

**Wpływ dodatku złomu obiegowego na właściwości mechaniczne  
odlewów ciśnieniowych ze stopów magnezu**

**The effect of the addition of circulating scrap on the tensile properties of die cast  
magnesium alloy**

Piotr Dudek<sup>1</sup>, Aleksander Fajkiel<sup>1</sup>, Tomasz Reguła<sup>1</sup>, Edward Czekaj<sup>1</sup>, Janusz Mielniczuk<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Polmag sp. z o.o., ul. Szkolna 15, 47-225 Kędzierzyn-Koźle

<sup>1</sup>Foundry Research Institute, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

<sup>2</sup>Polmag sp. z o.o., ul. Szkolna 15, 47-225 Kędzierzyn-Koźle

E-mail: piotr.dudek@iod.krakow.pl

**Streszczenie**

Recykling stopów magnezu jest zagadnieniem trudnym nie tylko z uwagi na bardzo dużą reaktywność i skłonność do zapalania się tych stopów już poniżej temperatury topnienia, ale i z braku odpowiedniego wyposażenia oraz doświadczenia w tym zakresie w krajowych odlewniach. Niemniej jednak zarówno wymogi ochrony środowiska naturalnego, jak i konieczność zmniejszania kosztów funkcjonowania odlewni, wymagają racjonalnego zagospodarowania złomu obiegowego. Problem ten dotyczy nie tylko odlewni stopów magnezu, ale niemal wszystkich odlewni. Jednak z uwagi na trudną technologię topienia stopów magnezu powszechnie uważa się, że dobre właściwości mechaniczne odlewów z tych stopów można uzyskać jedynie ze stopów pierwotnych (czystych gąsek).

Przeprowadzone badania wpływu dodatku złomu obiegowego na właściwości mechaniczne odlewów ciśnieniowych ze stopów magnezu AZ91 i AM50 wykazały, że określony, ściśle kontrolowany dodatek takiego złomu w znacznym stopniu wpływa na zwiększenie nie tylko wytrzymałości na rozciąganie, ale przede wszystkim wzrost plastyczności, co stwarza możliwość szerszego zastosowania odlewów.

W artykule przedstawiono wyniki prac nad doborem optymalnej ilości złomu obiegowego we wsadzie na właściwości mechaniczne odlewów ciśnieniowych ze stopu AZ91 i AM50.

**Słowa kluczowe:** stopy magnezu, wsad metalowy, złom obiegowy, odlew ciśnieniowy, właściwości mechaniczne

**Abstract**

Recycling of magnesium alloys is a complex issue not only because of their high reactivity and flammability even below melting temperature, but primarily because of a lack of equipment and experience in foundries. Nonetheless the environmental factors and the economic aspects of magnesium casting processes require the proper use of scrap. The problem relates not only to magnesium foundries but every foundry. However, due to the difficulty of melting and treating magnesium alloys there is a common belief that good mechanical properties can be achieved only by using pure ingots.

The present research investigating the effect of process scrap on the mechanical properties of AZ91 and AM50 die cast parts. The results have shown that a particular content of the scrap causes an increase in the tensile strength and in elongation, which can have a profound effect on the applicability of the magnesium alloys.

This article presents results of research on the optimum content of process scrap in the melt related to mechanical properties of AZ91 and AM50 die cast parts.

**Keywords:** magnesium alloys, metal charge, process scrap, pressure die casting, mechanical properties

## 1. Wprowadzenie

Problem recyklingu stopów magnezu szczególnie wyraziście na terenie Polski wystąpił po II wojnie światowej. Duża ilość stopów magnezu i aluminium pochodziła głównie ze sprzętu wojskowego, w tym z samolotów i pojazdów bojowych. Złom tych metali zgromadzono w Zakładzie Przerobu Złomu w Rajsku koło Oświęcimia i oczekiwano na opracowanie technologii jego przerobu. Według szacunków ilość samego tylko złomu magnezu określono na kilka tysięcy ton [1]. W 1954 roku Instytut Odlewnictwa podjął się niełatwego zadania zagospodarowania tego złomu. W wyniku prac realizowanych na zlecenie Ministerstwa Hutnictwa i Centralnego Zarządu Przemysłu Metali Nieżelaznych, opracowano technologię produkcji odlewniczych stopów magnezu ze złomu, która była przeznaczona dla Zakładów Cynkowych w Trzebini, gdzie znajdował się oddział huty magnezu. Produkowano w nim magnez z krajowych dolomitów. W tym czasie (lata 50. XX w.) był to problem nowy, a jedynie w Niemczech prowadzono zaawansowane prace związane z recyklingiem tego tworzywa ze względu na zakaz produkcji hutniczych gatunków takich metali, jak aluminium i magnez [1]. Należy jednak zaznaczyć, że stosowane ówczesnie stopy magnezu nie były tak wysokiej czystości, jak obecnie. Charakteryzowały się one znacznie większym poziomem zanieczyszczeń takimi pierwiastkami, jak miedź, nikiel czy kadm, a pierwiastki ziem rzadkich, cyrkon czy wapń nie były w ogóle stosowane jako dodatki stopowe.

## 2. Recykling stopów magnezu

W chwili obecnej usystematyzowano podział złomu stopów magnezu. Powszechnie stosuje się 6 klas typów złomu magnezu [2]:

**Typ 1A** – wysokiej jakości czysty złom o znanym składzie chemicznym, bez zanieczyszczeń miedzią lub nikiem (np. odlewy brakowe, układy wlewowe, piętki);

**Typ 1B** – czysty złom o rozwiniętej powierzchni (np. odlewy o cienkich ściankach, ścinki z obróbki blach);

**Typ 2** – czysty złom zawierający wtopki stalowe lub aluminium, bez zanieczyszczenia miedzią lub jej stopami;

**Typ 3** – złom odlewniczy z/lub bez wtopek zawierających żelazo i/lub aluminium, bez zanieczyszczenia miedzią lub jej stopami;

**Typ 4** – brudny, tłusty, mokry, zaolejony złom, zawierający różne zanieczyszczenia (piasek, drobne kamyki), aluminium, miedź, żelazo. Jest to tak zwany złom po-amortyzacyjny – PCS (*post-consumer scrap*);

## 1. Introduction

The problem of recycling magnesium alloys was clearly seen in Poland after World War II. Large quantities of magnesium and aluminium alloys came mainly from military equipment, including aircraft and combat vehicles. This kind of scrap was collected in the processing facility in Rajsko near Oświęcim in anticipation of the proper processing technology. According to estimates, the amount of magnesium scrap alone was determined to be a few thousand tonnes [1]. In 1954 the Foundry Research Institute undertook the difficult task of managing this scrap. As a result of the work carried out on behalf of the Ministry of Metallurgy and the Central Management Office of Non-Ferrous Metals Industry, the technology of producing magnesium alloy castings from scrap was developed for the Zinc Works in Trzebinia – a branch of the magnesium foundry, where magnesium from Polish dolomite was produced. It was a new issue during this period (the 50s), as only Germany conducted advanced research on recycling this material because of the ban on the metallurgical production of such metals as aluminium and magnesium [1]. It should be noted, however, that magnesium alloys used at that time were not as pure as they are now. They were characterized by a significantly higher level of impurities such as copper, nickel or cadmium and rare earth elements, zirconium or calcium, were not used at all.

## 2. Recycling of magnesium alloys

The classification of magnesium scrap is currently divided into 6 classes commonly used [2]:

**Class 1A** – high grade clean scrap with known chemical composition, without copper or nickel impurities (e.g. scrap castings, runners, heels);

**Class 1B** – clean scrap with high surface area (e.g. thin walled castings, shreds from scrap metal processing);

**Class 2** – clean scrap with steel or aluminium inserts, without copper or copper alloys impurities;

**Class 3** – scrap castings with/without iron or aluminium inserts, without copper or copper alloys impurities;

**Class 4** – dirty, greasy, wet, oily scrap with various impurities (sand, tumbling beads), aluminium, copper, iron. This is the so-called post-consumer scrap;

**Class 5A** – scrap with clean and dry chips/shavings;

**Typ 5A** – złom zawierający czyste i suche wióry;

**Typ 5B** – złom zawierający oleiste, mokre wióry, szlam magnezowy pochodzący ze szlifowania i śrutowania;

**Typ 6A** – żużel, osady z dna tygla, niezawierające topników, krzemionki i piasku;

**Typ 6B** – żużel, osady z dna tygla, zawierające topniki, bez krzemionki i piasku.

**Class 5B** – scrap with oily, wet chips, magnesium sludge from grinding and shot-blasting;

**Class 6A** – slag, residues from the bottom of the crucible; flux, silica and sand free;

**Class 6B** – slag, residues from the bottom of the crucible; with flux; silica and sand free.

Głównym czynnikiem decydującym o konieczności recyklingu stopów magnezu jest oszczędność energii. Do wyprodukowania 1 kg magnezu potrzeba średnio 35 kWh, natomiast na odzysk tej samej ilości wystarcza 3 kWh [3].

Odzysk surowców wtórnych ze stopów magnezu, w pierwszej kolejności polega na zabezpieczeniu ich przed zanieczyszczeniem metalami ciężkimi, takimi jak: nikiel, miedź czy żelazo. Najskuteczniej można o to zadbać w samych odlewniach, w których odpowiednie segregowanie i składowanie odpadów zapobiega ich zanieczyszczeniu. Z tych względów stosunkowo efektywnie można je przetapiać we własnym zakresie.

Oczyszczanie złomu obiegowego sprawia dużo trudności, szczególnie wówczas, gdy chodzi o usunięcie z niego wymienionych wyżej szkodliwych metali. W przypadku zanieczyszczenia tymi metalami stop taki przeznaczony jest do odsiarczania surowki i stali oraz do produkcji żeliwa sferoidalnego. Problem sortowania, klasyfikacji i przechowywania stopów magnezu ma bardzo duże znaczenie [4].

Największe ilości odpadów ze stopów magnezu powstają przy produkcji odlewów. W zależności od technologii stanowią one od 40% do niemal 100% masy zalewanego stopu. Są to wszystkie elementy układu wlewowego oraz odlewy brakowe. Jest to odpad czysty (Typ 1) i powinien być wykorzystany w dalszej produkcji jako materiał wsadowy obok materiału pierwotnego.

Doświadczenia przemysłowe wskazują, że niekontrolowany dodatek złomu obiegowego do pieca topialnego bardzo często powoduje powstawanie twardych konglomeratów w objętości ciekłego metalu, które z czasem powodują utratę właściwości reologicznych stopu i w konsekwencji brak możliwości wykonywania odlewów. Dlatego też dodatek ten powinien być ściśle kontrolowany [5,6].

Wytrzymałość stopów odlewanych ciśnieniowo może przyjmować wysokie wartości, choć osiągnięta plastyczność jest relatywnie niska [7].

Przeprowadzone badania wpływu złomu obiegowego na właściwości mechaniczne odlewów ciśnieniowych wykazały jednak, że przez kontrolowany dodatek złomu obiegowego do stopu pierwotnego można uzyskać lepsze właściwości plastyczne niż w odlewach wykonywanych tylko ze stopów pierwotnych.

The main factor determining the need for recycling of magnesium alloys is energy saving. The production of 1 kg of magnesium needs an average of 35 kWh, while 3 kWh is sufficient for the recovery of the same amount of metal [3].

Recycling of magnesium alloys consists mainly in protecting them against contamination with heavy metals, such as nickel, copper and iron. This can be most effectively achieved in the foundries, where proper sorting and storage of waste prevents their contamination. For these reasons they can be efficiently melted in-house.

Cleaning of circulating scrap is very difficult, especially when it is necessary to remove the above-mentioned harmful metals. Alloys with such impurities are used for desulphurization of pig iron and steel and for the production of ductile iron. The issue of sorting, grading and storage of magnesium alloys is of great importance [4].

The largest amount of waste from magnesium alloys comes from the production of castings. Depending on the technology they make up 40% to almost 100% weight of poured alloy. These are all elements of runners and scrap castings. It is a clean waste (Class 1) and should be used in further production as feedstock next to original material.

Industrial experience shows that the uncontrolled addition of circulating scrap into the melting furnace very often results in the formation of hard conglomerates in the volume of liquid metal which, over time, cause the loss of rheological properties of the alloy and, consequently, failure to make castings. Therefore, this addition should be strictly controlled [5,6].

The strength of the die-casting alloys can assume high values, although the attained plasticity circulating scraps relatively low [7].

The conducted research concerning the effect of the circulating scrap on the mechanical properties of die-castings revealed, however, that the controlled addition of scrap to the primary alloy can improve plasticity than for castings made only with primary alloys.

### 3. Metodyka badań eksperymentalnych

Badania obejmowały dwa najczęściej stosowane gatunki stopów magnezu: AZ91 (MgAl9Zn1) i AM50 (MgAl5). Przeprowadzono serię eksperymentalnych wytopów z różną zawartością złomu obiegowego we wsadzie i wykonano odlewy stosując technologię odlewania pod wysokim ciśnieniem.

Skład chemiczny, wyjściowy badanych stopów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Skład chemiczny badanych stopów, % wag.

Table 1. The chemical compositions of the tested alloys, wt.%

Gatunek stopu / Alloy	Al	Zn	Mn	Fe	Be	Si	Cu	Ni	Mg
AZ91	10,00	0,73	0,22	0,0050	0,00800	0,010	0,0009	0,00090	reszta/ bal.
AM50	5,17	0,01	0,31	0,0025	0,00088	0,011	0,0014	0,00055	reszta/ bal.

Stanowisko badawcze składało się z poziomej, zimmokomorowej maszyny ciśnieniowej Bühler H160-BD2 o sile zwierania 1600 kN, pieca oporowego o pojemności około 15 kg Mg, urządzenia grzewczo-chłodzącego Regloplas 200 do stabilizacji temperatury formy ciśnieniowej oraz urządzenia kontrolno-pomiarowego do wizualizacji parametrów odlewania DATAPROCESS firmy FRECH.

Badania prowadzono przy następujących parametrach odlewania:

- prędkość tłoka prasującego w II fazie wtrysku: 2,0 m/s,
- prędkość metalu w szczelinie wlewowej: około 32,0 m/s,
- ciśnienie prasowania (II faza procesu): 40 MPa,
- temperatura metalu: 680–700°C,
- temperatura formy:
  - część stała: 210 ±5°C,
  - część ruchoma: 190 ±5°C.

Metal topiono w piecu tyglowym oporowym pod ochroną mieszaniny gazowej składającej się z około 0,2% obj. SF<sub>6</sub> i argonu. Do tygla nagrzanego do temperatury „czerwonego żaru”, tj. około 500°C, w pierwszej kolejności ładowano największe kawałki stopu pierwotnego (gąski), a do utworzonej po ich stopieniu kąpieli zanurzano złom obiegowy. Zarówno gąski, jak i złom wprowadzano do pieca po uprzednim ich podgrzaniu – gąski około 150°C, natomiast złom pochodzący z procesu odlewania ciśnieniowego na maszynach z poziomą komorą prasowania wstępnie wygrzewano w temperaturze 250–280°C w celu usunięcia sprężo-

### 3. Experimental procedure

The research included the two most commonly used magnesium alloys: AZ91 (MgAl9Zn1) and AM50 (MgAl5). A series of experimental melts with different circulating scrap content in the feedstock were performed and castings were made using the technology of high pressure die casting.

The initial chemical compositions (from the supply certificate of the ingots) of tested alloys is shown in Table 1.

The test stand consisted of the Bühler H160-BD2 horizontal cold chamber die-casting machine with 1600 kN locking force, a resistance furnace with capacity of about 15 kg Mg, Regloplas 200 heating and cooling unit to stabilize the die-casting temperature and DATAPROCESS measuring and control unit by FRECH company for the visualization of casting parameters.

The research was conducted with the following casting parameters:

- injector plunger speed in the 2nd stage of injection: 2.0 m/s,
- metal gate speed: ca. 32.0 m/s,
- moulding pressure (2nd process stage): 40 MPa,
- metal temperature: 680–700°C,
- mould temperature:
  - fixed half: 210 ±5°C,
  - movable half: 190 ±5°C.

Metal was melted in a resistance crucible furnace under a protective gas mixture consisting of SF<sub>6</sub> (about 0.2 vol.%) and argon. The crucible heated to a temperature of “red heat”, i.e. about 500°C, was loaded first with the largest pieces of the primary alloy (ingots), and to the bath formed from this charge after melting down, the process scrap was added. Both ingots and scrap were introduced into the furnace after previous preheating – ingots were preheated up to about 150°C, and scrap from the die casting process was held at 250–280°C to remove the gas compressed in the metal, and then it was reheated up to about 150°C before being inserted into the melt.

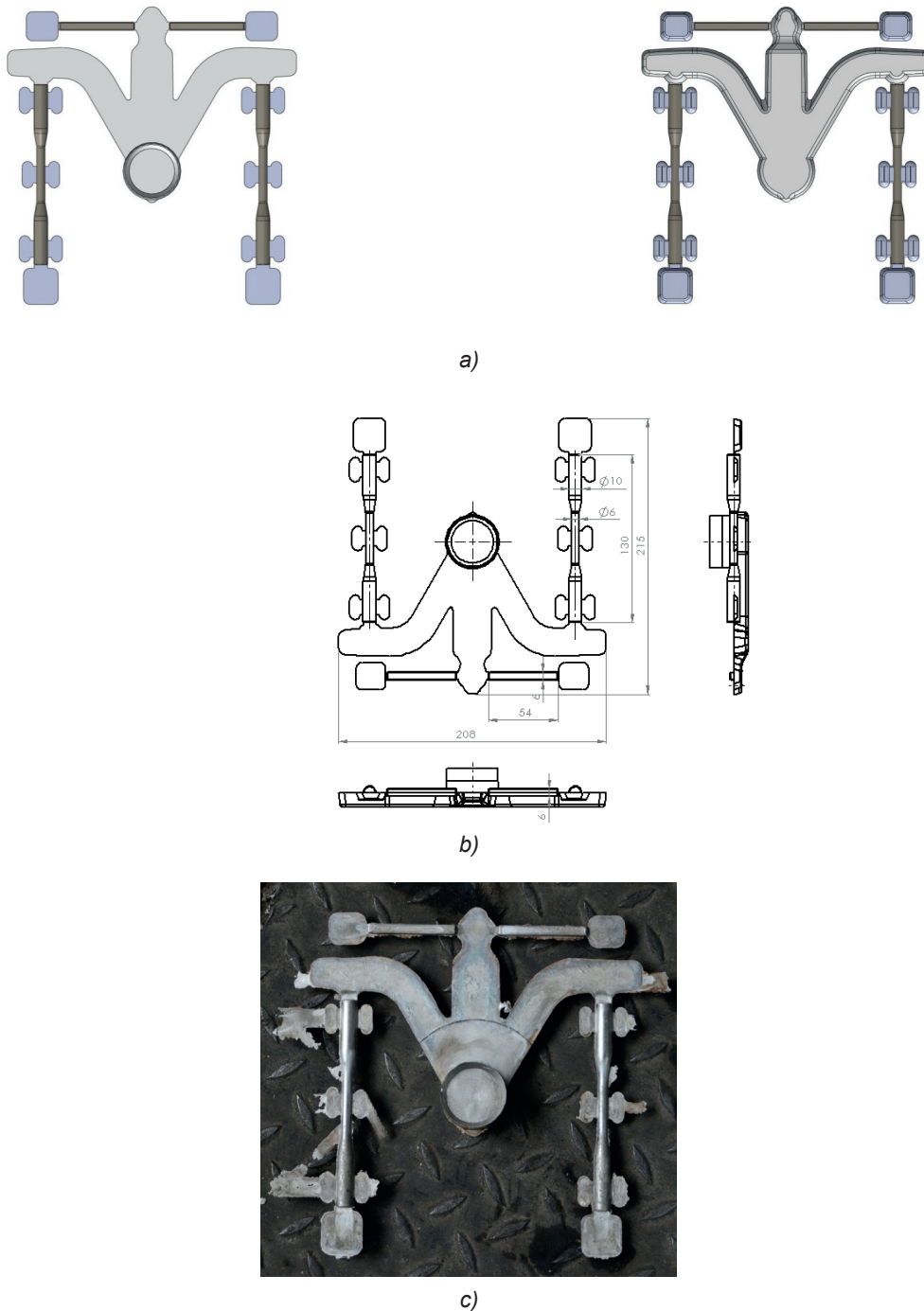
nych w nich gazów, po czym przed włożeniem ponownie podgrzewano do temperatury około 150°C.

Po osiągnięciu przez kąpiel metalową temperatury 720°C przystąpiono do odlewania.

Na [rysunku 1a](#) przedstawiono schemat odlewu próbek wytrzymałościowych, na [rysunku 1b](#) – wymiary próbek wytrzymałościowych, natomiast na [rysunku 1c](#) – surowy odlew.

After the metal bath temperature of 720°C has been reached casting can commence.

[Figure 1a](#) shows schematically casting of tensile specimens, [Figure 1b](#) shows tensile specimen dimensions and [Figure 1c](#) shows rough casting.



Rys. 1. a) Schemat odlewu próbek wytrzymałościowych wraz z układem wlewowym; b) odlew ciśnieniowy do badań właściwości mechanicznych, c) wymiary próbek wytrzymałościowych

Fig. 1. a) Schematic casting of tensile specimens with a runner, b) die casting of specimens for mechanical testing, c) rough casting

Wyniki badań zostały zweryfikowane w odlewni przemysłowej. Do prób wybrano odlew klamki, który był wykonywany na maszynie gorącomorowej w formie 12-wnękowej. Zastosowano następujące parametry technologiczne:

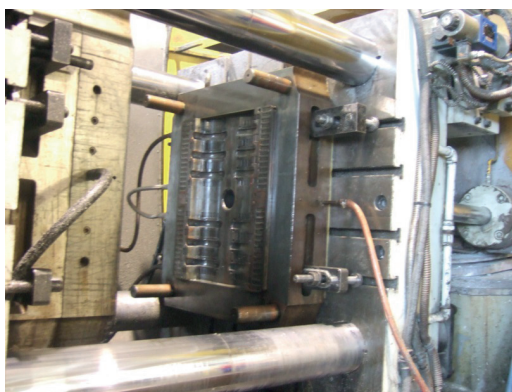
- średnia grubość ścianki odlewów: około 7,5 mm,
- masa odlewów z przelewami: 0,698 kg,
- przekrój szczeliny wlewowej dla 12 odlewów klamki: około 100 mm<sup>2</sup>,
- objętość odlewów z przelewami: 436,25 cm<sup>3</sup>,
- średnica komory wlewowej: 100 mm.

Wyznaczono z odpowiednich wzorów i nomogramów następujące wartości parametrów odlewania [7]:

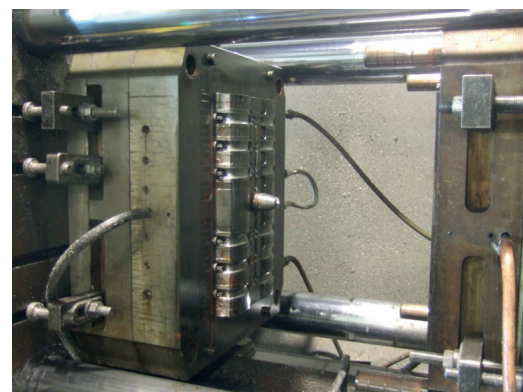
- czas wypełniania: około 0,095 s,
- prędkość tłoka prasującego w II fazie wtrysku: 0,8 m/s,
- prędkość metalu w szczelinie wlewowej: około 30 m/s,
- ciśnienie prasowania (II faza procesu): około 25 MPa,
- temperatura metalu: 675 ±5°C,
- temperatura formy:
  - część stała – 210 ±5°C,
  - część ruchoma – 190 ±5°C.

Badania przeprowadzono na poziomej, gorącomorowej maszynie ciśnieniowej QDCM 400 STANDARD.

Na rysunkach 2a i 2b przedstawiono stałą i ruchomą część formy.



a)



b)

Rys. 2. a) Stała część formy, b) ruchoma część formy

Fig. 2. a) The fixed half of the mould, b) the movable half of the mould

Parametry pracy maszyny ciśnieniowej (prędkość w poszczególnych fazach, czas narostu ciśnienia) oraz warunki cieplne procesu (temperatura metalu w piecu, obu części formy oraz dyszy) były nastawiane i kontrolowane za pomocą panelu sterującego, który umożliwiał również ich wizualizację.

The test results were verified in the foundry industry. Cast handles were chosen which were made in the form of a 12-cavity mould in a hot chamber machine and then selected for testing. The following technological parameters of die-casting were used (hot chamber machine):

- average wall thickness of casting: ca. 7.5 mm,
- weight of castings with overflows: 0.698 kg,
- gate slot cross-section for 12 handle castings: ca. 100 mm<sup>2</sup>,
- volume of castings with overflows: 436.25 cm<sup>3</sup>,
- filling chamber diameter: 100 mm.

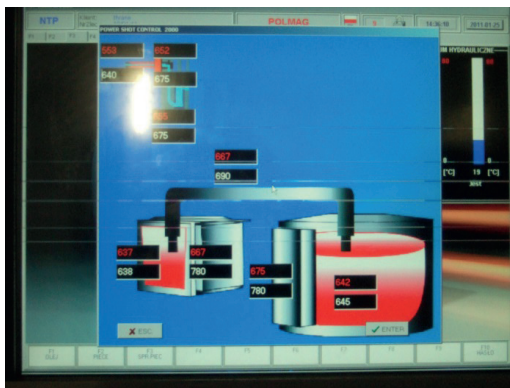
The following casting parameters values were determined from the relevant formulas and nomograms [7]:

- filling time: ca. 0.095 s,
- injector plunger speed in the 2nd stage of injection: 0.8 m/s,
- metal gate speed: ca. 30 m/s,
- moulding pressure (2nd process stage): ca. 25 MPa,
- metal temperature: 675 ±5°C,
- mould temperature:
  - fixed half – 210 ±5°C,
  - movable half – 190 ±5°C.

The research was conducted on the 400 QDCM STANDARD horizontal hot chamber high pressure die-casting machine.

Figures 2a and 2b show fixed and movable mould halves.

Operating parameters of the die-casting machine (speed in individual phases, pressure rise time) and process thermal conditions (temperature of metal in the furnace, both halves of the mould and the nozzle) were adjusted and controlled with the control panel, which also provided visualization of the data.



Rys. 3. Wizualizacja panelu sterującego parametrami cieplnymi procesu odlewania  
 Fig. 3. Panel controlling thermal parameters of the casting process

Na [rysunku 3](#) przedstawiono wizualizację parametrów temperatury ciekłego metalu zarówno w piecu topialnym, rurze syfonowej, jak i w piecu podgrzewczo-dozującym.

[Figure 3](#) shows the visualization of the temperature parameters of molten metal both in the melting furnace, siphon pipe and in the heating/dosing furnace.

#### 4. Wyniki i ich omówienie

Badania wpływu ilości złomu obiegowego we wsadzie stopów AZ91 i AM50 na właściwości mechaniczne ( $R_m$ ,  $R_{p0.2}$  i  $A_5$ ) odlewów ciśnieniowych przeprowadzono na próbkach otrzymanych tą technologią wytwarzania. Próba rozciągania w temperaturze pokojowej ( $\sim 20^\circ\text{C}$ ) przeprowadzona została na 5 próbkach okrągłych otrzymanych z odlewu ciśnieniowego (grubość ścianki odlewu 6 mm – [rys. 1a–c](#)) niepoddawanego w czasie wytopu zabiegowi rafinacji. Badania właściwości mechanicznych zostały przeprowadzone według normy PN-EN ISO 6892-1:2010, na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 5582.

Wyniki badań stopu AZ91 przedstawiono w [tabeli 2](#) i na [rysunkach 4–6](#) (przerywana linia odpowiada właściwościom mechanicznym stopu bez obecności złomu). W celu określenia wpływu ilości dodatku złomu obiegowego do stopu pierwotnego na właściwości mechaniczne odlewów ciśnieniowych wyniki poddano analizie statystycznej ([rys. 7, 8](#)).

Z danych przedstawionych w [tabeli 2](#) i na [rysunkach 4–6](#) wynika, że najlepsze właściwości mechaniczne uzyskuje się przy 30% wag. dodatku złomu obiegowego i przy 100% wag. jego zawartości. Wielkość współczynnika korelacji ([rys. 7](#)) wskazuje na zależność pomiędzy wydłużeniem  $A_5$  a wytrzymałością na rozciąganie w zależności od dodatku złomu obiegowego do stopu pierwotnego. Natomiast na niskim poziomie znajduje się współczynnik korelacji pomiędzy granicą plastyczności a wytrzymałością na rozciąganie ([rys. 8](#)).

Analogiczne badania przeprowadzono dla stopu AM50. Otrzymane wyniki przedstawiono w [tabeli 3](#) i na [rysunkach 9–13](#).

#### 4. Results and discussion

Research on the effect of the quantity of circulating scrap in the feedstock of AZ91 and AM50 alloys on the tensile properties ( $R_m$ ,  $R_{p0.2}$  and  $A_5$ ) of die castings was conducted on samples obtained as a result of this manufacturing technology. The tensile test at room temperature ( $\sim 20^\circ\text{C}$ ) was carried out on 5 round specimens obtained from the die-casting (6 mm casting wall thickness – [Fig. 1a–c](#)) not subjected to refining treatment. Research on the mechanical properties was conducted with an INSTRON 5582 testing machine according to PN-EN ISO 6892-1:2010.

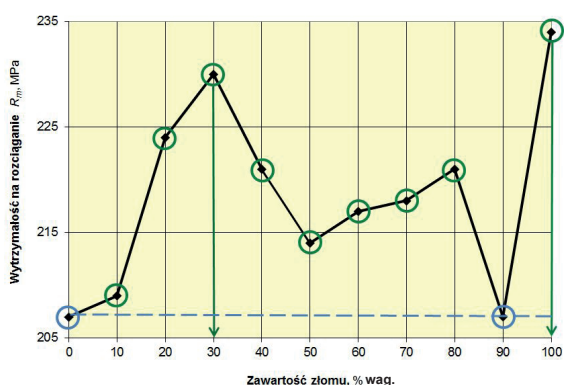
The results of AZ91 alloy testing are shown in [Table 2](#) and in [Figures 4–6](#) (the dashed line corresponds to mechanical properties of the alloy without the scrap). In order to determine the effect of the quantity of circulating scrap in addition to the primary alloy on the mechanical properties of die-castings, the results were subject to statistical analysis ([Figs. 7, 8](#)).

Data presented in [Figures 4–6](#) shows that the best mechanical properties are obtained with 30 wt.% addition of circulating scrap and 100 wt.% of its content. The value of the correlation coefficient ([Fig. 7](#)) indicates a strong relationship between the elongation  $A_5$  and tensile strength depending on the addition of circulating scrap to the primary alloy. The correlation coefficient between the yield and tensile strength is, however, low ([Fig. 8](#)).

A similar study was performed for the AM50 alloy. The results are shown in [Table 3](#) and in [Figures 9–13](#).

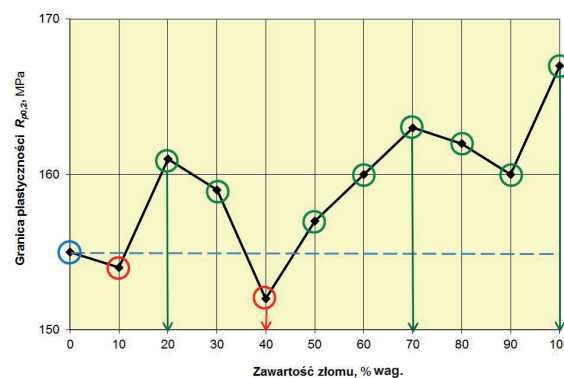
Tabela 2. Właściwości mechaniczne stopu AZ91 i jego odpowiednika wg normy EN 1753:1997  
 Table 2. Mechanical properties of AZ91 alloy and its equivalent according to EN 1753:1997

Lp. / No.	Zawartość złomu obiegowego, % wag. / The content of circulating scrap, wt. %	Właściwości mechaniczne / Mechanical properties*		
		$R_m$ , MPa	$R_{p0,2}$ , MPa	$A_5$ , %
1.	0	207	155	2,3
2.	10	209	154	2,1
3.	20	224	161	3,6
4.	30	230	159	3,9
5.	40	221	152	3,6
6.	50	214	157	2,8
7.	60	217	160	2,8
8.	70	218	163	2,8
9.	80	221	162	3,1
10.	90	207	160	2,0
11.	100	234	167	3,7
Stop EN-MC 21120 (wg EN 1753:1997) / Alloy EN-MC 21120 (according to EN 1753:1997)		200–260	140–170	1–6
* Niepewność oznaczenia: $R_m - 3,6$ MPa, $R_{p0,2} - 3,2$ MPa, $A_5 - 0,1\%$ / Uncertainty of determination: $R_m - 3.6$ MPa, $R_{p0,2} - 3.2$ MPa, $A_5 - 0.1\%$				



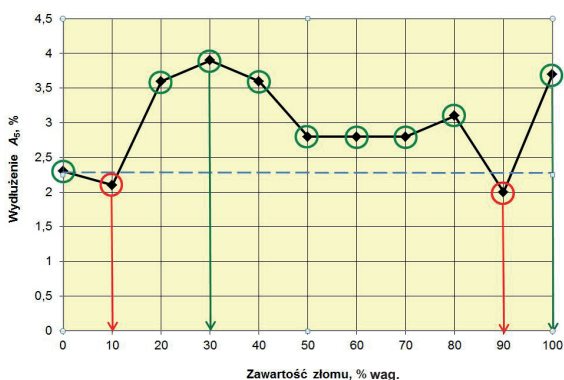
Rys. 4. Wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  w stopie AZ91 w zależności od zawartości złomu

Fig. 4. Tensile strength  $R_m$  in AZ91 alloy depending on the scrap content



Rys. 5. Granica plastyczności  $R_{p0,2}$  w stopie AZ91 w zależności od zawartości złomu

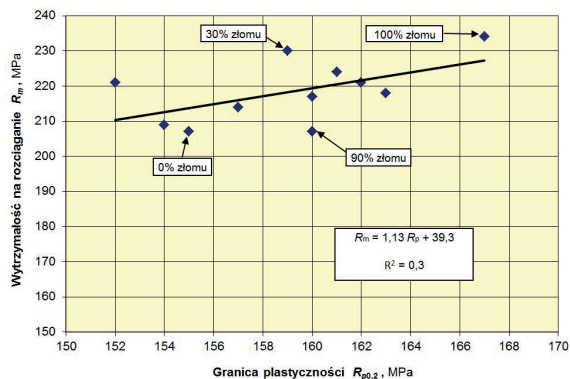
Fig. 5. Yield strength  $R_{p0,2}$  in AZ91 alloy depending on the scrap content



Rys. 6. Wydłużenie  $A_5$  w stopie AZ91 w zależności od zawartości złomu

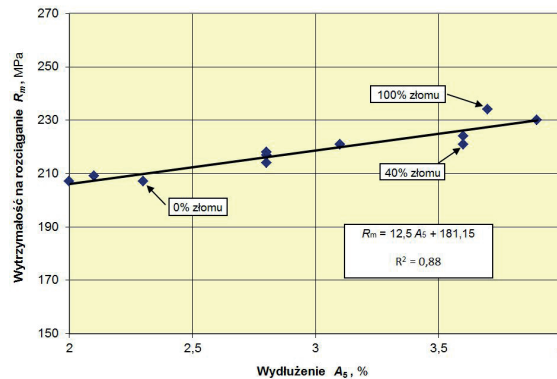
Fig. 6. Elongation  $A_5$  in AZ91 alloy depending on the scrap content





Rys. 7. Korelacja pomiędzy granicą plastyczności  $R_{p0,2}$  a wytrzymałością na rozciąganie  $R_m$  w stopie AZ91 w zależności od zawartości złomu

Fig. 7. Correlation between yield strength  $R_{p0,2}$  and tensile strength  $R_m$  in AZ91 alloy depending on the scrap content



Rys. 8. Korelacja pomiędzy wydłużeniem  $A_5$  a wytrzymałością na rozciąganie  $R_m$  w stopie AZ91 w zależności od zawartości złomu

Fig. 8. Correlation between elongation  $A_5$  and tensile strength  $R_m$  in AZ91 alloy depending on the scrap content

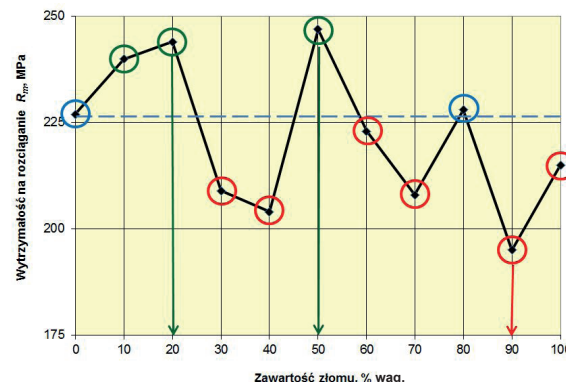
Tabela 3. Właściwości mechaniczne stopu AM50 i jego odpowiednika wg normy EN 1753:1997

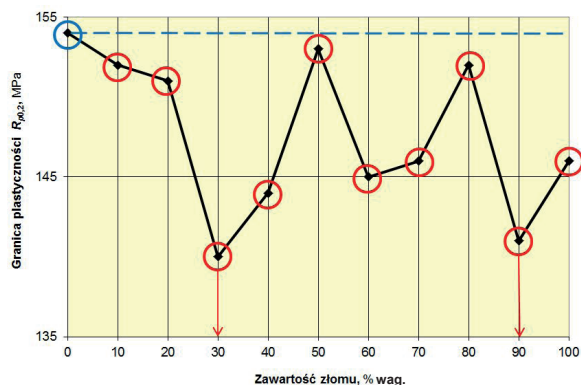
Table 3. Mechanical properties of AM50 alloy and its equivalent according to EN 1753:1997

Lp. / No.	Zawartość złomu obiegowego, % wag. / The content of circulating scrap, wt.%	Właściwości mechaniczne / Mechanical properties*		
		$R_m$ , MPa	$R_{p0,2}$ , MPa	$A_5$ , %
1.	0	227	154	6,0
2.	10	240	152	8,0
<b>3.</b>	<b>20</b>	<b>224</b>	<b>151</b>	<b>8,5</b>
4.	30	209	140	4,8
5.	40	204	144	3,6
<b>6.</b>	<b>50</b>	<b>247</b>	<b>153</b>	<b>8,7</b>
7.	60	223	145	6,6
8.	70	208	146	5,2
9.	80	228	152	6,6
10.	90	195	141	4,9
11.	100	215	146	6,5
Stop EN-MC 21120 (wg EN 1753:1997) / Alloy EN-MC 21120 (according to EN 1753:1997)		180-230	110-130	5-15
* Niepewność oznaczenia: $R_m - 4,11$ MPa, $R_{p0,2} - 3,54$ MPa, $A_5 - 0,16\%$ / Uncertainty of determination: $R_m - 4,11$ MPa, $R_{p0,2} - 3,54$ MPa, $A_5 - 0,16\%$				

Rys. 9. Wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  w stopie AM50 w zależności od zawartości złomu

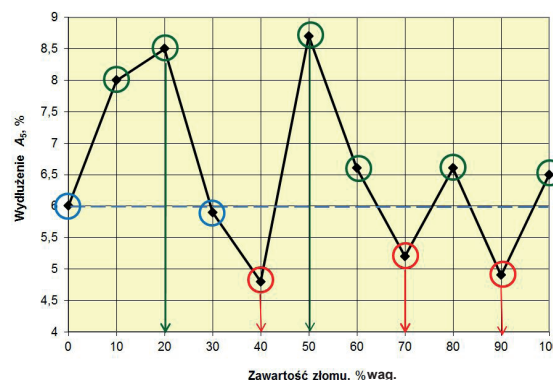
Fig. 9. Tensile strength  $R_m$  in AM50 alloy depending on the scrap content





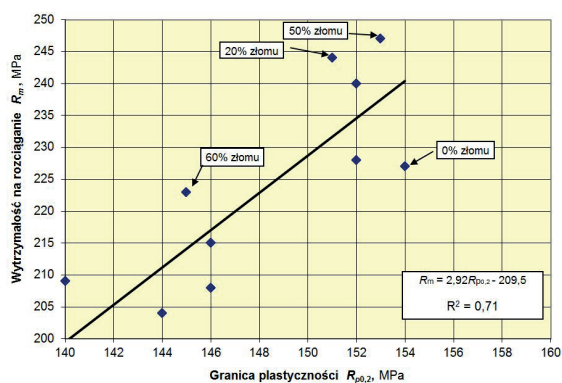
Rys. 10. Granica plastyczności  $R_{p0.2}$  w stopie AM50 w zależności od zawartości złomu

Fig. 10. Yield strength  $R_{p0.2}$  in AM50 alloy depending on the scrap content



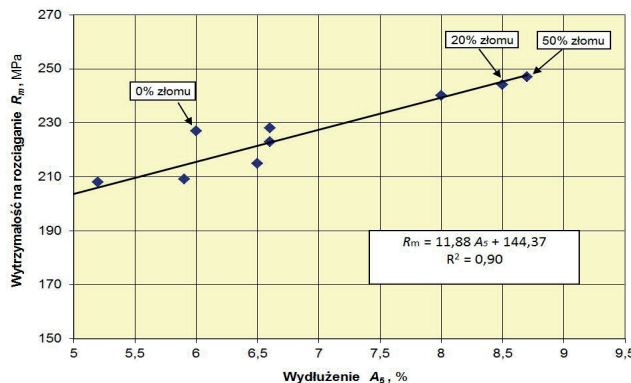
Rys. 11. Wydluzenie  $A_5$  w stopie AM50 w zależności od zawartości złomu

Fig. 11. Elongation  $A_5$  in AM50 alloy depending on the scrap content



Rys. 12. Korelacja pomiędzy granicą plastyczności  $R_{p0.2}$  a wytrzymałością na rozciąganie  $R_m$  w stopie AM50 w zależności od zawartości złomu

Fig. 12. Correlation between the yield strength  $R_{p0.2}$  and tensile strength  $R_m$  in AM50 alloy depending on the scrap content



Rys. 13. Korelacja pomiędzy wydluzeniem  $A_5$  a wytrzymałością na rozciąganie  $R_m$  w stopie AM50 w zależności od zawartości złomu

Fig. 13. Correlation between elongation  $A_5$  and tensile strength  $R_m$  in AM50 alloy depending on the scrap content

Z danych przedstawionych w tabeli 3 i na rysunkach 9–11 wynika, że najlepsze właściwości mechaniczne uzyskuje się przy 20% wag. i 50% wag. dodatku złomu obiegowego do stopu pierwotnego. Wartości współczynników korelacji (rys. 12 i 13) wskazują na zależność pomiędzy wydluzeniem  $A_5$ , granicą plastyczności  $R_{p0.2}$  a wytrzymałością na rozciąganie w zależności od dodatku złomu obiegowego do stopu pierwotnego.

W celu weryfikacji otrzymanych wyników badań w skali laboratoryjnej przeprowadzono badania w odlewni przemysłowej. Wykonano serię odlewów ciśnieniowych (odlew kłamki) ze stopu magnezu AZ91 z różną zawartością złomu obiegowego (0–100% wag.). Skład chemiczny badanego stopu przedstawiono w tabeli 4, a na rysunku 14 odlewy przeznaczone do badań mechanicznych i strukturalnych.

Z układu wlewowego otrzymanych odlewów wycięto płaskie próbki wytrzymałościowe. Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej

Data presented in Table 3 and Figures 9–11 shows that the best mechanical properties are obtained with 20 wt.% and 50 wt.% addition of circulating scrap to the primary alloy. The values of the correlation coefficients (Figs. 12, 13) indicate relationships between the elongation  $A_5$ , yield strength  $R_{p0.2}$  and tensile strength depending on the addition of circulating scrap to the primary alloy.

To verify the obtained results on a laboratory scale, tests were carried out at the foundry industry. A series of pressure die-castings (casting of the handle) were made from AZ91 Mg alloy with varying content of circulating scrap (0–100 wt.%). The chemical composition of the tested alloy is shown in Table 4, whereas Figure 14 shows castings designed for mechanical and structural tests.

From the runners flat tensile specimens were cut. The tests were carried out on an INSTRON 5582 testing machine at the Institute of Non-Ferrous Metals, Light

Instron 5582 w Instytucie Metali Nieżelaznych Oddział Metali Lekkich – Skawina wg PN-EN ISO 6892-1:2010, przy następujących parametrach: pierwsza prędkość – 5 MPa/s, druga prędkość – 2 mm/min, długość wymiarowa próbki – 30 mm. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 5, a porównanie wyników badań wytrzymałościowych odlewów ze stopu AZ91 otrzymanych w Instytucie Odlewnictwa i w przemyśle na rysunku 15.

Metals Division in Skawina according to PN-EN ISO 6892-1:2010, with the following parameters: first speed – 5 MPa/s, second speed – 2 mm/min, the measuring specimen length – 30 mm. The results are shown in Table 5. Figure 15 shows the comparison of the results of strength tests of AZ91 alloy castings obtained at the Foundry Research Institute and in industry.

Tabela 4. Skład chemiczny stopu AZ91, % wag.  
Table 4. The chemical composition of AZ91 alloy, wt.%

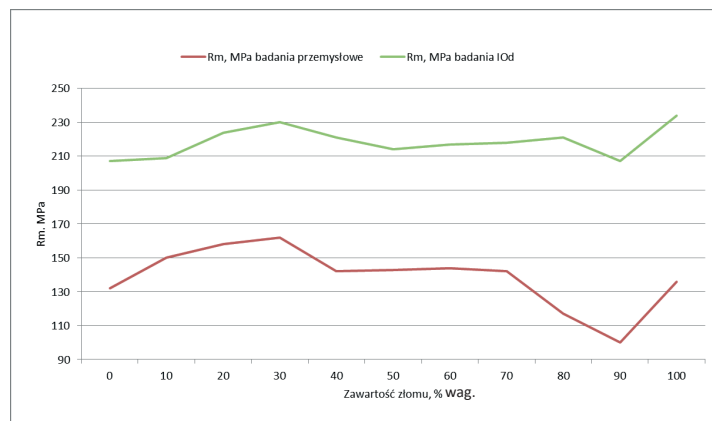
Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Be	Mg
9,12	0,61	0,196	0,292	0,001	0,0019	0,0007	0,001	reszta/bal.



Rys. 14. Odlewy przeznaczone do badań mechanicznych i strukturalnych  
Fig. 14. Castings for mechanical and structural testing

Tabela 5. Wytrzymałość i twardość badanego stopu AZ91 i jego odpowiednika wg normy EN 1753:1997  
Table 5. Strength and hardness of AZ91 alloy and its equivalent according to EN 1753:1997

Lp. / No.	Zawartość złomu, % wag. / Scrap content, wt.%	R <sub>m</sub> , MPa*	Twardość/ Hardness, HBW 5/250**
1.	0	132	95,3
2.	10	150	88,7
3.	20	158	91,7
<b>4.</b>	<b>30</b>	<b>162</b>	<b>92,2</b>
5.	40	142	92,1
6.	50	143	96,3
7.	60	144	92,3
8.	70	142	98,8
9.	80	117	98,3
10.	90	100	88,4
11.	100	136	97,2
Stop EN-MC 21120 (wg EN 1753:1997) / Alloy EN-MC 21120 (according to EN 1753:1997)		200–260	65–85
*Niepewność oznaczania: 1 MPa / Uncertainty of determination: 1 MPa **Pomiar twardości wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 6506-1:2006. Niepewność oznaczania: ±1,1 HBW / Hardness measurement was made according to PN-EN ISO 6506-1:2006. Uncertainty of determination: ±1.1 HBW			



Rys. 15. Porównawcze wyniki badań wytrzymałościowych odlewów ze stopu AZ91 otrzymanych w Instytucie Odlewnictwa (IOd) i w przemyśle

Fig. 15. Comparative results of strength tests of AZ91 alloy castings obtained at the Foundry Research Institute (FRI) and in the industry

Wyniki wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  otrzymane na próbkach wyciętych z odlewu (przemysłowych) znacząco odbiegają od wyników otrzymanych na próbkach wykonanych w IOd. Rozbieżności wynikają z faktu, że w IOd badane były próbki standardowe z naskórkiem odlewniczym, którego grubość sięga do około 0,8 mm i jest to warstwa odlewu o jednorodnej drobnoziarnistej strukturze, pozbawiona także porowatości gazowej, a więc najbardziej wytrzymała. Ponadto stop AZ91 stosowany w IOd różnił się nieznacznie od stopu odlewane w warunkach przemysłowych głównie zawartością Al i Zn – pierwiastkami, które zwiększają jego wytrzymałość i twardość. Należy jednak stwierdzić, że przebieg krzywych wytrzymałości w zależności od procentowego dodatku złomu obiegowego zachowuje w obu przypadkach podobny charakter.

## 5. Podsumowanie

O właściwościach odlewów w głównej mierze decyduje morfologia elementów składowych i ich rozmieszczenie w strukturze stopu. Można przyjąć, że im struktura drobniejsza, tym wyższe właściwości mechaniczne i użytkowe stopu. Zarodkami krystalizacji mogą być wtrącenia niemetaliczne powstające w silnie reaktywnych stopach magnezu podczas ich topienia i odlewania. Na podstawie wcześniej przeprowadzonych badań odlewów ze stopów AM50 i AZ91 zidentyfikowano jakościowo metodami: mikroanalizą rentgenowską (EDX) w skaningowej mikroskopii elektronowej, dyfraktometrii rentgenowskiej (XRD) oraz emisyjną spektrometrią optyczną wykorzystującą oprogramowanie „spark-dat”, wtrącenia niemetaliczne. W przeważającej ilości są to tlenki magnezu i tlenki aluminium oraz związki zawierające fluor, siarkę, sód, chlor i węgiel w postaci amorficznej, który jest głównym pierwiastkiem decydującym o efekcie modyfikacji [8].

The results of the tensile strength tests  $R_m$  obtained on specimens cut from industrial casting significantly deviate from the results obtained from samples taken from FRI. Discrepancies arise from the fact that FRI tested samples had casting skin of up to 0.8 mm thick. This is a casting layer that has a fine-grained uniform structure, devoid of gas porosity and thus the most durable. Moreover, AZ91 alloy used at FRI differed slightly from the alloy cast in industrial conditions, mainly by the contents of Al and Zn elements that enhance its strength and hardness. It should be noted, however, that the strength curves depending on the content level of circulating scrap remain similar in nature in both cases.

## 5. Conclusion

The properties of castings are mainly determined by the morphology and distribution of components in the alloy structure. It can be assumed that the more fine-grained the structure, the higher the mechanical and performance properties of the alloy. Nuclei of crystallisation can be formed by non-metallic inclusions generated in highly reactive magnesium alloys during melting and casting. Based on the earlier AM50 and AZ91 alloy casting research, these non-metallic inclusions were qualitatively identified using the following methods: energy dispersive X-ray microanalysis (EDX), X-Ray Diffraction Analysis (XRD) and optical emission spectrometry using the “spark-dat” software. Inclusions mostly include magnesium and aluminium oxides and compounds containing fluorine, sulphur, sodium, chlorine and amorphous carbon, which is the main element determines the modification effect [8].

Wyniki badań nad doбором optymalnej ilości złomu obiegowego we wsadzie na właściwości mechaniczne odlewów ciśnieniowych ze stopu AZ91 i AM50 przeprowadzone w Instytucie Odlewnictwa i w warunkach przemysłowych wskazują, że:

1. Dodatek złomu obiegowego do stopu pierwotnego poprawia właściwości mechaniczne odlewów z wyjątkiem zakresu dodatku złomu pomiędzy 70–90% wag.
2. Najkorzystniejszym dodatkiem złomu obiegowego z uwagi na właściwości mechaniczne jest w przypadku stopu: AZ91 – jego 30% wag. udział, natomiast dla stopu AM50 – 20% wag. lub 50% wag. Również w obu przypadkach korzystne jest wykonywanie odlewów w całości ze złomu obiegowego.
3. Wynikiem prac jest opracowanie skutecznej metody wykorzystania złomu obiegowego bez pogorszenia jakości odlewów z jednoczesnym wzrostem efektywności produkcji.

The results of the research on the effect of selecting optimum quantity of circulating scrap in the feedstock on the mechanical properties of AZ91 and AM50 alloy pressure die-castings carried out at the Foundry Research Institute and under industrial conditions indicate that:

1. The addition of circulating scrap to the primary alloy improves the mechanical properties of castings except for the scrap addition range of 70–90 wt.%.
2. Considering the mechanical properties, the most beneficial addition of circulating scrap to alloy casting is: for AZ91 alloy – 30 wt.% share; for AM50 alloy – 20 wt.% or 50 wt.% share. In both cases it is beneficial to make the whole casting out of circulating scrap.
3. The work results in developing an efficient method of using circulating scrap without compromising the quality of castings with a simultaneous increase in the production of cost-effectiveness.

## Podziękowania

Artykuł powstał na podstawie prac prowadzonych w ramach projektu strategicznego nr POIG.01.01.02-00-015/09 pt.: „Zaawansowane materiały i technologie ich wytwarzania” (zadanie VII.4.1 – Recykling złomu obiegowego odlewniczych stopów magnezu poprzez zastosowanie innowacyjnej metody endomodyfikacji).

Sposób modyfikacji stopów magnezu za pomocą złomu obiegowego, został zgłoszony do Urzędu Patentowego RP i uzyskał nr P.401537.

## Acknowledgements

This article is based on the work being performed under the strategic project – POIG. 01.01.02-00-015/09: “Advanced materials and production technologies” (Task VII. 4.1 – Recycling of Mg alloys circulating scrap through the use of the innovative endomodification method).

The method of modifying magnesium alloys with circulating scrap was submitted to the Polish Patent Office and registered under No. P.401537.

## Literatura/References

1. Lech Z., Korecki K. (1956). *Wytypowanie składów chemicznych odlewniczych stopów magnezu możliwych do otrzymania z krajowego złomu – metody przerobu złomu, produkcji gąsek i odlewanie*. Praca wykonana na zlecenie Ministerstwa Hutnictwa i Centralnego Zarządu Przemysłu Metali Nieżelaznych, 31.01.1956 r.
2. *Elektron Material Classifications*, www.magnesium-elektron.com [dostęp: 14.05.2014].
3. Galovsky U. (2003). Magnesium-Recykling – Stand der Technik und Blick in die Zukunft. *Giesserei*, 90(1), 48–53.
4. Dudek P., Fajkiel A., Reguła T., Saja K. (2009). Wybrane zagadnienia technologii przygotowania ciekłego stopu magnezu AZ91. *Prace Instytutu Odlewnictwa*, 49(1), 27–42.
5. Fajkiel A., Dudek P. (2014). Raport 7/7.4.1/7-8/2013 z realizacji projektu ZAMAT, Wisła 2014.
6. Fajkiel A., Dudek P., Reguła T., Lech-Grega M. (2012). Endomodification of magnesium alloys with process scrap. *Machines, Technologies, Materials*, 6(7), 80–83.
7. Dobrzański L.A. i in. (2012). Struktura i własności stopów Mg-Al-Zn. *Open Access Library*, 5(11).
8. Lech-Grega M., Mitka M., Morito M., Fajkiel A., Dudek P., Czekaj E. (2011). Badania składu chemicznego i fazowego złomu obiegowego stopów magnezu, [w:] *Innowacje w odlewnictwie ciśnieniowym*, cz. IV, Kraków: Instytut Odlewnictwa, 107–120.

