

**Analiza wtrąceń niemetalicznych w odlewach ze stopu AZ91 wykonanych z udziałem złomu obiegowego w procesie wysokociśnieniowego odlewania**

**Analysis of non-metallic inclusions in AZ91 alloy casts with process foundry return in high-pressure die casting**

Zbigniew Konopka<sup>1</sup>, Arkadiusz Chojnacki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, Katedra Odlewnictwa, Al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa

<sup>1</sup> Czestochowa University of Technology, Faculty of Production Engineering and Materials Technology, Department of Foundry Engineering, Al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa, Poland

E-mail: konopka@wip.pcz.pl

Received: 25.04.2016. Accepted in revised form: 31.12.2016.

© 2016 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/iod.2016.21

**Streszczenie**

**Abstract**

*W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu udziału złomu obiegowego we wsadzie stopu AZ91 na zmianę struktury odlewów wykonanych metodą wysokociśnieniowego odlewania, ze szczególnym uwzględnieniem tworzenia się wtrąceń niemetalicznych. Na podstawie obserwacji wtrąceń metodą mikroskopii skaningowej określono skład chemiczny tych wtrąceń w wytopach z różnym udziałem złomu obiegowego we wsadzie.*

*The article presents research results of the process foundry return influence in the AZ91 alloy charge on the change in the structure of castings made by the high-pressure casting method, with special consideration of the formation of non-metallic inclusions. Based on the observations of inclusions by the scanning microscopy method, the chemical composition of the inclusions in melts with different process scrap contents in the charge was determined.*

*Słowa kluczowe: odlewanie ciśnieniowe, stop AZ91, wtrącenia niemetaliczne, mikrostruktura, złom obiegowy*

*Keywords: high-pressure die casting, alloy AZ91, non-metallic inclusions, microstructure, process foundry return*

**1. Wprowadzenie**

Odlewy ze stopów magnezu znajdują coraz szersze zastosowanie w naszym życiu ze względu na swoje korzystne właściwości użytkowe w połączeniu z niską gęstością. Stopy magnezu wykazują dobre właściwości odlewnicze, wysoką odporność na korozję i dobre właściwości mechaniczne, w tym w podwyższonych temperaturach. Odlewy ze stopów magnezu wykonane metodą odlewania ciśnieniowego, takie jak: kolumny kierownicze, suporty, skrzynie biegów, szkielety siedzeń znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, a także w elektronice jako: obudowy komputerów przenośnych, aparatów telefonicznych i fotograficznych, ka-

**1. Introduction**

Magnesium alloy castings are more and more extensively used in everyday applications due to their advantageous functional properties, in combination with low density. Magnesium alloys exhibit good casting properties, high corrosion resistance and good mechanical properties at elevated temperatures. Magnesium alloy castings made by the high-pressure die casting method, such as: steering columns, supports, gear boxes, seat frameworks, are widely used in the automotive industry, as well as in electronics as casings of: mobile computers, telephones, (video) cameras, telescopes etc. as well as others, where it is important to lower the mass

mer wideo, teleskopów itd. oraz innych, w których ważne jest obniżenie masy wyrobu, przy zachowaniu wysokich właściwości wytrzymałościowych [1,2].

Masowa produkcja odlewów wiąże się z recykulacją dużej liczby materiałów, wśród których metal zajmuje najważniejszą pozycję. Recykling złomu obiegowego staje się więc w odlewni priorytetowym zadaniem technologicznym. Złom obiegowy wykorzystany do przeprowadzenia recyklingu składa się głównie z układów gąsek i zabrakowanych odlewów [3,4].

Najlepszym rozwiązaniem recyklingu złomu jest obieg zamknięty polegający na jego przetopie w piecu roboczym. Korzyści płynące z zastosowania tego rozwiązania to: niewielka inwestycja, brak problemów związanych z segregacją stopów, niewielki wzrost poboru energii elektrycznej (praca pieca w trybie ciągłym), niewielki wkład pracy w oczyszczanie zgaru z pieca, oszczędności związane z transportem złomu, stosunkowo dobra jakość stopu, gdyż od 40–50% to materiał z czystych gąsek o bardzo dobrej jakości, wyeliminowanie miejsc odkładczych na złom obiegowy [5,6].

Wtrącenia niemetaliczne pojawiają się w wyniku niestarannie prowadzonego przetopu materiału wsadowego oraz jako pochodna powstawania pęcherzy gazowych, które częściowo przekształcają się we wtrącenia w wyniku utlenienia. Niezachowanie czystości przy wkładaniu gąsek do tygła, jak również używanie zabrudzonych narzędzi do usuwania zgaru z powierzchni metalu może być przyczyną wprowadzania nieczystości do stopu. Także stosowanie recyklatu ze złomu obiegowego na odlewni może powodować występowanie wtrąceń niemetalicznych w odlewie. Wtrącenia niemetaliczne w zależności od ich ilości i umiejscowienia w odlewie (na powierzchni lub wewnątrz odlewu) powodują zmniejszenie właściwości użytkowych odlewu, a nawet jego dyskwalifikację. Ma to zarówno znaczenie dla odlewów technicznych, jak i dekoracyjnych [7–9].

Przyczyną powstawania pęcherzy jest zbyt szybkie wypełnianie wnęki formy oraz zbyt wysoka temperatura ciekłego metalu i formy. Proces wypełniania wnęki formy w odlewnictwie wysokociśnieniowym jest bardzo burzliwy. Wiąże się to z bardzo szybkim przemieszczaniem ciekłego metalu i złożonością kształtu odlewu. W takiej sytuacji atmosfera gazowa znajdująca się we wnęce formy zostaje uwięziona we wnętrzu odlewów, tworząc pęcherze gazowe [10–12].

Pod wpływem ciśnienia uwięzione w odlewie pęcherze gazowe zostają sprasowane. Zbyt wczesne wyjęcie odlewu z formy powoduje pojawienie się pęcherza na powierzchni odlewu. Dzieje się to w sytuacji pęcherzy umiejscowionych pod powierzchnią odlewu. Podobna sytuacja ma miejsce, gdy odlew jest poddany działaniu temperatury. Zbyt wysoka temperatura formy podczas odlewania powoduje tworzenie się bąbelków na powierzchni odlewu. Połączenie zbyt wysokiej temperatury formy wraz ze zbyt krótkim czasem zwarcia skutkuje pojawieniem się

of the product, with the preservation of good strength properties [1,2].

Mass production of casts is connected with the recycling of a large number of materials, of which metal occupies the most important position. And so, recycling of process foundry return is becoming a technological priority at foundries. Process scrap used for recycling consists mainly of gating systems coming from casts made from pure ingots and castings marked as rejects [3,4].

The best solution of foundry return recycling is a closed circulation, consisting in its remelting in a holding furnace. The advantages of such a solution are: low investment, no problems connected with alloy segregation, small increase of electric power consumption (the furnace works in the continuous mode), low amount of work related to cleaning the melting slag off the furnace, savings connected with foundry return transport, relatively good alloy quality because melt contains 40–50% of very good quality pure ingots, elimination of intermediate storage areas for process scrap [5,6].

Non-metallic inclusions occur as a result of carelessly conducted remelting of the charge material and as a derivative of the formation of blowholes, which partially transform into inclusions, as a result of oxidation. Failure in maintaining cleanliness while placing the ingots into the crucible, as well as using dirty tools for removing the melting loss from the metal surface can be the cause of the presence of impurities in the alloy. Also, the use of recycle as process foundry return at the foundry can cause the occurrence of non-metallic inclusions in the cast. Non-metallic inclusions, depending on their amount and location in the castings (on the surface or inside) lower the functional properties of the cast, or even cause its rejection. This is important both for technical and decorative castings [7–9].

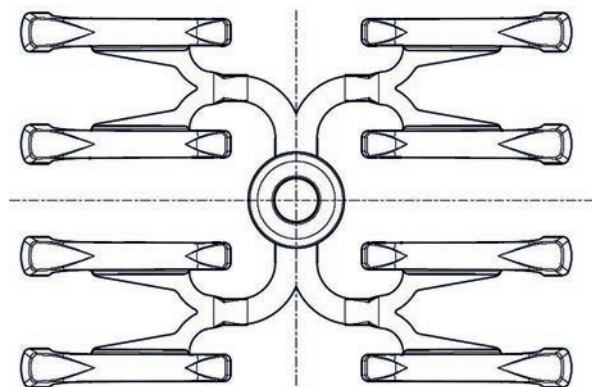
The cause of the formation of blowholes is the turbulent filling of the mould cavity and too high temperature of the liquid metal and the mould. The process of filling the mould cavity in high-pressure die casting is very turbulent. It is connected with a very fast movement of the liquid metal and a complexity of the castings shape. In such a case, the air present in the mould cavity is trapped inside the castings thus forming blowholes [10–12].

Under the effect of pressure, the blowholes entrapped in the casting are subjected to the extreme pressing. A premature removal of the castings from the mould causes the appearance of a blowhole under the cast surface. A similar situation takes place when the casting is subjected to the effect of temperature. Too high temperature of the mould during casting causes the formation of bubbles on the casting surface. The combination of too high a mould temperature and too short a total force time results in the appearance of blowholes in the cast. The blowholes are formed as a result of the expansion of gas, which was entrapped

pęcherzy na odlewie. Powstają one wskutek rozszerzenia się gazu, który został uwięziony blisko powierzchni odlewu. Wysoka temperatura odlewu powoduje powstanie wysokiego ciśnienia w pęcherzu. Przy niewielkiej twardości krzepnącego odlewu następuje pojawienie się pęcherza na powierzchni odlewu [13–15].

## 2. Warunki eksperymentu i wyniki

Na potrzeby badań struktury oraz identyfikacji i oceny wtrąceń niemetalicznych w odlewach pobrano próbki z odlewów klamek okiennych. Odlewy wykonano ze stopu AZ91, stosując technologię odlewania ciśnieniowego na maszynie gorąckomorowej o sile zwierania 3 MN. Widok rozmieszczenia odlewów w formie i układ zalewania przedstawiono na rysunku 1. Skład wsadu i oznaczenie wytopów wykonanych na potrzeby pracy przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 1. Widok odlewów klamek z układem wlewowym  
Fig. 1. View of window pen castings with the gating system

Tabela 1. Skład wsadu wytopów w badaniach  
Table 1. Composition of the test melt charge

Oznaczenie wytopu / Alloy denotation	Skład wsadu, % wag. / Charge composition, wt. %		Sposób wykonania próbek / Manner of sample preparation
	Gąski/Ingots	Złom/Scrap	
A0	100	0	Materiał pobrany z gąski bez przetopu / Material collected from pig without remelting  Wytop i odlewanie według procedury / Melting and casting according to procedure
A1	100	0	
A2	70	30	
A3	50	50	
A4	30	70	
A5	0	100	Pięciokrotny przetop i odlewanie / Five-fold remelting and casting
A6	0	100	

Próbki poddano badaniom oceny mikrostruktury metodą mikroskopii świetlnej oraz skaningowej mikroskopii elektronowej SEM. W badaniach użyto następującej aparatury badawczej: mikroskop Nikon – OPTIPHOT,

close to the castings surface. The high temperature of the cast causes the formation of high pressure in the blowhole. With the low hardness of the solidifying cast, a blowhole appears on the cast surface [13–15].

## 2. Experiment conditions and results

For the purposes of testing the structure as well as identifying and evaluating the non-metallic inclusions in the castings, samples were collected from window pen casting. The casts were made from alloy AZ91 by the high-pressure die casting technology on a hot chamber machine with a locking force of 3 MN. A view of the distribution of casts in the mould and the gating system are presented in Figure 1. The composition of the charge and the denotation of the melts made for the purposes of this study are included in Table 1.

The samples undergo microstructure evaluation by light microscopy and scanning electron microscopy (SEM) methods. During the investigation the following equipment was used: microscope Nikon – OPTIPHOT,

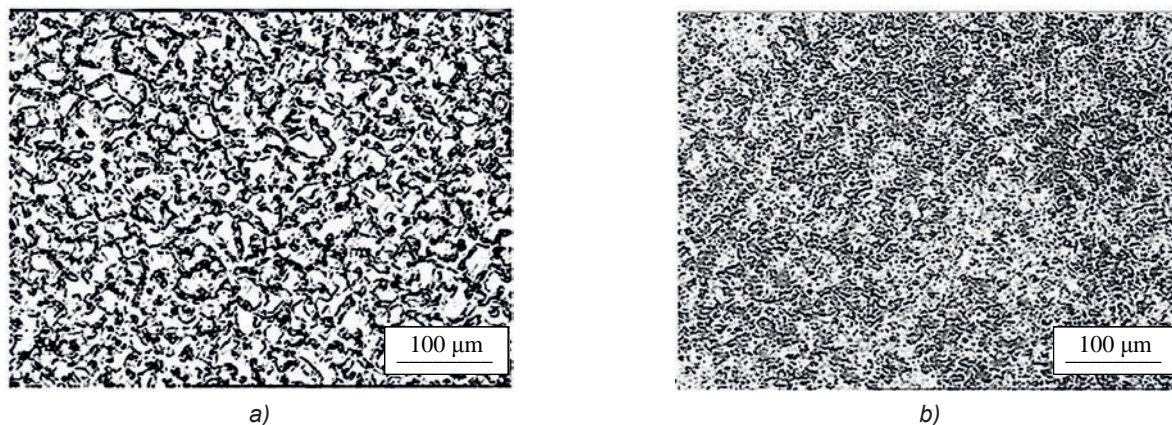


Camera: Sony – Exwave HAD model SSC-DC50AP 12 V – 4,5 W oraz mikroskop skaningowy JEOL JSM – 500 Scanning Microscope, Mikroanalizator EDS.

Przykładowe zdjęcia mikrostruktury badanych odlewów przedstawiono na [rysunku 2](#).

Camera: Sony – Exwave HAD model SSC-DC50AP 12 V – 4,5 W and scanning electron microscope JEOL JSM – 500 Scanning Microscope, Microanalyser EDS.

Representative microstructure images of the examined castings are presented in [Figure 2](#).



Rys. 2. Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego: a) wytop A1, b) wytop A5

Fig. 2. Microstructure of a high-pressure die casting samples: a) melt A1, b) melt A5

Mikrostruktura stopu AZ91 w badanych odlewach składa się z dendrytów fazy pierwotnej  $\alpha$  będących roztworem stałym aluminium w magnezie (jasne pola) i fazy eutektycznej stanowiącej mieszaninę roztworu  $\alpha$  i płytkowych (iglastych) wydzieleni związku  $Mg_{17}Al_{12}$  (ciemne pola). Mikrostruktura taka powstaje w wyniku krystalizacji nierównowagowej, rozwijającej się w warunkach szybkiego stygnięcia odlewów w formie metalowej.

Występowanie wtrąceń niemetalicznych w odlewach badano jakościowo metodą mikroskopii świetlnej, oceniając kształt, wielkość i rozmieszczenie wtrąceń. Zidentyfikowane w odlewach wtrącenia niemetaliczne oceniono także pod względem ich składu chemicznego, wykonując pomiar metodą mikroanalizy rentgenowskiej.

W wielu przypadkach zaobserwować można występowanie wtrąceń niemetalicznych klasycznie wewnątrz odlewów, a także dodatkowo wydzielenia niemetaliczne pojawiają się na powierzchni odlewów. Są one skoncentrowane głównie na granicy podziału odlewów, gdzie układają się w jednej linii. Przykładowy obraz wtrącenia niemetalicznego przedstawiono na [rysunku 3](#).

Reprezentatywny widok wtrąceń niemetalicznych usytuowanych na powierzchni odlewu w obszarze powierzchni podziału formy przedstawiono przykładowo na [rysunku 4a](#).

W odlewach wykonanych z gąsek lub z małym udziałem złomu obiegowego występują liczne porowatości pochodzenia skurczowego i gazowego. W odlewach wykonanych z większym udziałem złomu obiegowego we wsadzie pojawiają się liczne wtrącenia niemetaliczne, które lokują się w przestrzeniach pochodzenia gazowego tworząc pęcherze ([rys. 3,4](#)).

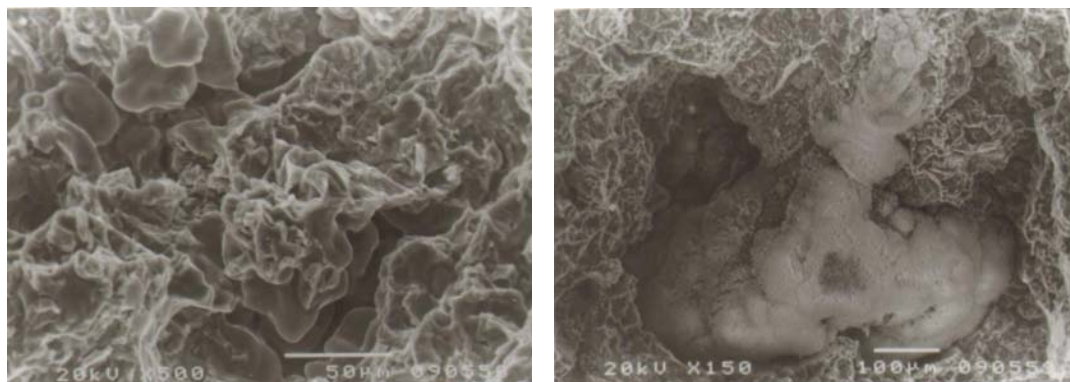
The microstructure of alloy AZ91 in the examined castings consists of dendrites of primary phase  $\alpha$  being a solid solution of aluminium in magnesium (light areas) and eutectic phase being a mixture of solution  $\alpha$  and plate (acicular) precipitates of the compound  $Mg_{17}Al_{12}$  (dark areas). Such a microstructure is formed as a result of non-equilibrium crystallization developing under the conditions of fast cooling of the castings in the metal mould.

The presence of non-metallic inclusions in the casts was qualitatively examined by the light microscopy method, by way of evaluating the shape, size and distribution of the inclusions. The non-metallic inclusions identified in the casts were also examined in respect of their chemical composition by the X-ray microanalysis method.

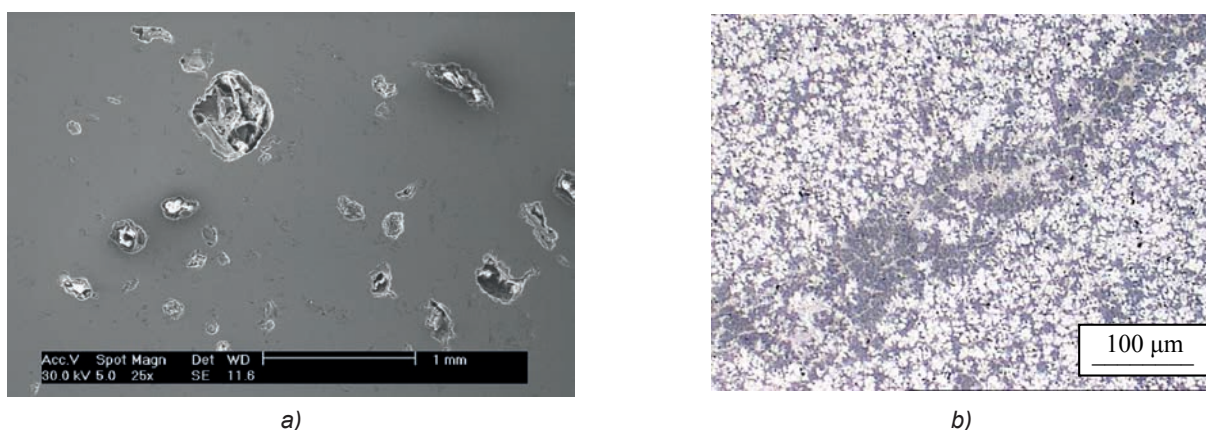
In many cases, the presence of non-metallic inclusions could be noticed inside the castings, but additionally, non-metallic precipitates appear also on the castings surfaces. They are concentrated mainly on the mould junction, which are arranged in a single line. A representative view of a non-metallic inclusion is presented in [Figure 3](#).

A representative view of the non-metallic inclusions situated on the castings surface in the mould joint area is shown in [Figure 4a](#).

In castings made from ingots or with a small content of process foundry return, numerous shrinkage and gas porosities are present. In castings made with a higher content of process foundry return, numerous non-metallic inclusions appear in the melt, localized in the gas spaces on the surface near the division forming blowholes ([Figs. 3,4](#)).



Rys. 3. Mikrostruktura odlewu ciśnieniowego z wytopu A5  
 Fig. 3. Microstructure of a high-pressure die casting sample from melt A5



Rys. 4. Wtrącenia niemetaliczne: a) na powierzchni odlewu w miejscu podziału formy (wytop A5), b) wewnątrz odlewu (wytop A4)  
 Fig. 4. Non-metallic inclusions: a) on the casting surface at the mould joint area (melt A5), and b) inside the casting (melt A4)

Wyniki badań składu chemicznego wybranych wtrąceń niemetalicznych dla reprezentatywnych próbek odlewów dla poszczególnych wytopów przedstawiono w tabeli 2. Ocena składu chemicznego wtrąceń pozwala na przybliżoną identyfikację składu badanej fazy i ustalenie jej wzoru chemicznego.

Oceniając skład chemiczny badanych wtrąceń niemetalicznych, stwierdzić można duży udział takich pierwiastków, jak: Mg, Al, O. Wskazuje to jednoznacznie, że najprawdopodobniej są to tlenki, głównie MgO i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Analiza składów chemicznych poszczególnych próbek pokazała, że wraz ze zwiększającym się udziałem materiału z recyklingu zmniejsza się ilość magnezu w stopie, natomiast rośnie udział aluminium. Wzrost zawartości aluminium w stopie spowodowany jest głównie utlenianiem magnezu i obecnością jego tlenków, co wykazała analiza chemiczna przeprowadzona na skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM). Różnica również obejmuje zawartość berylu, żelaza, krzemu i miedzi, lecz ważne jest, że mimo przeprowadzania kolejnych przetopów wszystkie zawartości pierwiastków są w normie.

The results of chemical composition testing of selected non-metallic inclusions for representative casting samples and corresponding melts, are presented in Table 2. An evaluation of the chemical composition of the inclusions enables an approximate identification of the composition of the examined phase and its stoichiometry identification.

During evaluation of the chemical composition of the examined non-metallic inclusions a high content of such elements as: Mg, Al, O were established. This clearly points to the fact that they are oxides, mainly MgO and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The analysis of the chemical compositions of the particular samples showed an increase of recycling material content, the amount of magnesium in the alloy decreases, while the relative content of aluminium increases. The increase of the aluminium content in the alloy is caused mainly by magnesium oxidation and the presence of oxides, which was demonstrated by the chemical analysis obtained by EDS. The difference also includes the higher content of beryllium, iron, silicon and copper in melts with higher amounts of return. Still, it is important to note that, despite the consecutive



Tabela 2. Skład chemiczny wtrąceń niemetalicznych w odlewach  
 Table 2. Chemical composition of non-metallic inclusions in castings

Numer próbki / Sample number	Zawartość pierwiastka, % atom. / Element content, at. %			Zawartość pierwiastka, % wag. / Element content, wt. %			Zawartość innych pierwiastków, % wag. / Content of other elements, wt. %	
	Mg	Al	O	Mg	Al	O		
A1	19,55	–	32,11	24,32	–	27,09	–	–
A2	44,12	–	55,12	54,17	–	44,53	S = 0,96	Ca = 0,33
A3	27,57	–	60,25	37,47	–	53,89	S = 0,36	K = 0,33
A4	50,85	21,75	19,38	54,67	25,95	27,40	–	–
A5	51,85	9,11	38,95	59,11	11,52	29,23	S = 0,14	–
A6	11,65	–	35,37	13,91	–	27,80	C = 23,09 Fe = 23,75	Na = 1,92 Si = 0,81

Znacząca różnica w budowie mikrostruktury zauważalna jest w przypadku zastosowania materiału odlewniczego pochodzącego w 100% z recyklingu. Utleniona powierzchnia wsadu powoduje wprowadzenie tlenków do kąpeli, które w późniejszym procesie przedostają się do odlewów, a następnie segregują, łącząc się w większe grupy. Tendencja do łączenia i powiększania się tlenków jest szczególnie widoczna w mikrostrukturze odlewu uzyskanego w procesie wielokrotnego przetapiania układów wlewowych w obiegu zamkniętym bez dostarczania materiału wsadowego z zewnątrz do ciekłego metalu.

Analiza zdjęć wykonanych na elektronowym mikroskopie skaningowym prowadzi do następujących spostrzeżeń. Odlewy uzyskiwane z przetopu czystych gąsek posiadają przełom kruchy, łamliwy. W środku odlewu uwięzione są pęcherze gazowe, a ich ilość zmniejsza się w kierunku brzegu odlewu. Ocena mikroskopowa struktury odlewów i występujących w niej wtrąceń niemetalicznych wskazuje na ich występowanie wewnątrz i na powierzchni odlewów. Wtrącenia niemetaliczne usytuowane wewnątrz odlewów występują w postaci dużych skupisk rozmieszczonych wzdłuż linii płynięcia metalu w formie (rys. 4b). Kształt, wielkość i rozmieszczenie tych wtrąceń wskazuje na możliwość wytworzenia ich w masie metalu w procesie metalurgicznym, są więc one obecne w metalu, tworząc zawiesinę i są wprowadzane do formy, gdzie zostają uwięzione w krzepnącym odlewie.

Drugi typ wtrąceń niemetalicznych rozmieszcza się głównie w obszarze bliskim podziałowi formy. Wtrącenia te mają kształt bardziej regularny, a w wielu wypadkach znajdują się wewnątrz powstałych pęcherzy powietrza, które wywołują ich okluzję (rys. 3,4). Ten typ wtrąceń

remelts, all the element contents are within the acceptable normal range.

A significant difference in the microstructure is noticeable in the case of charge material from 100% recycling. The oxidized skin of the melt causes the introduction of oxides into the bath, which are, in a later stage, pushed inside the castings and segregate forming clusters. The oxides' tendency for joining and expanding is especially visible in the microstructure of the cast obtained in the process of multiple remelting of gating systems, in closed circulation.

The analysis of the scanning electron microscope images leads the following observations. The castings obtained from the remelting of pure ingots have a brittle, fragile fracture. Inside the cast, blowholes are confined and their amount decreases in the direction of the cast edge. The microscopic evaluation of the cast structure and the non-metallic inclusions present in it points to their existence inside and on the surface of the casts. The non-metallic inclusions found inside the castings are present in the form of large agglomerations distributed along the line of the metal flow in the mould and gating system (Fig. 4b). Non-metallic inclusions are present in the metal, forming a suspension, and are introduced into the mold.

The other type of non-metallic inclusions is distributed mainly in the area close to the mould junction. These inclusions have a more regular shape, and in many cases, they are situated inside the formed air bubbles, which cause their occlusion (Figs. 3,4). This type of inclusion is formed in the process of filling the mould by a high dispersion of the solid particles existing in the suspension, which, being grabbed by the flowing metal, meet the small air bubbles present in it, and this causes

powstaje w procesie wypełniania wnęki formy przez dużą dyspersję istniejących w zawieszynie cząstek stałych, które porywane z płynącym metalem napotykaają obecne w nim drobne pęcherzyki powietrza, co wywołuje ich okluzję. W ocenie jakości odlewów stwierdzono dużą uciążliwość tej wady, która w wielu wypadkach dyskwalifikowała odlewy. Wydaje się, że istnieje możliwość ograniczenia jej występowania przez zmniejszenie obecności gazów w ciekłym metalu, z jednej strony, oraz weryfikację parametrów odlewania przez optymalizację prędkości odlewania szczególnie w pierwszej fazie, z drugiej. Zbyt duża prędkość metalu w tej fazie zapelniania może być podstawową przyczyną powstawania okluzji gazowej.

Badania składu chemicznego zidentyfikowanych wtrąceń niemetalicznych w badanych odlewach wykazały obecność głównie takich pierwiastków, jak: Mg, Al, O, Si, C oraz w wytopach z dużym udziałem złomu obiegowego we wsadzie takie pierwiastki, jak: Ca, Na, Fe, Cr, V. Pierwsza grupa pierwiastków, których udział w wtrąceniach niemetalicznych, jest znaczny świadczy jednoznacznie o występowaniu związków chemicznych MgO i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Powstawanie tych tlenków jest nieuniknione w procesie metalurgicznym i podczas odlewania mimo stosowania atmosfery ochronnej, która raczej spełnia zadanie zabezpieczenia ciekłego metalu przed gwałtownym, wybuchowym utlenianiem i niebezpieczeństwem pożaru. Obecność w stopie pierwiastków, takich jak: Ca, Na, Fe, Cr, V, pochodzi najprawdopodobniej z procesu rafinacji żuźlowej i modyfikacji stopu (Ca, Na) oraz rozpuszczania materiału syfonu w czasie długotrwałego jego kontaktu z ciekłym stopem podczas odlewania.

### 3. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań odlewania wysokociśnieniowego odlewów klamek ze stopu AZ91 ze zmiennym udziałem złomu obiegowego we wsadzie, uzyskanych wyników i ich analizy można przedstawić następujące spostrzeżenia i wnioski.

1. Ze wzrostem udziału złomu obiegowego we wsadzie następuje rozdrobnienie struktury odlewów ze stopu AZ91.
2. Ze wzrostem udziału złomu we wsadzie następuje wzrost udziału wtrąceń niemetalicznych w strukturze odlewów w postaci tlenków MgO i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, a ich rozmieszczenie staje się niejednorodne z tendencją do tworzenia dużych skupisk.
3. Wtrącenia niemetaliczne tworzą się wewnątrz odlewu i na powierzchni, a miejscem uprzywilejowanym ich usytuowania jest powierzchnia podziału formy.
4. Wtrącenia niemetaliczne znajdują się w odlewie w wyniku ich wprowadzenia z ciekłym metalem

their agglomeration. In the evaluation of the cast quality, this defect was viewed as especially burdensome, which in many cases disqualifies the casts. It seems that there is a possibility to limit its occurrence by way of reducing the presence of gases in the liquid metal on the one hand, and verifying the casting parameters through optimization of the casting cooling rate, particularly at the first stage, on the other. Too high metal flow rate at this stage of filling can be the basic cause of gas occlusion.

The testing of the chemical composition of the identified non-metallic inclusions in the investigated castings showed mainly the presence of such elements as: Mg, Al, O, Si, C, and in the melts with a high content of process foundry return in the charge – such elements as: Ca, Na, Fe, Cr, V. The first group of elements, whose content in the non-metallic inclusions is high, clearly proves the presence of chemical compounds MgO and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The formation of these oxides is inevitable in the metallurgical process and during solidification, despite of their protective atmospheric application, whose role is rather to protect the liquid metal from the rapid, explosive oxidation and thus the risk of fire. The presence of such elements as: Ca, Na, Fe, Cr, V in the alloy probably comes from the process of slag refinement and alloy modification (Ca, Na) as well as dissolution of the siphon material during its prolonged contact with the liquid metal during casting.

### 3. Conclusions

On the basis of the performed investigations of AZ91 alloy castings with a varying content of process foundry return in the melt, obtained results and their analysis, the following observations and conclusions can be formulated:

1. With an increase of the process foundry return content in the charge material, a refinement of the AZ91 alloy microstructure castings occurs.
2. With an increase of the scrap content in the charge material, an increase in the content of non-metallic inclusions in the cast structure in the form of oxides MgO and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was observed, with their heterogeneous distribution and tendency to form large agglomerations.
3. Non-metallic inclusions are formed inside the casting and on its surface, and the privileged area of their location is the surface of the mould joint.
4. The non-metallic inclusions are present in the casting as a result of their introduction with the liquid metal (metallurgical origin), and they are also

(pochodzenie metalurgiczne), a także tworzą się jako utlenione powierzchnie pęcherzy gazowych rozproszonych w odlewie.

formed as oxidized surfaces of blowholes scattered in the cast.

## Podziękowania

Badania wykonano w ramach prac statutowych Katedry Odlewnictwa Politechniki Częstochowskiej.

## Acknowledgements

The research has been conducted within the statutory works of the Foundry Department of the Chestochowa University of Technology.

## Literatura/References

1. Fajkiel A., P. Dudek, G. Sęk-Sas. 2002. *Odlewnictwo XXI w. Kierunki rozwoju metalurgii i odlewnictwa stopów metali lekkich*. Kraków: Instytut Odlewnictwa.
2. Białobrzęski A., E. Czekaj, P. Dudek, A. Fajkiel, Z. Kanikuła, R. Korzec, G. Sęk-Sas, S. Pysz. 2002. *Wybrane zagadnienia technologii odlewania ciśnieniowego*. Kraków: Instytut Odlewnictwa.
3. Aghion E., D. Eliezer (eds.). 2002. *Proceedings of the Second Israeli International Conference on Magnesium Science & Technology, Magnesium 2002*.
4. Dworog A. 2000. Semi Solids Injection Molding of Magnesium Alloys. International Congress "Magnesium Alloys and Alloys and their Applications", Monachium 2000.
5. Kainer K.U. (ed.). 2003. *Magnesium – Alloys and Technology*. Weinheim, Germany: Willey-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
6. Maltais A., D. Dubé, M. Fiset, G. Laroche, S. Turgeon. 2004. „Improvements In the metallography of as-cast AZ91 alloy”. *Materials Characterization* 52 (2) : 103–119.
7. Gjestland H., S. Sannes, H. Westengen. 2002. High pressure die casting – Getting the best out of magnesium. 10<sup>th</sup> Magnesium Automotive and End User Seminar, Aalen, Germany.
8. Dahle A.K., D.H. St John. 2000. „Prevent banded defects in high-pressure die cast magnesium alloys”. *Modern Casting* 90 (2) : 43–46.
9. Moscovitch N., G. Gertsberg, N. Nagar, D. Gur, B. Bronfin, E. Aghion. 2000. The use of die casting technology in the process of developing new magnesium alloys. 9<sup>th</sup> Magnesium and User Seminar, Aalen, Germany, 2000.
10. Konopka Z., A. Chojnacki. 2011. „Structure of the AZ91 alloy pressure castings fabricated of home-scrap containing charge”. *Archives of Foundry Engineering* 11 (2) : 61–64.
11. Chojnacki A., Z. Konopka. 2010. Ocena struktury i jakości odlewów ciśnieniowych ze stopu magnezu AZ91. *W XI Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Nowe technologie i osiągnięcia w metalurgii i inżynierii materiałowej”*, 567–570. Wydawnictwo WIPMiFS, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej.
12. Gjestland H. et al. High Pressure Die Casting – Getting the best out of magnesium. EFM, Aalen, Germany, 2002.
13. Eliezer D., E. Aghion, F. H. Froes. 1997. Magnesium science, technology and applications. Magnesium 97, 10–12 November 1997, Dead Sea, Israel.
14. Fitze R. 2003. Improve the competitiveness of magnesium die casting by inline recycling of ten runner system. 11<sup>th</sup> Magnesium Automotive and End User Seminar, September 2003, Aalen, Germany.
15. Spigarelli S., M. Regev, E. Evangelista, A. Rosen. 2001. „Review of creep behaviour of AZ91 Magnesium Alloy Produced by Different technologies”. *Materials Science and Technology* 17 (6) : 627–638.