5](#) stwierdzono, podobnie jak przy analizie składu odlewu A, że rozłożenie aluminium w odlewie B jest stosunkowo homogeniczne, a braki w jego strukturze zostały wypełnione przez nierównomiernie rozłożone związki krzemu. Stwierdzono występowanie rozległych miejsc stężeń związków miedzi oraz żelaza, wokół których powstały liczne nieciągłości w materiale odlewu. Zauważono również mniejsze skupiska związków manganu ([rys. 5f](#)) w porównaniu do poprzedniego odlewu ([rys. 4f](#)).

Położenie najważniejszych pierwiastków na zglądzie próbki pobranej z odlewu C pokazano na [rysunku 6](#), natomiast dla próbki z odlewu D na [rysunku 7](#). W przypadku analizowanego odlewu C, poza widocznym, charakterystycznym wydzieleniem wskazującym na związek międzymetaliczny FeMn ([rys. 6e](#) i [6f](#)), struktura odlewu C była jednorodna. Zauważono obszary o mniejszym stężeniu krzemu w eutektyce  $\alpha + \text{Si}$  oraz miedzi ([rys. 6d](#)).

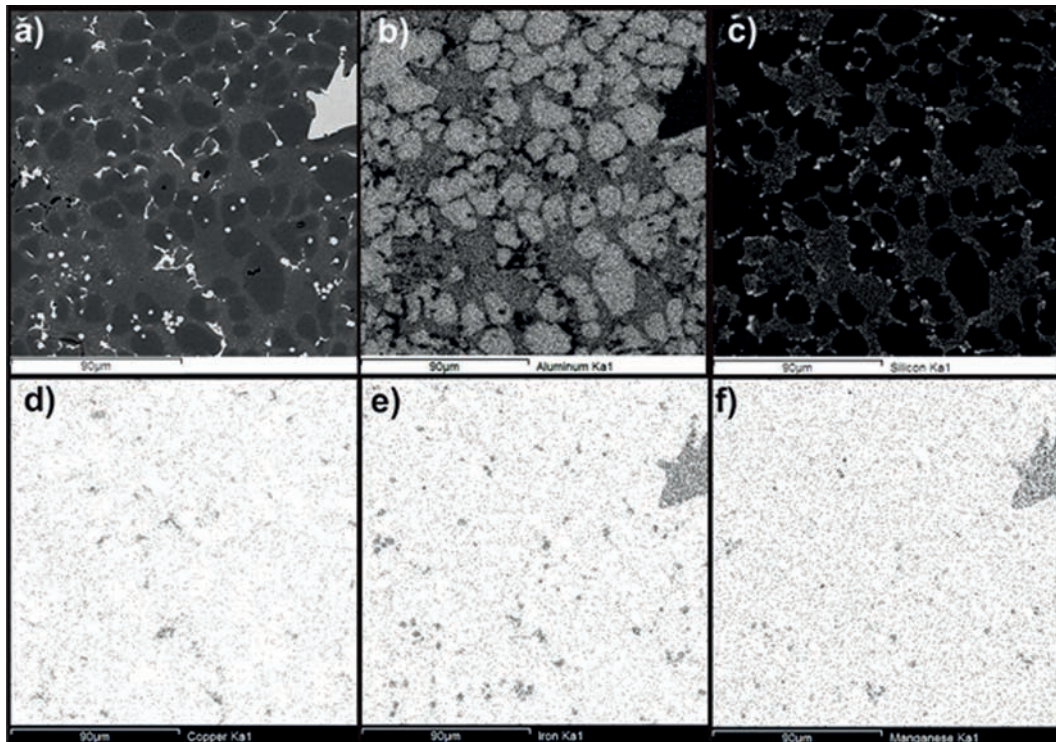
Na podstawie analizy składu chemicznego odlewu D ze zwiększonymi parametrami zalewania stwierdzono występowanie miejsc stężenia krzemu spychanego na granicę ziaren drobnoziarnistej struktury stopu. Nie stwierdzono występowania wyraźnych miejsc o dużym stężeniu związków: żelaza, miedzi oraz manganu, co może wpływać na poprawę parametrów wytrzymałościowych i wyrównywać twardość stopu w całej jego objętości.

After the analysis of [Figure 5](#), it was established that, similarly to the composition of cast A, the aluminium distribution in cast B is relatively homogeneous, and the faults in its structure have been filled with non-uniformly distributed silicon compounds. Also, the presence of large areas of copper and iron compound concentrations was established, around which numerous discontinuities in the cast material had been formed. Smaller agglomerations of manganese compounds were also noticed ([Fig. 5f](#)) as compared with the previous cast ([Fig. 4f](#)).

The location of the most important elements in the microsections of the sample of cast C are shown in [Figure 6](#), whereas, for the sample of cast D – in [Figure 7](#). In the case of the analyzed cast C, beside the visible characteristic precipitation pointing to the intermetallic compound FeMn ([Fig. 6e](#) and [6f](#)), the structure of cast C was homogenous. Areas of a lower silicon concentration were noticed in eutectic  $\alpha + \text{Si}$  and copper ([Fig. 6d](#)).

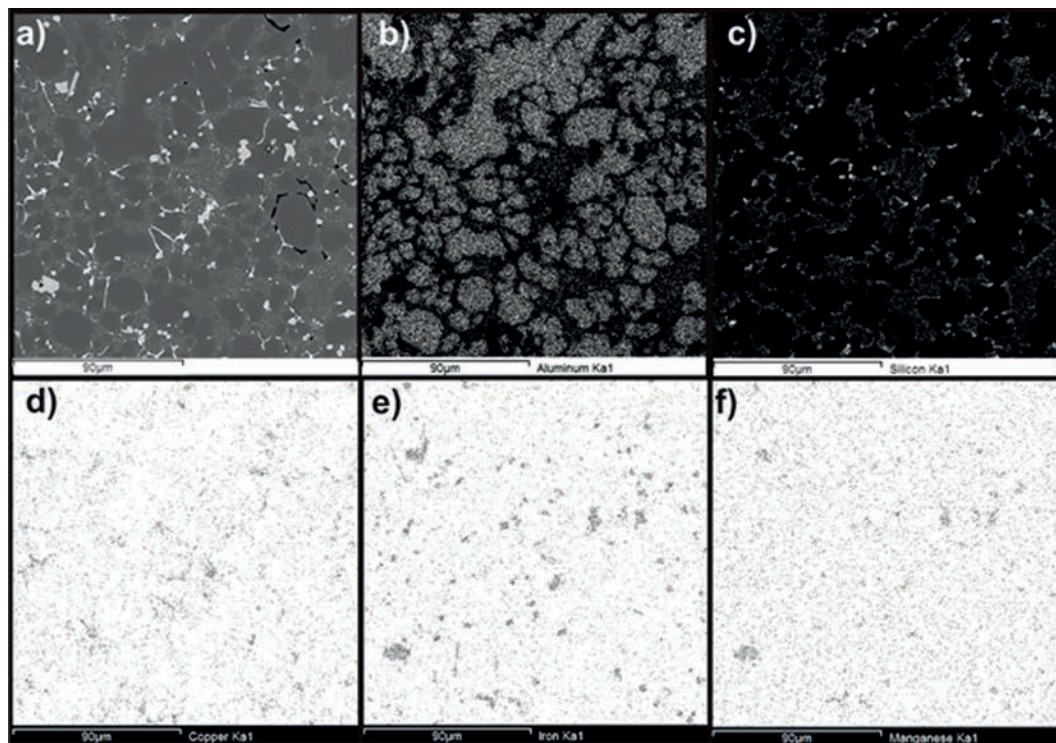
On the basis of the analysis of the chemical composition of cast D with higher casting parameters, it was established that the presence of areas of silicon concentration pushed to the grain boundary of the fine-grained structure of the alloy was established. No presence of clear areas of a high concentration of compounds of iron, copper or manganese was observed, which can improve the strength parameters and equalize the alloy hardness in its whole volume.





Rys. 6. Analiza rozmieszczenia najważniejszych pierwiastków w próbce stopu pobranej z odlewu C: a) widok z SEM struktury, powiększenie 1000× oraz rozmieszczenie: b) Al, c) Si, d) Cu, e) Fe, f) Mn

Fig. 6. Analysis of the distribution of the most important elements in the sample of cast C: a) SEM image of the structure, magnification 1000× and the distribution: b) Al, c) Si, d) Cu, e) Fe, f) Mn



Rys. 7. Analiza rozmieszczenia najważniejszych pierwiastków w próbce stopu pobranej z odlewu D: a) widok z SEM struktury, powiększenie 1000× oraz rozmieszczenie: b) Al, c) Si, d) Cu, e) Fe, f) Mn

Fig. 7. Analysis of the distribution of the most important elements in the sample of cast D: a) SEM image of the structure, magnification 1000× and the distribution: b) Al, c) Si, d) Cu, e) Fe, f) Mn

Zaobserwowane znaczne różnice w sposobie wydzielania się pierwiastków mogą powodować trudność w otrzymywaniu właściwej odpowiedzi na temat wpływu parametrów zalewania na strukturę odlewów. Kolejnym etapem badań było określenie i porównanie składu chemicznego wykonanych odlewów z nominalnym składem stopu AlSi9Cu3 [13]. Badania składu chemicznego stopu zostały przeprowadzone na płaskich i polerowanych próbkach za pomocą analizatora EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*) marki Oxford Instruments na powierzchni wynoszącej 5147  $\mu\text{m}^2$ . Wyniki tych badań zamieszczono w tabeli 2.

The observed significant differences in the manner of element precipitation can cause difficulty in correctly determining the effect of the casting parameters on the structure of the cast. The following stage of the tests was determining and comparing the chemical composition of the produced casts with the nominal composition of alloy AlSi9Cu3 [13]. The investigations of the chemical composition of the alloy were performed on flat polished samples by means of an EDS analyzer (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*) by Oxford Instruments, at the surface equaling 5147  $\mu\text{m}^2$ . The results of these investigations are included in Table 2.

Tabela 2. Nominalny, procentowy skład chemiczny stopu AlSi9Cu3 oraz skład stopu odlewów  
Table 2. Nominal chemical percentage composition of alloy AlSi9Cu3 and composition of cast alloy

Stop/Odlew / Alloy/Cast	Pierwiastek, % wag. / Element, wt. %						
	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
AlSi9Cu3	max. 1,3	8–11	2–4	0,1–0,5	0,05–0,55	max. 1,2	reszta/ residue
A	0,610	9,560	3,034	0,207	0,179	1,247	
B	0,459	8,322	2,666	0,189	0,150	1,203	
C	0,745	9,377	2,634	0,327	0,149	1,177	
D	0,626	7,862	2,639	0,171	0,157	1,140	

Na podstawie analizy danych, zamieszczonych w tabeli 2, stwierdzono, że skład chemiczny wszystkich badanych odlewów mieścił się w przewidywanym w normie zakresie. Można zatem wykluczyć jego wpływ na jakość wytworzonych odlewów. Potwierdzeniem tych obserwacji mogą być wykonane pomiary twardości (tabela 3). Pomiar wykonano pięciokrotnie dla każdej próbki pobranej z odlewów: A, B, C i D. Punkty wykonania pomiarów wybierano losowo w różnych miejscach analizowanych zglądów metalograficznych. Nominalna twardość znormalizowanego stopu AlSi9Cu3 wynosi od 90 HV do 120 HV [10].

Based on the analysis of the data included in Table 2, it was established that the chemical composition of all the examined casts was within the standard range. Therefore, one can exclude its effect on the quality of the produced casts. A confirmation of these observations can be the performed hardness measurements (Table 3). The measurements were made five times for each sample of casts: A, B, C and D. The measurement points were randomly selected from different areas of the analyzed microsections. The nominal hardness of the normalized alloy AlSi9Cu3 equals from 90 HV to 120 HV [10].

Tabela 3. Wyniki pomiaru twardości [HV] próbek pobranych z odlewów A, B, C i D  
Table 3. Results of hardness measurements [HV] of A, B, C and D cast samples

Próbka A / Sample A	Twardość / Hardness	Próbka B / Sample B	Twardość / Hardness	Próbka C / Sample C	Twardość / Hardness	Próbka D / Sample D	Twardość / Hardness
1	87,1	1	83,2	1	95,0	1	75,2
2	95,9	2	96,3	2	99,9	2	79,0
3	99,0	3	99,7	3	101,8	3	82,7
4	126,3	4	102,3	4	102,9	4	85,9
5	133,3	5	107,9	5	108,9	5	90,0
Wartość średnia:	108,3	Wartość średnia:	97,9	Wartość średnia:	101,7	Wartość średnia:	82,6

Analizując twardość próbki pobranej z odlewu A, można zauważyć szeroki rozrzut wyników od 87,1 HV do 133,3 HV. Wyniki pokrywają się z obserwacjami mikroskopowymi i analizami chemicznymi, w których struktura odlewu A jest niejednorodna z licznymi, dużymi

In the analysis of the hardness of the sample of cats A, one can notice a wide scatter of results – from 87.1 HV to 133.3 HV. The results coincide with the microscopic observations and chemical analyses, in which the intermetallic compound FeMn is dominant, rais-



wydzieniami twardej fazy, w której dominuje związek międzymetaliczny FeMn, podnoszącej ogólną twardość odlewu. Biorąc pod uwagę analizę wyników pomiaru twardości odlewu B, zauważono mniejszy rozrzut wynoszący od 83,2 HV do 107,9 HV oraz odlewu C, charakteryzującego się rozrzutem na poziomie od 95 HV do 108,9 HV, stwierdzono związek między malejącym udziałem wydzieleń wspomnianej twardej fazy a twardością odlewów. W odlewie D, który został wykonany przy parametrach zalewania: prędkość tłoka – 2,3 m/s oraz ciśnienie intensyfikacji – 245 barów, zmierzono najmniejszą średnią twardość wynoszącą 82,6 HV, niższą od nominalnej twardości tego stopu (tab. 3). Przyczyną obniżonej twardości może być bardzo drobnoziarnista struktura stopu, w której nie stwierdzono występowania faz obserwowanych w pozostałych odlewach, w których skoncentrowane były związki żelaza z manganem oraz aluminium z miedzią. Rozrzut wyników w tej próbce zawarł się w przedziale od 75,2 HV do 90 HV. Mniejsza, poniżej normy twardość nie dyskwalifikuje z zastosowania odlewów z serii D wykonanych z nastawami zaworów: prędkość tłoka – 2,3 m/s i ciśnienie intensyfikacji – 245 barów. W równolegle prowadzonych badaniach [11] charakteryzowały się one dużą odpornością na rozciąganie, oscylującą wokół wartości siły niszczącej wynoszącej 5 kN, znacznie przekraczającą wartość gwarantującą odpowiednie właściwości użytkowe i trwałość elementu.

### 3. Wnioski

Brak różnic w składzie chemicznym stopu, potwierdzony analizą składu chemicznego, wykluczył jego wpływ na ostateczną strukturę odlewanych ciśnieniowo wyrobów.

W ocenie wpływu wybranych parametrów odlewania ciśnieniowego na budowę siluminu AlSi9Cu3 stwierdzono, że wraz ze wzrostem prędkości zalewania postępuje rozdrobnienie struktury stopu i zmniejszanie ilości wad odlewniczych. Zauważono, że w przypadku tego siluminu zbyt duża prędkość zalewania może prowadzić do zmniejszania twardości odlewów, wpływając równocześnie na powstawanie bardziej drobnoziarnistej struktury z bardziej równomiernym rozkładem dodatków stopowych, jak: miedź, żelazo czy mangan. Pośrednio miało to również znaczenie na ograniczenie ilości wad odlewniczych ujawnionych w miejscach występowania wydzieleń faz z dominującym związkiem międzymetalicznym FeMn. Zbyt mała prędkość zalewania była przyczyną występowania gruboziarnistych wydzieleń faz twardych, które zwiększały ogólną, średnią twardość odlewów.

Wyroby wykonane z prędkością tłoka wynoszącą co najmniej 0,75 m/s i więcej (odlewy C i D) charakteryzowały się mniejszym rozrzutem wyników pomiarów twardości, zatem można przyjąć, że proces zalewania

ing the general hardness of the cast. In the analysis of the hardness results for cast B, a smaller scatter was observed, equaling from 83.2 HV to 107.9 HV cast C characterized in a scatter at the level from 95 HV to 108.9 HV. A relation between the decreasing participation of precipitates of the mentioned phase and the hardness of the casts was established. In cast D, which was made with the following casting parameters: piston rate – 2.3 m/s, intensification pressure – 245 bars, the lowest mean hardness was measured, which equaled 82.6 HV, which is lower than the nominal hardness of this alloy (Tab. 3). The cause of the lowered hardness can be the highly fine-grained structure of the alloy, in which no phases observed in the remaining casts were identified, i.e. concentrated compounds of iron with manganese and aluminium with copper. The scatter of results in this sample was within the range from 75.2 HV to 90 HV. The hardness which is lower than the standard does not disqualify the casts of the D series, with the valve setpoints: piston rate – 2.3 m/s, intensification pressure – 245 bars. In the independently conducted investigations [11], they characterized in a high tensile strength, oscillating around the value of the break force equaling 5 kN, which significantly exceeds the value guaranteeing the appropriate utilitarian properties and strength of the element.

### 3. Conclusions

The lack of differences in the chemical composition of the alloy, confirmed by the analysis of the chemical composition, excluded its effect on the ultimate structure of the pressure cast products.

In the evaluation of the effect of the selected pressure casting parameters on the structure of silumin AlSi9Cu3, it was established that an increase of the casting rate stimulates refinement of the alloy structure and reduction of the amount of casting defects. It was noticed that, in the case of this silumin, a high casting rate can lead to a reduction of the casts' hardness, at the same time, stimulating the formation of a more finely grained structure with a more uniform distribution of alloy additions, such as: copper, iron and manganese. Indirectly, this was always important with respect to limiting the amount of casting defects revealed in the areas of precipitation of phases with the intermetallic compound FeMn as dominant. Too low a casting rate was the cause of the presence of coarse-grained precipitations of hard phases, which increased the general mean hardness of the casts.

The products manufactured at the piston rate of at least 0.75 m/s (casts C and D) characterized in a lower scatter of hardness measurement results, and so, it can be assumed that the process of casting and

i krzepnięcia odlewów cechowała większa powtarzalność.

Dokładna, kompleksowa analiza wyników badań nad wpływem wybranych dwóch parametrów zalewania daje podstawę do kontynuacji prac nad możliwością sterowania procesem zalewania wysokociśnieniowego tak, aby możliwa była pełna kontrola jakości odlewanych elementów, zgodnej z ich przeznaczeniem, przy zachowaniu korzystnych nastaw maszyn ciśnieniowych niewpływających na zwiększenie ich zużycia, w tym elementów roboczych – tłoka oraz formy.

solidification of casts was characterized by higher repeatability.

A detailed, complex analysis of the test results of the effect of the two selected casting parameters provides the basis for continuation of the research on the possibility of controlling the high pressure casting process in such a way as to create the possibility to fully control the quality of the cast elements, according to their purpose, with the preservation of the advantageous setpoints of the pressure machines, which do not increase their wear, including working elements, i.e. the piston and the mould.

## Podziękowania

Badania zostały wsparte finansowo z dotacji na działalność statutową nr S50129/K1012.

## Acknowledgements

The research was financially supported by the statutory activity grant no. S50129/K1012.

## Literatura/References

1. Perzyk M. 2004. *Odlewnictwo*. Warszawa: Wydawnictwo WNT.
2. Pałyga Ł., M. Stachowicz, K. Granat. 2014. „Badania nad możliwością modernizacji systemu sterowania odlewniczych maszyn ciśnieniowych”. *Archives of Foundry Engineering* 14 (special issue 3) : 55–60.
3. Pałyga Ł., M. Stachowicz, K. Granat. 2014. Diagnostyka systemów sterowania odlewniczych maszyn ciśnieniowych. W *Międzynarodowa Konferencja Naukowa: Klaster – Odlewnictwo – Przyszłość, Świlcza, 9–12.09.2014*. Stowarzyszenie Producentów Komponentów Odlewniczych Kom-Cast. Rzeszów: RSdruk, 53–58.
4. Orłowicz A.W., M. Mróz, M. Tupaj, J. Betlej, F. Płoszaj. 2009. “Influence of refining process on the porosity of high pressure die casting alloy Al-Si”. *Archives of Foundry Engineering* 9 (2) : 35–40.
5. Pałyga Ł. 2014. *Analiza wpływu sterowania zautomatyzowanym stanowiskiem do zalewania ciśnieniowego na zmiany jakości wspornika oparcia odlewane go ze stopu EN AB 46000*. Praca dyplomowa. Wrocław: Politechnika Wroclawska.
6. Sękowski K., J. Piaskowski, Z. Wojtowicz. 1972. *Atlas struktur znormalizowanych stopów odlewniczych*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
7. Kozakowski S. 2001. *Badania odlewów. Technologie odlewnicze, typowe dla nich wady i metody ich ujawniania*. Warszawa: Wydawnictwo Biuro Gamma.
8. [http://innovatest-europe.com/upload/shop/documents/product/Leaflet\\_400\\_series\\_050615.pdf](http://innovatest-europe.com/upload/shop/documents/product/Leaflet_400_series_050615.pdf) [dostęp: 02.10.2015].
9. <http://hitachi-hta.com/sites/default/files/literature/TM3000-TableTopSEM-BrochureHTD-E188Q.pdf> [dostęp: 02.10.2015].
10. Hwang J.Y., H.W. Doty, M.J. Kaufman. 2008. “The effects of Mn addition on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu casting alloys”. *Materials Science and Engineering: A* 488 (1–2) : 496–504.
11. Pałyga Ł., M. Stachowicz, K. Granat. 2015. “Effect of Selected Parameters of Pressure Die Casting on Quality of AlSi9Cu3 Castings”. *Archives of Foundry Engineering* 15 (2) : 85–90.
12. Seifeddine S., S. Johansson, I.L. Svensson. 2008. “The influence of cooling rate and manganese content on the  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi phase formation and mechanical properties of Al-Si based alloys”. *Materials Science and Engineering: A* 490 (1–2) : 385–390.
13. <http://stenametall.com/NR/rdonlyres/E242797C-89B1-48F9-A47C-546A3059064A/0/engENAB46000.pdf> [dostęp: 02.10.2015].