

Dr inż. Stanisław ZIÓŁKIEWICZ, mgr inż. Łukasz JANKOWSKI, Waldemar GRONOWSKI
Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań
E-mail: stziolk@inop.poznan.pl

Kształtowanie odlewniczego stopu magnezu AZ91 na tle prób wyciskania współbieżnego

Forming of casting magnesium alloy AZ91 against direct extrusion

Streszczenie

Stopy magnezu stają się coraz popularniejszym materiałem konstrukcyjnym wykorzystywanym w gospodarce. Przyczyną tego jest między innymi korzystny stosunek własności wytrzymałościowych do masy, wykorzystywany w przemyśle motoryzacyjnym oraz zdolności stopów magnezu do tłumienia zakłóceń o źródle elektromagnetycznym, co wykorzystywane jest w zaawansowanych technologiach teleinformatycznych. Najczęściej wykorzystuje się stopy odlewnicze z grupy AZ (Magnez-Aluminium-Cynk) i AM (Magnez-Aluminium-Mangan). Poszukuje się jednak nowych metod wytwarzania, które pozwalają na podniesienie własności użytkowych wyrobów. Taką technologią jest obróbka plastyczna, która poprzez zmianę formy wpływa znacząco na zmianę struktury, a tym samym na własności kształtowanych metali. W artykule podjęto problem przeróbki plastycznej trudno odkształcalnego stopu magnezu z grupy AZ. Celem prac było przeprowadzenie badań technologicznych możliwości odkształcalności stopu AZ91. Badania prowadzono na surowych wlewkach w procesie wyciskania współbieżnego prętów, w zakresie temperatur 280-360°C, na stanowisku prasy hydraulicznej wyposażonej w specjalny przyrząd z układem grzewczym narzędzi. W artykule przedstawiono napotkane w trakcie realizacji badań wady w wytwarzanych prętach oraz metody poszukiwania rozwiązań optymalnego procesu technologicznego. W wyniku realizacji badań stwierdzono, że istotnym elementem procesu technologicznego jest stan wyjściowy wsadu. Wsad przed procesem wyciskania musi zostać poddany przesycaaniu w celu rozpuszczenia się kruchej fazy $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$. Stwierdzono również, że istnieje możliwość wyciskania współbieżnego do postaci prętów w bardzo wąskim zakresie temperatur 290±10°C.

Abstract

Magnesium alloys are more and more popular constructional materials used in the economy. Among other things, reasons for that include an advantageous relation of mechanical properties to the mass, used in the automotive industry, and the abilities of magnesium alloys to suppress electromagnetic noises what is used in advanced tele-information technologies. The casting alloys included in the group AZ (Magnesium-Aluminium-Zinc) and AM (Magnesium-Aluminium-Manganese) are used most often. However, new manufacturing methods that allow to improve operational properties of products are searched for. Such a technology is a plastic forming that through a change of the form affects significantly the change of structure, therefore, the properties of formed metals. The article brings up a problem of plastic working of hard deformable magnesium alloy included in the group AZ. The purpose of these researches was to perform technological tests of deformability capabilities of alloy AZ91. The tests were performed using raw ingots in the process of direct extrusion of the bars, within the range of temperatures of 280-360°C, on a station of hydraulic press equipped with a special instrument with heating tool system. The article presents defects in manufactured bars, met during the realization of researches, and methods of searching for solutions of optimal technological process. As a result of the realization of researches, it is stated that an essential element of technological process is an initial state of charge. Prior to the extrusion process the charge must be subjected to solution heat treatment in order to dissolve a brittle phase $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$. It is also stated that there is a possibility of direct extrusion to the form of bars within a very narrow range of temperatures of 290±10°C.

Słowa kluczowe: stop magnezu AZ91, wyciskanie współbieżne, plastyczność

Keywords: magnesium alloy AZ91, direct extrusion, plasticity

1. WSTĘP

Do największych zalet stopów magnezu zaliczyć należy: wysoką wytrzymałość w stosunku do małego ciężaru właściwego, stabilność wymiarową oraz wysoki stopień zdolności do recyklingu. W ciągu ostatniej dekady zainteresowanie zastosowaniami stopów magnezu w przemyśle wzrosło znacząco, podobnie jak i stan wiedzy na temat tych stopów. Znajdują one zastosowanie w przemyśle samochodowym, lotniczym, kosmicznym oraz wszędzie tam, gdzie istotne jest pogodzenie wymagań wysokiej wytrzymałości z zapewnieniem niskiej masy produktu.

Dostępne handlowo stopy magnezu to stopy serii AZ, AM, EZ, ZK oraz WE, w większości jako stopy odlewnicze [1]. Jednak w coraz większym stopniu poszukuje się metod podniesienia własności stopów magnezu m.in. przez przeróbkę plastyczną.

Najpopularniejszym odlewniczym stopem magnezu jest AZ91 [1]. Głównymi składnikami stopowymi są: aluminium, cynk i mangan. Aluminium podnosi twardość i wytrzymałość na rozciąganie oraz poprawia własności lejne, cynk wytrzymałość w temperaturze pokojowej, a mangan zwiększa odporność na korozję [2]. Stop AZ91 ma dobre właściwości wytrzymałościowe i dobrą lejność, jednakże stosunkowo duża zawartość aluminium znacząco wpływa na plastyczność wynikająca z występowania kruchej fazy - $Mg_{17}Al_{12}$ na granicach ziaren [4].

Stop AZ91 jest stopem umacnianym wydzieleniowo. Efekt umocnienia w dużej mierze zależy od rodzaju faz wydzieleni, ich wielkości i stopnia dyspersyjności [3]. Stopy te charakteryzują się mocno nieregularną strukturą dendrytyczną, która stanowi przyczynę wielu wad wyrobów [3].

W celu poprawy własności strukturalnych i mechanicznych podjęto w Instytucie Obróbki Plastycznej badania możliwości odkształcenia plastycznego stopu AZ91. Przyjęto hipotezę, że poprzez odpowiedni dobór obróbki cieplnej wsadu i parametrów technologicznych procesu wyciskania możliwe będzie poprawienie własności stopu.

1. INTRODUCTION

The most important advantages of magnesium include: high strength in relation to small specific density, dimensional stability and high recycling ability degree. Within the last decade an interest in applications of magnesium alloys in the industry has significantly grown just like a state of the knowledge about these alloys. They are used in the automobile, aerospace, space industry and in the applications where it is essential to reconcile high strength requirements with assurance of low product mass.

Commercially available magnesium alloys include the alloys of series AZ, AM, EZ, ZK and WE, mostly as casting alloys [1]. However, improvement methods of magnesium alloy properties, among other things, through plastic working, are searched for to a higher and higher degree.

The most popular casting magnesium alloy is AZ91 [1]. The main alloy components are: aluminium, zinc and manganese. Aluminium improves hardness and tensile strength and enhances casting properties, zinc increases strength at the ambient temperature and manganese improves corrosion resistance [2]. The alloy AZ91 has good mechanical properties and good castability, however, a relative large aluminium content affects significantly plasticity resulting from occurrence of brittle phase - $Mg_{17}Al_{12}$ on the boundaries of grains [4].

The alloy AZ91 is a precipitation strengthening alloy. A strengthening effect depends to a large extent on a kind of phases of precipitations, their size and dispersion degree [3]. These alloys are characterized by a strongly irregular dendritic structure that is a reason for many defects of products [3].

In order to improve structural and mechanical properties the Plastic Forming Institute started to test plastic strain capabilities of alloy AZ91. It was made an assumption that by a proper selection of thermal treatment of the charge and technological parameters of the extrusion process it is possible to improve the alloy properties.

2. METODYKA BADAŃ

Materiałem zastosowanym do badań był odlewniczy stop magnezu AZ91 o składzie chemicznym przedstawionym w tabeli 1.

Do badań przyjęto wycięte z gąski próbki cylindryczne o wymiarach $\text{Ø}39,8 \times 40$ mm i strukturze pokazanej na rysunku 1, jak opisano w [6].

2. TEST METHODOLOGY

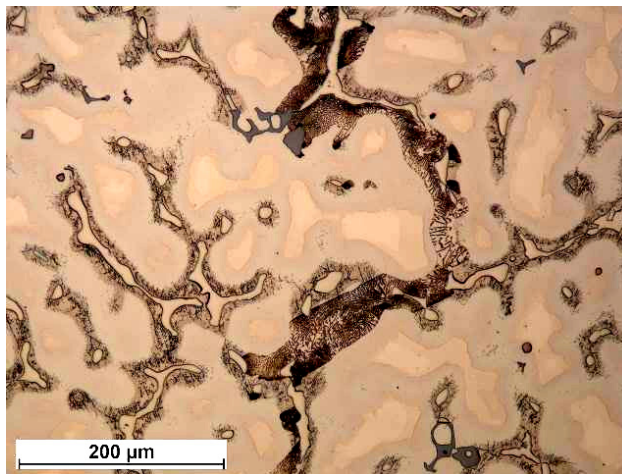
The tested material was a casting magnesium alloy AZ91 with chemical composition presented in Table 1.

Cylindrical samples, cut out from a pig sow, with dimensions of $\text{Ø}39.8 \times 40$ mm and structure shown in Figure 1, as described in [6], were used in the tests.

Tabela 1. Skład chemiczny stopu AZ91

Table 1. Chemical composition of alloy AZ91

Skład chemiczny stopu AZ91 [wag. %]								
Chemical composition of alloy AZ91 [% by weigh]								
Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Be	Ni	Mg
9,03	0,6	0,2	0,0026	0,0023	0,0016	0,0011	0,00062	reszta rest



Rys. 1. Struktura wyjściowa stopu AZ91 w stanie dostawy [6]

Fig. 1. Initial structure of alloy AZ91 in delivery state [6]

Proces wyciskania prowadzono w matrycach o średnicach oczka kształtującego $\text{Ø}12$, $\text{Ø}16$ oraz $\text{Ø}20$ mm dla których wartość odkształcenia względnego wynosi odpowiednio $\varepsilon = 91\%$, $\varepsilon = 84\%$ i $\varepsilon = 75\%$. Badania realizowano na stanowisku badawczym wyposażonym w prasę PYE-250, na której zamocowano przyrząd do wyciskania z grzanym recypientem. Siłę procesu wyciskania mierzono siłomierzem typu C6A zamontowanym bezpośrednio na stemple, a drogę stempla czujnikiem drogi typu WA500. Rejestracja danych odbywała się za pomocą wzmacniacza pomiarowego Spider 8 z oprogramowaniem rejestrującym Catman.

The extrusion process was performed in dies with forming diameters of $\text{Ø}12$, $\text{Ø}16$ and $\text{Ø}20$ mm for which the value of relative strain is accordingly $\varepsilon = 91\%$, $\varepsilon = 84\%$ and $\varepsilon = 75\%$. The tests were realized on a test stand equipped with the press PYE-250 on which an instrument for the extrusion with heated recipient was installed. The extrusion process force was measured by C6A-type force gauge mounted directly to a punch and the punch travel was measured by WA500-type travel sensor. The data were recorded by means of measuring amplifier Spider 8 with recording software Catman.

Badania obejmowały dwa stany materiału wyjściowego: w stanie dostawy (wlewka) oraz po obróbce cieplnej. Obróbkę cieplną wsadu prowadzono w temperaturze 418°C w czasie 10 godzin, a następnie wsad schłodzono w azocie. Celem zastosowania obróbki cieplnej było rozpuszczenie wydzieliń kruchej fazy $Mg_{17}Al_{12}$.

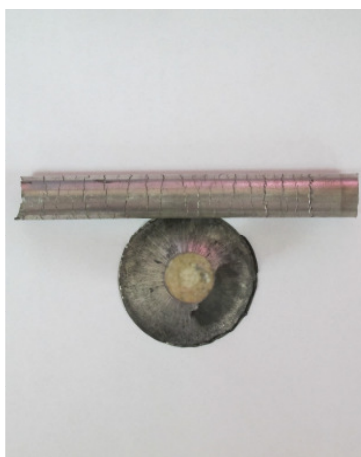
3. PRÓBY TECHNOLOGICZNE

W pierwszej fazie badań prowadzono proces wyciskania stopu magnezu AZ91 z próbek wykonanych bezpośrednio z gąski odlewniczej. Próbkę wyciskano z odkształceniem względnym $\varepsilon = 91\%$ w zakresie temperatur 310-380°C. Wyciskane próbki charakteryzowały się dwoma strefami: strefą pierwszą – początek wyciskania, gdzie nie obserwowano pęknięć oraz strefą drugą z występującymi pęknięciami poprzecznymi aż do końca procesu wyciskania. Długość odcinka bez pęknięć zależna była od temperatury. Im niższa temperatura tym strefa bez widocznych pęknięć zewnętrznych była dłuższa. Zastosowanie chłodzenia na pobocznicę wyciśniętego pręta spowodowało zwiększenie pęknięć aż do całkowitego rozdzielenia wyciskanego metalu (rys. 2).

The tests included two states of initial materials: in delivery state (ingot) and after heat treatment. The heat treatment of the charge was performed at the temperature 418°C for 10 hours, then the charge was cooled in nitrogen. The purpose of heat treatment was to dissolve brittle phase precipitations $Mg_{17}Al_{12}$.

3. TECHNOLOGICAL TESTS

The extrusion process of magnesium alloy AZ91 from samples taken directly from the casting ingot was performed in the first stage of the tests. The samples were extruded with a relative strain of $\varepsilon = 91\%$ within the range of temperatures of 310-380°C. The extruded samples were characterized by two zones: the first zone – the start of the extrusion, where cracks were not observed, and the second zone with transversal cracks till the end of the extrusion process. The length of section without cracks depended on the temperature. The lower temperature, the longer zone without visual external cracks was. The use of cooling on the side surface of extruded bar caused an increase of cracks till a complete separation of extruded metal (fig. 2).



Rys. 2. Makropęknięcia na powierzchni pręta $\varnothing 12$ wyciskanego z próbki pobranej bezpośrednio z gąski odlewniczej i chłodzonej bezpośrednio po procesie wyciskania

Fig. 2. Macrocracks on surface of bar $\varnothing 12$ extruded from sample taken directly from casting pig sow and cooled directly after extrusion process



Rys. 3. Widok wyciśniętych próbek w zależności od temperatury procesu wyciskania: a, b) 335°C, c) 330°C, d) 320°C, e) 315°C, f) 305°C

Fig. 3. View of extruded samples depending on temperature of extrusion process: a, b) 335°C, c) 330°C, d) 320°C, e) 315°C, f) 305°C

Wraz ze zmniejszaniem temperatury początkowej wsadu obserwowano podczas wyciskania coraz drobniejsze pęknięcia na powierzchni wyciśniętego pręta (rys. 3). Nie udało się jednak uzyskać prętów całkowicie pozbawionych tej wady.

Zmniejszenie wartości odkształcenia względnego procesu wyciskania do $\varepsilon = 75\%$ w temperaturze 360°C prowadziło do występowania pęknięć poprzecznych na powierzchni wyciśniętego pręta. Zaobserwowano jednak wzrost długości strefy początkowej, w której nie obserwowano pęknięć. Obniżanie temperatury wyciskania do zakresu 280-300°C przyczyniło się do eliminacji pęknięć na powierzchni pręta (rys. 4) i pozwoliło na ustabilizowanie procesu wyciskania w zakresie temperatur 280-360°C.

Stwierdzono jednak, że przy tych parametrach odkształcania powstają wady wewnętrzne polegające na nieciągłości materiału w postaci jam (rys. 5). Wady te charakterystyczne są w procesie wyciskania i spowodowane są wysokimi naprężeniami połączonymi z występowaniem wewnętrznych wad materiałowych.

Smaller and smaller cracks were observed on the surface of extruded bar (fig. 3) during the extrusion with decreased initial temperature of the charge. However, it failed to obtain the bars without this defect.

The reduction of relative strain value of the extrusion process to $\varepsilon = 75\%$ at the temperature of 360°C led to occurrence of transversal cracks on the surface of extruded bar. However, it was noticed a growth of the length of initial zone in which the cracks were not observed. The reduction of the extrusion temperature to the range of 280-300°C contributed to the elimination of cracks on the bar surface (fig. 4) and allowed to stabilize the extrusion process within the range of temperatures of 280-360°C.

However, it was stated that internal defects consisting in the material discontinuity in the form of pits jam are formed at these strain parameters (fig. 5). These defects are characteristic in the extrusion process and they are caused by high stresses connected with occurrence of internal material defects.



Rys. 4. Wynik wyciskania z odkształceniem względnym $\varepsilon = 75\%$ w temperaturze: a) 280°C i b) 360°C
 Fig. 4. Result of extrusion with relative strain of $\varepsilon = 75\%$ at temperature: a) 280°C and b) 360°C



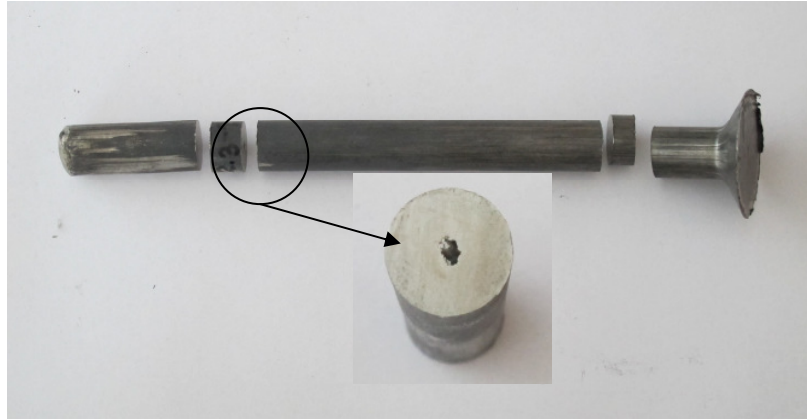
Rys. 5. Wady wewnętrzne prętów wyciśniętych z odkształceniem względnym $\varepsilon = 75\%$ w temperaturze 280°C
 Fig. 5. Internal defects of bars extruded with relative strain of $\varepsilon = 75\%$ at temperature of 280°C

Zgodnie z [5] aby zapobiec powstawianiu wewnętrznych pustek wystarczająca jest zmiana takich parametrów jak: odkształcenie i prędkość odkształcenia, geometria narzędzi, rodzaj smarowania i temperatura. Dlatego w dalszych badaniach przyjęto zmianę odkształcenia względnego do wartości $\varepsilon = 84\%$.

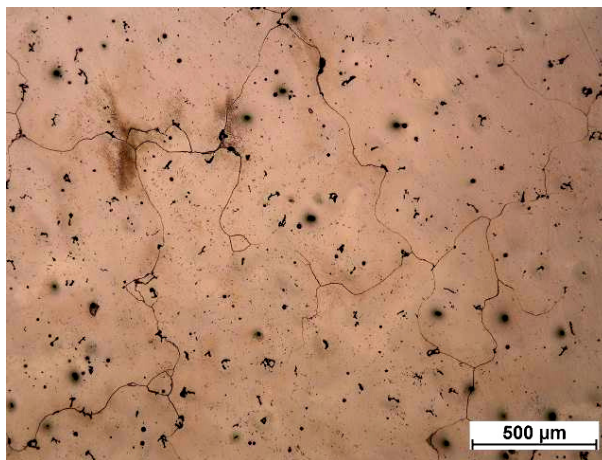
Na rysunku 6 pokazano wynik wyciskania prętów z wsadu pobranego z gąski odlewniczej z odkształceniem względnym $\varepsilon = 84\%$ z temperaturze 290°C. W efekcie procesu wyciskania, podobnie jak przy odkształceniu $\varepsilon = 75\%$ zaobserwowano wewnętrzne wady w postaci pustek, jednak o znacznie mniejszym przekroju.

According to [5] in order to prevent the formation of internal voids it is sufficient to change such parameters as: strain and strain rate, geometry of tools, kind of lubrication and temperature. Therefore in the further tests a change of relative strain to the value of $\varepsilon = 84\%$ was assumed.

The results of the extrusion of the bars from the charge taken from the casting ingot with the relative strain of $\varepsilon = 84\%$ at the temperature of 290°C F are shown in Figure 6. As a result of the extrusion process, just like at the strain of $\varepsilon = 75\%$, the internal in the form of voids, however, characterized by significantly smaller diameter, were observed.



Rys. 6. Wada wewnętrzna przy wyciskaniu prętów z wielkością odkształcenia $\varepsilon = 84\%$ z temperatury 290°C
 Fig. 6. Internal defect at extrusion of bars with strain of $\varepsilon = 84\%$ at temperature of 290°C



Rys. 7. Struktura w środkowej części wlewka ze stopu AZ91 po przesycaniu w warunkach: $430^{\circ}\text{C}/12$ godzin/ chłodzenie azotem

Fig. 7. Structure in middle part of ingot from alloy AZ91 after solution heat treatment in conditions: $430^{\circ}\text{C}/12$ hours/ nitrogen cooling

Należy przypuszczać, że przyczyną powstawania tego typu wad są płytkowe wydzielenia fazy $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ na granicach ziaren dendrytów fazy $\alpha\text{-Mg}$, jakie obserwujemy w strukturze wlewka surowego (rys. 1) opisanych w [6].

W celu potwierdzenia tej hipotezy przeprowadzono proces obróbki cieplnej wlewków. Obróbka cieplna polegała na przesyceniu z temperatury 430°C w czasie 12 godzin. W efekcie nastąpiło rozpuszczenie fazy $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ z jednoczesnym nierównomiernym rozrostem ziaren fazy $\alpha\text{-Mg}$ (rys. 7).

Na rysunku 8 pokazano wyniki badań wyciskania prętów ze stopu AZ91 po przesycaniu w temperaturze 430°C i czasie 12 godzin, a następnie chłodzeniu azotem.

It is to be supposed that reasons for the formation of such a type of defects are precipitations of plate of the phase $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ on the boundaries of grains of dendrites of the phase $\alpha\text{-Mg}$ which are observed in the structure of raw ingot (fig. 1) described in [6].

In order to confirm this assumption the heat treatment process of ingots was performed. The heat treatment consisted in the solution heat treatment from the temperature of 430°C for 12 hours. In effect, a dissolution of the phase $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ together with a simultaneous uneven growth of grains of the phase $\alpha\text{-Mg}$ (fig. 7) took place.

The test results of the extrusion of the bars from the alloy AZ91 after solution heat treatment at the temperature of 430°C for 12 hours and nitrogen cooling are shown in Figure 8.



Rys. 8. Widok wyciśniętych próbek w zależności od temperatury procesu wyciskania: a) 280°C, b) 290°C, c i d) 300°C, e) 320°C, f) 340°C

Fig. 8. View of extruded samples depending on temperature of extrusion process: a) 280°C, b) 290°C, c and d) 300°C, e) 320°C, f) 340°C

Podobnie jak we wcześniejszych przypadkach, kształtowanie z temperatury powyżej 300°C powoduje powstawanie pęknięć poprzecznych na poboczniczy wyciśniętego pręta. Próbki prętów wyciskane poniżej temperatury 300°C nie wykazują pęknięć oraz wad wewnętrznych. W temperaturze 300°C obserwuje się niestabilne zachowanie metalu podczas wyciskania. Dla pierwszych próbek na powierzchni wyciśniętego pręta nie obserwuje się pęknięć (rys. 8d), zaś dla następnych próbek obserwuje się pęknięcia na powierzchni (8c). Świadczy to o granicznej temperaturze procesu wyciskania, od której obserwuje się powstawanie pęknięć cieplnych, w postaci pęknięć prostopadłych do osi wyciśniętego pręta.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wskazują na ograniczone możliwości kształtowania plastycznego stopu magnezu AZ91. Mimo ogólnych zaleceń kształtowania stopów magnezu w zakresie temperatur około 300-380°C, badany stop wykazuje tendencje do pęknięć cieplnych objawiających się pęknięciami przebiegającymi prostopadle do osi wyciśniętego pręta.

Like in earlier cases the formation at the temperature exceeded 300°C causes occurrence of transversal cracks on the side surface of extruded bar. The samples of the bars extruded at the temperature less than 300°C do not show cracks and internal defects. An unstable metal behaviour is observed during the extrusion at the temperature of 300°C. The cracks are not observed on the surface of extruded bar as to the first samples (fig. 8d) but they are observed on the surface as to the next samples (8c). This is evidence of the boundary extrusion process temperature at which the formation of thermal cracks, in the form of cracks perpendicular to the extruded bar axis is observed.

4. SUMMARY

The performed tests show limited plastic forming capabilities of magnesium alloy AZ91. Despite general forming recommendations related to magnesium alloys within the range of temperatures of about 300-380°C the tested alloy shows a tendency to thermal cracks in the form of the cracks perpendicular to the extruded bar axis.

Optymalną temperaturą kształtowania stopu AZ91 jest bardzo wąski zakres temperatur $290\pm 10^{\circ}\text{C}$. Powyżej tego zakresu mamy do czynienia z pęknięciami cieplnymi, poniżej z mikropęknięciami na granicy ziaren [6].

Głównym problemem w kształtowaniu stopu AZ91 jest tworzenie się kruchej fazy $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$. Jest ona przyczyną wewnętrznych pustek podczas wyciskania. Zastosowanie przesycania bezpośrednio przed procesem wyciskania, w którym następuje rozpuszczenie się fazy $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$, pozwala na kształtowanie plastyczne stopu AZ91. Negatywnym zjawiskiem przesycania jest niekontrolowany rozrost ziaren fazy $\alpha\text{-Mg}$.

Badania przeprowadzono w ramach projektu rozwojowego Nr 15014010 pt. „Niskotemperaturowe kształtowanie metodami obróbki plastycznej wyrobów z trudno odkształcalnych stopów lekkich” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju ze środków publicznych na naukę.

The optimal forming temperature for the alloy AZ91 is a very narrow range of temperatures of $290\pm 10^{\circ}\text{C}$. Above this range there are thermal cracks, below this range there are microcracks on the boundary of grains [6].

The formation of brittle phase $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ is a main problem connected with the alloy AZ91 forming. It is a reason for internal voids during the extrusion. The use of solution heat treatment directly prior to the extrusion process in which a dissolution of the phase $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ takes place enables the plastic forming of the alloy AZ91. A negative phenomenon of solution heat treatment in an uncontrolled growth of the grains of the phase $\alpha\text{-Mg}$.

Studies were conducted within the framework of development project No. 15014010 titled “Low-temperature forming of products made from hard-deformable light alloys using plastic working methods” financed by the National Centre for Research and Development with public funds for science.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Górny Z., Sobczak J.: Nowoczesne tworzywa odlewnicze na bazie metali nieżelaznych. Wydawnictwo Specjalne Instytutu Odlewnictwa w Krakowie, Kraków 1997 s. 40.
- [2] Fajkiel A., Białobrzęski A., Dudek P., Reguła T.: Nowoczesne stopy oraz metody odlewania magnezu w zastosowaniach motoryzacyjnych. Wydawnictwo Specjalne Instytutu Odlewnictwa w Krakowie, Kraków 2009 z. 2 s. 31.
- [3] Stephenson A.: Heat treating of magnesium alloys. ASM Handbook Volume 4 Heat Treating, ASM International Materials Park, OH 1991, s. 2010-2032.
- [4] Reguła T., Bronicki M., Lech-Grega M., Czekał E.: Ocena możliwości kształtowania właściwości mechanicznych odlewniczego stopu magnezu AZ91 przez zastosowanie odpowiedniej obróbki cieplnej. Prace Instytutu Odlewnictwa 2008 t. XLVIII z. 1 s. 40-42.
- [5] Dieter G.E. (i in.): Handbook of workability and process design. ASM International 2003 s. 3-21.
- [6] Pachutko B., Ziółkiewicz S.: Badania metalograficzne odlewniczego stopu magnezu AZ91 po współbieżnym wyciskaniu. Obróbka Plastyczna Metali 2013 vol. 24 nr 2 s. 119-129.