

Dr inż. Stanisław ZIÓŁKIEWICZ, mgr inż. Maria GĄSIORKIEWICZ
Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań
E-mail: stziolk@inop.poznan.pl

Ocena odkształcenia granicznego stopu magnezu AZ91

Assessment of limit deformation of AZ91 magnesium alloy

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu procesu wyciskania ze zmienną drogą odkształcenia i procesu wyciskania współbieżnego na właściwości plastyczne stopu magnezu AZ91. Wyniki wskazują, że przetworzenie wlewka metodą KOBO w wąskim zakresie temperatury, może doprowadzić do cech nadplastycznych badanego stopu. W artykule przedstawiono wyniki badań prowadzonych w Instytucie Obróbki Plastycznej.

Abstract

This paper presents the results of research influence of extrusion on variable way of deformation AZ91 magnesium alloy. The results indicate that the corresponding processing of the ingot by KOBO extrusion method can lead investigated alloy to superplastic flow. This paper presents the results of a preliminary study.

Słowa kluczowe: stop magnezu AZ91, metoda KOBO, obróbka plastyczna

Keywords: magnesium alloy AZ91, KOBO method, plastic working

1. WSTĘP

W ostatnich latach, w przemyśle, rośnie zainteresowanie stopami magnezu jako materiałami konstrukcyjnymi. Przewiduje się, że na świecie wykorzystanie stopów magnezu w najbliższych latach będzie wzrastać o ok. 15-20% rocznie, co oznacza, że coraz większa ilość części, zespołów maszyn i pojazdów będzie wykonywana z tych stopów [1]. Obecnie w przemyśle szeroko stosowane są odlewnicze stopy magnezu z gatunku AZ91, AM60, charakteryzujące się niskimi własnościami plastycznymi, szczególnie w niskiej temperaturze. Ze względu na łatwy dostęp do stopów odlewniczych w Polsce, w INOP, prowadzono badania nad możliwościami wykorzystania stopów odlewniczych w procesach obróbki plastycznej. Wyniki tych badań pokazały, że możliwe jest kształtowanie na gorąco stopu AZ91 i AM60 w wąskim zakresie temperatury od 250 do 350°C [2, 3].

1. INTRODUCTION

In recent years, there has been a rising interest in the application of magnesium alloys as structural materials in industry. It is predicted that the use of magnesium alloys in the world in the years to come will increase by about 15-20% per year, which means that more and more parts and machine and vehicle assemblies will be made from these alloys [1]. Currently, casting magnesium alloys of AZ91, AM60 grade, characterized by low plastic properties, particularly at low temperatures, are widely used in industry. Due to easy access to casting alloys in Poland, studies are being conducted on the possibilities to use casting alloys in plastic working processes at MFI. The results of these studies showed that hot forming of the AZ91 and AM60 alloys is possible in a narrow temperature range from 250 to 350 °C [2, 3].

Prowadzono również badania procesów wyciskania w złożonym stanie odkształcenia stopów AZ31 i AM60, które wykazały, że materiały te można kształtować już w temperaturze otoczenia, a otrzymane własności w pewnym zakresie temperatury mają cechy nadplastyczne [5, 6].

W związku z tym pojawiło się pytanie, czy odpowiednie przygotowanie wsadu wlewka ze stopu magnezu AZ91 może poprawić jego plastyczność. Aby to sprawdzić przeprowadzono badania kształtowania stopu magnezu jedną z metod SPD (ang. Severe Plastic Deformation), opartą na dużych odkształceniach plastycznych, metodą KOBO oraz metodą tradycyjną wyciskania współbieżnego.

2. BADANIA LABORATORYJNE

Materiałem wykorzystanym do badań były wlewki ze stopu magnezu AZ91 o składzie chemicznym przedstawionym w tabeli 1. Stop AZ91 jest stopem stosowanym przede wszystkim na wyroby odlewane. W badaniach stosowano wałki o średnicy wyjściowej 40 mm pobrane z odlanych gąsek wyciskano do postaci prętów o średnicach końcowych $\phi 6$ i $\phi 12$ mm.

Proces wyciskania współbieżnego metodą KOBO prowadzono na stanowisku badawczym znajdującym się w Katedrze Struktury i Mechaniki Ciała Stałego Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Dobór parametrów wyciskania oparto na wynikach wcześniejszych badań procesu KOBO. Zastosowano prędkość przesuwu stempla 0,2 i 0,5 mm/s, kąt obustronnego obrotu matrycy $\pm 8^\circ$ i częstość 5 Hz. Temperatura początkowa próbki i narzędzi wynosiła 20°C. Na rysunkach 1a,b,c,d przedstawiono wyniki badań mikrostruktury pręta o średnicy $\phi 12$. Obserwacje obejmują krawędź oraz rdzeń pręta wzdłuż przekroju poprzecznego i wzdłużnego.

Studies of AZ31 and AM60 alloy extrusion processes in a complex strain state were also conducted and showed that these materials can be formed at ambient temperature, and within a certain temperature range, obtained properties have superplastic qualities [5, 6].

In relation to this, the question of whether appropriate preparation of the AZ91 magnesium alloy ingot charge can improve its plasticity was posed. To investigate this, magnesium alloy forming tests were performed using the SPD method (Severe Plastic Deformation) based on high plastic deformations, the KOBO method, and the conventional direct extrusion method.

2. LAB ANALYSES

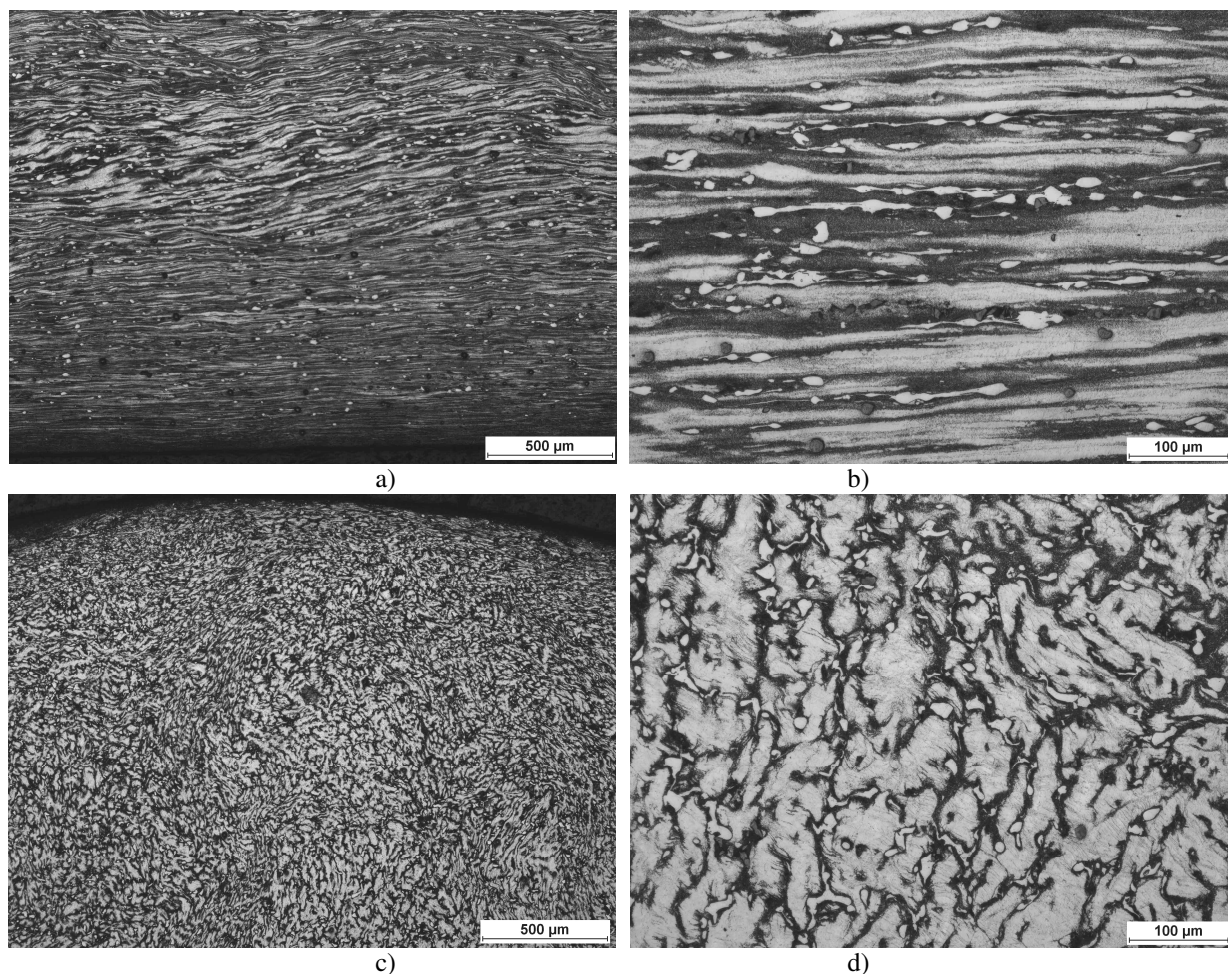
The material used for studies were AZ91 magnesium alloy ingots with a chemical composition as shown in table 1. The AZ91 alloy is used for cast products, above all. In studies, cylindrical shape samples with an initial diameter of 40 mm, acquired from ingot, were extruded to the form of rods with final diameters of $\phi 6$ and $\phi 12$ mm.

The process of direct extrusion using the KOBO method was performed on the testing stand found at the Department of Solid Body Structure and Mechanics of the AGH University of Science and Technology in Cracow. Selection of extrusion parameters was based on the results of previous studies of the KOBO process. A punch advance rate of 0.2 and 0.5 mm/s, two-sided die rotation angle of $\pm 8^\circ$, and frequency of 5 Hz were applied. The initial temperature of the sample and tool was 20°C. Figures 1a,b,c,d present the results of microstructure examinations of a rod with a diameter of $\phi 12$. Observations include the surface and core of the rod along the cross and longitudinal section.

Tabela 1. Skład chemiczny badanego stopu AZ91

Table 1. Chemical composition of the studied AZ91 alloy

	Skład chemiczny [%] / Chemical composition [%]				
Stop / Alloy	Al	Zn	Mn	Si	Mg
AZ91	8,4	0,78	0,26	0,68	Reszta / Remainder



Rys. 1. Struktura pręta wyciśniętego metodą KOBO: materiał – AZ91; $v = 0,5$ mm/s; częstotliwość 5 Hz: (a, b) - krawędź i środkowy obszar w przekroju podłużnym, (c, d) - krawędź i środkowy obszar w przekroju poprzecznym
 Fig. 1. Structure of a rod extruded using the KOBO method: material – AZ91; $v = 0.5$ mm/s; frequency 5 Hz: (a, b) - edge and central area in a longitudinal section, (c, d) - edge and central area of the cross section

Po procesie wyciskania metodą KOBO otrzymano strukturę drobnoziarnistą z wydłużonymi ziarnami w kierunku płynięcia metalu (rys. 1a,b). Struktura stopu AZ91 składa się z roztworu stałego α -Mg (kolor jasny) i fazy międzymetalicznej γ (faza $Mg_{17}Al_{12}$; kolor ciemny), która usytuowana jest na granicach ziaren (rys. 1c,d).

Dla porównania wykonano próbki wyciskane metodą tradycyjną na prasie hydraulicznej. Proces tradycyjnego wyciskania współbieżnego prowadzono w temperaturze $280^{\circ}C$, w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu, na stanowisku wyposażonym w prasę hydrauliczną PYE-250. Próbki wyciskano zgodnie ze stopniem odkształcenia próbek wykonanych metodą KOBO tj. od średnicy wyjściowej $\phi 40$ mm, do $\phi 12$ mm.

After KOBO extrusion, a fine-grained structure with grains elongated in the direction of metal flow was obtained (fig. 1a,b). The structure of the AZ91 alloy consists of a solid solution of α -Mg (light color) and the γ intermetallic phase ($Mg_{17}Al_{12}$ phase; dark color), which is present on grain boundaries (fig. 1c,d).

For comparison, samples were made through extrusion by the conventional method on a hydraulic press. The process of conventional direct extrusion was performed at a temperature of $280^{\circ}C$ at the Metal Forming Institute in Poznań, on a station equipped with a PYE-250 hydraulic press. Samples were extruded according to the degree of deformation of samples made using the KOBO method, that is, from an initial diameter of $\phi 40$ mm to $\phi 12$ mm.

3. ODKSZTAŁCENIA GRANICZNE

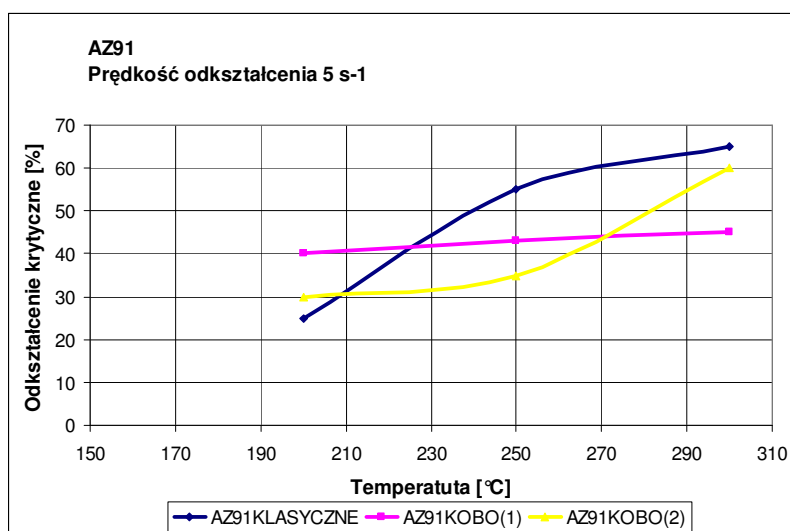
Celem badań było wyznaczenie odkształcenia granicznego próbek ze stopu AZ91 w próbach ściskania. Do badań przyjęto próbki o wymiarach $\phi 10 \times 12$, wyciśnięte metodą KOBO na zimno z prędkością 0,2 i 0,5, które porównano z próbkami wyciśniętymi tradycyjnie w temperaturze 280°C. Badania przeprowadzono w zakresie temperatury od 200 do 300°C. Przyjęto dwie prędkości odkształcenia: $0,5 \text{ s}^{-1}$ - odpowiadającej kształtowaniu na prasach mechanicznych i $0,01 \text{ s}^{-1}$ - odpowiadającej kształtowaniu na prasach hydraulicznych. Próbki kształtowano w specjalnie zaprojektowanym przyrządzie wyposażony w grzałki opaskowe, nagrzewające narzędzia do wymaganej temperatury. Jako smar zastosowano pastę grafitową. Mierzono wysokość początkową oraz drogę przemieszczenia, do momentu zniszczenia próbki. Na tej podstawie obliczono wielkość odkształcenia krytycznego w zadanej temperaturze. Zależności odkształcenia krytycznego stopu AZ91, przy prędkości odkształcania $0,5 \text{ s}^{-1}$ i $0,01 \text{ s}^{-1}$ od temperatury przedstawiono na rysunku 2a,b.

Uzyskane wyniki wykazują, że odkształcenie graniczne badanego stopu magnezu, wyznaczone w momencie początku pęknięcia, zależy od sposobu przygotowania próbki. Wykazano, że przy prędkości odkształcenia równej 5 s^{-1} odkształcenie graniczne próbek otrzymanych metodą KOBO w temperaturze 200°C jest o ok. 10% większe od próbek otrzymanych tradycyjnie. Jednakże, wraz ze wzrostem temperatury to próbki otrzymane metodą tradycyjną wykazują większe odkształcenie graniczne sięgające ok. 65%, więcej niż próbki otrzymane metodą KOBO. Przy prędkości odkształcenia $0,01 \text{ s}^{-1}$ badanego stopu, niezależnie od metody wytwarzania, odkształcenie graniczne ma podobny przebieg. Przy czym można zaobserwować pewien wzrost odkształcenia granicznego próbek wytworzonych metodą KOBO powyżej temperatury 230°C w stosunku do próbek wytworzonych metodą tradycyjną.

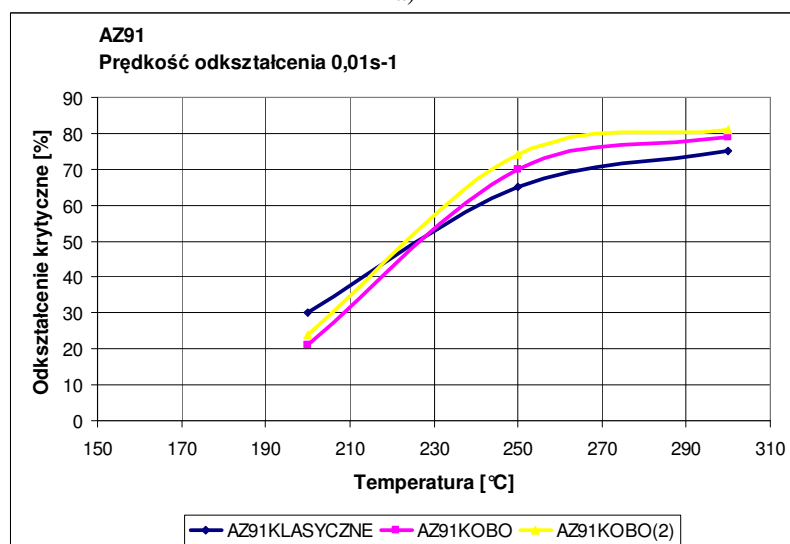
3. LIMIT DEFORMATION

The goal of tests was to determine the limit deformation of samples made from AZ91 alloy through compression tests. Samples with dimensions of $\phi 10 \times 12$, cold extruded using the KOBO method at a rate of 0.2 and 0.5, were accepted for tests and compared with sample extruded conventionally at a temperature of 280°C. Tests were carried out in a temperature range from 200 to 300°C. Two deformation rates were accepted: 0.5 s^{-1} - corresponding to forming on mechanical presses, and 0.01 s^{-1} - corresponding to forming on hydraulic presses. Samples were formed in a specially designed device equipped with heating bands that heated tools to the required temperature. Graphite was applied as lubricant. The initial height and path of displacement were measured until the instant of sample destruction. On this basis, critical strain was calculated for the set temperature. The dependency of critical strain of the AZ91 alloy at a strain rate of 0.5 s^{-1} and 0.01 s^{-1} on temperature is presented on figure 2a,b.

Obtained results show that the limit deformation of the studied magnesium alloy determined at the start of cracking depends on the method of sample preparation. It was proven that for a deformation rate equal to 5 s^{-1} , the limit deformation of samples obtained through the KOBO method at a temperature of 200°C is about 10% greater than for conventionally made samples. However, as temperature increases, samples obtained through the conventional method exhibit a greater limit deformation, reaching about 65% more than samples made using the KOBO method. At a deformation rate of 0.01 s^{-1} of the studied alloy, the function of limit deformation was similar, independently of the method of production. However, a certain increase of the limit deformation of samples produced by the KOBO method above the temperature of 230°C relative to samples produced by the conventional method could be observed.



a)



b)

Rys. 2. Porównanie odkształcenia krytycznego w zależności od temperatury ściskania próbek ze stopu AZ91, otrzymanych przez wyciskanie tradycyjne i w procesie KOBO. Prędkości odkształcenia: a) 0,5 s⁻¹; b) 0,01 s⁻¹

Fig. 2. Comparison of critical deformation as a dependency on AZ91 sample compression temperature, with samples obtained from conventional extrusion and from the KOBO process. Deformation rates: a) 0.5 s⁻¹; b) 0.01 s⁻¹

4. BADANIA PLASTOMETRYCZNE

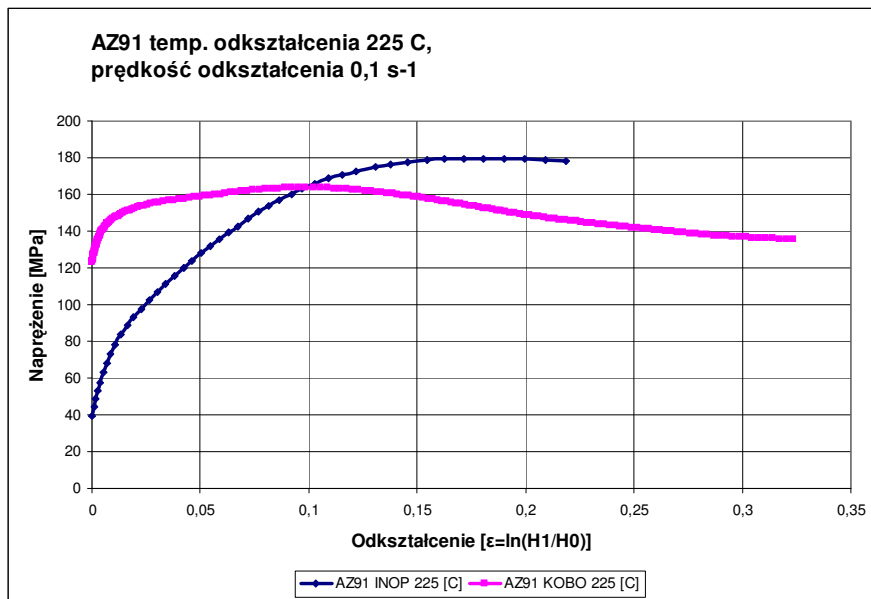
W celu wyznaczenia parametrów plastyczności stopu AZ91, po wyciskaniu klasycznym i po kształtowaniu metodą KOBO, wykonano badania plastometryczne, które pozwalają na wyznaczeni krzywych umocnienia. Doświadczenia prowadzone były na maszynie typu Greeble HDS-V40 na Uniwersytecie Technicznym we Freibergu [8]. Badania prowadzone przy różnej prędkości i temperaturze odkształcenia przedstawiono w tabeli 2. Badania plastometryczne zostały wykonane metodą spęczania próbek cylindrycznych o wymiarach $\phi 10 \times 15$ mm.

4. PLASTOMETRIC TESTS

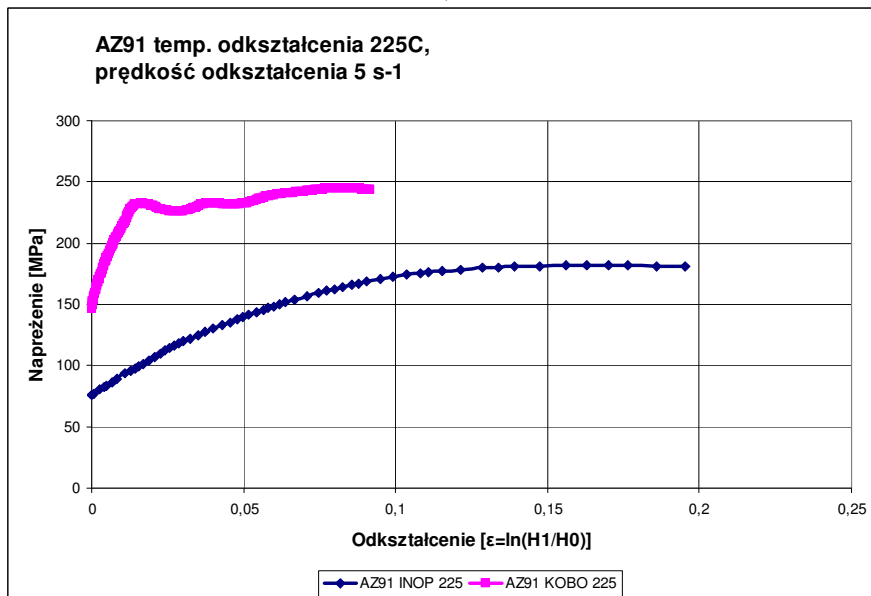
In order to determine plasticity parameters of the AZ91 alloy after conventional and KOBO extrusion, plastometric tests that enable determination of hardening curves were conducted. Experiments were carried out on a Greeble HDS-V40 type machine at the Freiberg Technical University [8]. Tests were performed at a various deformation rates and temperatures, as presented in table 2. Plastometric tests were performed using the method upset forging of cylindrical samples with dimensions of $\phi 10 \times 15$ mm.

Tabela 2. Parametry badań plastometrycznych
 Table 2. Plastometric test parameters

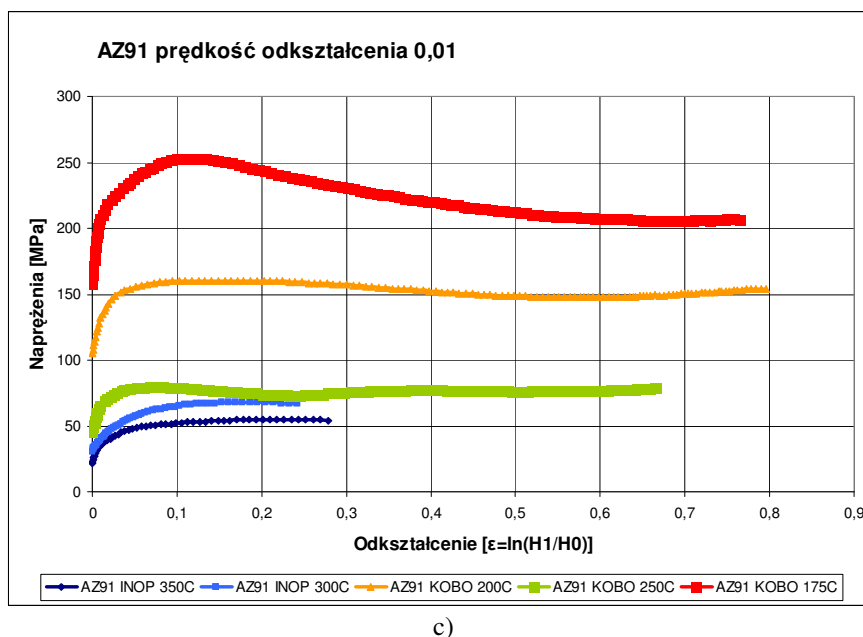
Metoda obróbki i rodzaj materiału <i>Processing method and material type</i>	Temperatura badań [°C] <i>Testing temperature [°C]</i>	Prędkość odkształcania [s ⁻¹] <i>Deformation rate [s⁻¹]</i>
AZ91 KOBO (wyciskanie metodą KOBO) <i>AZ91 KOBO (KOBO method extrusion)</i>	175; 200; 225;	0,01; 0,1; 5
AZ91 INOP (wyciskanie tradycyjnie) <i>AZ91 INOP (conventional extrusion)</i>	225; 250; 275; 300; 350	0,01; 0,1; 5



a)



b)



Rys. 3. Krzywe napężenia uplastyczniającego w zależności od odkształcenia, temperatury i prędkości odkształcania badanych stopów magnezu: a) temp. 225°C, prędkość odkształcania 0,1 s⁻¹; b) temp. 225°C, prędkość odkształcania 5 s⁻¹; c) różne temperatury, prędkość odkształcania 0,01 s⁻¹

Fig. 3. Plasticizing stress curves as dependencies of deformation, temperature, and deformation rate of the studied magnesium alloys: a) temp. 225°C, deformation rate 0.1 s⁻¹; b) temp. 225°C, deformation rate 5 s⁻¹; c) different temperatures deformation rate 0.01 s⁻¹

Na wykresach (rys. 3) przedstawiono krzywe umocnienia próbek ze stopu magnezu AZ91. Z wykresów wynika, że niezależnie od temperatury i sposobu wyciskania, tj. metodą KOBO i metodą tradycyjną przy prędkościach 0,1 i 5 s⁻¹, odkształcenie nie przekracza 0,3 (rys. 3a,b). Uniemożliwia to kształtowanie stopu AZ91 metodami obróbki plastycznej. Jednakże, obniżenie prędkości odkształcania do wartości 0,01 s⁻¹ powoduje, że próbki wyciskane metodą KOBO wykazują znaczny wzrost odkształcenia już w temperaturze 175°C (rys. 3c) dochodzący do 0,8. Próbki wykonane metodą tradycyjną nawet w temperaturze 300°C nie wykazują takich właściwości odkształcenia. Prawdopodobnie zwiększenie stopnia odkształcenia próbek wytworzonych metodą KOBO jest efektem ewolucji mikrostruktury dokonującej się w procesie wyciskania współbieżnego połączonego z ruchem obrotowym matrycy kształtującej [9]. W efekcie przy bardzo małych prędkościach odkształcania ujawniają się właściwości zbliżone do właściwości nadplastycznych stopu AZ91.

The charts below (fig. 3) present hardening curves of AZ91 magnesium alloy samples. It results from the charts that, independently of temperature and the extrusion method, that is KOBO and conventional extrusion at rates of 0.1 and 5 s⁻¹, deformation does not exceed 0.3 (fig. 3a,b). This makes it impossible to form the AZ91 using plastic working methods. However, reduction of the deformation rate to the value of 0.01 s⁻¹ causes that samples extruded using the KOBO method exhibit a significant increase of deformation at a temperature of just 175°C (fig. 3c), reaching up to 0.8. Sample made using the conventional method do not exhibit such deformation properties, even at 300°C. It is probable that the increase of the degree of deformation of samples produced by the KOBO method is an effect of microstructural evolution taking place during the direct extrusion process combined with the rotating motion of the forming die [9]. In effect, properties of the AZ91 alloy similar to superplastic properties reveal themselves at very low deformation rates.

5. WNIOSKI

W badaniach wykazano zależność sposobu przetworzenia plastycznego wlewka z odlewniczego stopu magnezu AZ91 na jego podatność do plastycznego odkształcania. Wyciskanie na zimno wlewka metodą KOBO powoduje silną deformację ziaren, charakterystyczną dla procesu wyciskania. Stwierdzono, że metoda KOBO polepsza własności plastyczne kształtowanego stopu magnezu AZ91 przy małych prędkościach odkształcania $0,01 \text{ s}^{-1}$ już przy temperaturze 175°C .

Przy małych prędkościach odkształcania można zauważyć wzrost odkształcania granicznego stopu AZ91, niezależnie od metody kształtowania, które w temperaturze 250°C osiąga wartość 75% i jest prawie stabilne do temperatury 300°C . Przy większych prędkościach większe odkształcenie graniczne mają próbki otrzymane w sposób tradycyjny. Wyniki te potwierdzają badania plastometryczne.

Badania nie pozwoliły na wyjaśnienie przyczyn wzrostu odkształcalności próbek wytworzonych metodą KOBO. Prawdopodobnie zwiększenie odkształcalności próbek wytworzonych metodą KOBO jest efektem ewolucji mikrostruktury dokonującej się w tym procesie.

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.

5. CONCLUSIONS

Studies showed a dependency of the method of processing a plastic ingot made from AZ91 casting magnesium alloy on its susceptibility to plastic deformation. Cold extrusion of an ingot using the KOBO method causes strong deformation of grains that is characteristic of this extrusion process. It was stated that the KOBO method improves the plastic properties of the formed AZ91 magnesium alloy at a low deformation rate of 0.01 s^{-1} at a temperature that is as low as 175°C .

At low deformation rates, an increase of the limit deformation of the AZ91 alloy can be observed independently of forming methods, which reaches the value of 75% at a temperature of 250°C and is nearly stable to the temperature of 300°C . At higher rates, samples obtained by the conventional method have a greater limit deformation. These results are confirmed by plastometric tests.

Tests did not make it possible to explain the causes of the increase of deformability of samples produced by the KOBO method. It is probable that the increase in the deformability of samples produced by the KOBO method is an effect of the microstructural evolution taking place during this process.

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] Bohlen J., Letzig D., Kainer K.U.: New Perspectives for Wrought Magnesium Alloys. Materials Science Forum 2007 vols. 546–549 s. 1-10.
- [2] Ziółkiewicz S. (i in.): Wpływ obróbki KOBO na właściwości plastyczne stopu magnezu AZ31. Effect of KOBO treatment on the plastic properties of the AZ31 magnesium alloy. Obróbka Plastyczna Metali 2012 vol. 23 nr 2 s. 57-67.
- [3] Gąsiorkiewicz M. (i in.): Badania możliwości przetwarzania materiałów konstrukcyjnych ze stopów lekkich metodami obróbki plastycznej. Zadanie 01. Opracowanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych stanowiska do wyciskania stopów magnezu. Zadanie 02. Modyfikacja stanowiska badawczego do wyciskania. Zadanie 03. Badania warsztatowe i laboratoryjne. Praca nr BO 901 81.001.002.003.11 Poznań: INOP 2011 28 s., 46 rys. 3 tab. bibliogr. 17 poz.

-
- [4] Azushima A., Kopp R., Korhonen A., Yang D.Y., Micari F., Lahoti G.D., Groche P., Yanagimoto J., Tsuji N., Rosochowski A., Yanagida A.: Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 57(2008) 716-735.
 - [5] Ziółkiewicz S. (i in.): Wpływ obróbki KOBÓ na właściwości plastyczne stopu magnezu AZ31. Effect of KOBÓ treatment on the plastic properties of the AZ31 magnesium alloy. *Obróbka Plastyczna Metali* 2012 vol. 23 nr 2 s. 57-67.
 - [6] Ziółkiewicz S. (i in.): Wpływ obróbki KOBÓ na właściwości plastyczne stopu magnezu AM60. Effect of KOBÓ treatment on the plastic properties of the AM60 magnesium alloy. *Obróbka Plastyczna Metali* 2012 vol. 23 nr 3 s. 151-158.
 - [7] Korbel A., Bochniak W.: Method of Plastic Forming of Materials. U.S. Patent no 5, 737, 959 (1997).
 - [8] TU Bergakademie Freiberg Fakultät Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie, Institut für Metallformung, Raport z badań plastometrycznych, dane nie publikowane.
 - [9] Korbel A., Bochniak W., Ostachowski P., Błaż L.: Visco-Plastic Flow of Metal in Dynamic Conditions of Complex Strain Scheme. *Metallurgical and Materials Transactions* 10.1007/s11661-011-0688-x.