

Dr inż. Stanisław ZIÓŁKIEWICZ¹⁾, mgr inż. Maria GAŚIORKIEWICZ¹⁾,
mgr inż. Patrycja WESOŁOWSKA¹⁾, prof. dr hab. inż. Stefan SZCZEPANIK²⁾,
prof. dr hab. inż. Robert SZYNDLER¹⁾

¹⁾ Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań

²⁾ Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

e-mail: stziolk@inop.poznan.pl

Wpływ obróbki KOBO na właściwości plastyczne stopu magnezu AM60

Influence of KOBO treatment on the plastic properties of AM60 magnesium alloy

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu procesu wyciskania współbieżnego prętów na zimno, metodą KOBO, na własności stopu AM60. Dla porównania badano własności prętów wyciskanych współbieżnie na gorąco na prasach hydraulicznych. Przedstawiono wyniki badań własności plastycznych i struktury próbek wykonanych ze stopu AM60.

Abstract

The paper presents the results of investigation of the influence of the process of cold forward extrusion of rods on the plastic properties of the SAM60 magnesium alloy. For comparison, the properties of rods hot forward extruded on hydraulic presses have been examined. The results of examination of plastic properties and structures of samples made of AM60 alloy have been described.

Słowa kluczowe: stop magnezu, metoda KOBO, obróbka plastyczna

Keywords: magnesium alloy, KOBO method, metal forming

1. WSTĘP

W ostatnich latach wzrasta znaczenie stopów magnezu jako materiału konstrukcyjnego. Przewiduje się, że światowe zastosowanie stopów magnezu w najbliższych latach będzie wzrastać, co oznacza, że coraz większa ilość części, zespołów maszyn i pojazdów będzie wykonywana z tych stopów. Szacowany, roczny wzrost zastosowań magnezu wynosi ok. 15-20% [1]. W technice, szeroko stosowane są odlewnicze stopy magnezu gatunku AZ31, AZ91, AM60, charakteryzujące się niskimi własnościami plastycznymi szczególnie w niskich temperaturach. Jednakże stopy te można kształtować na gorąco w zakresie temperatur od 250 do 350 °C [2, 3].

1. INTRODUCTION

The importance of magnesium alloys as constructional material has been growing in recent years. It is expected that the use of magnesium alloys will grow in the coming years, which means that more and more machine and vehicle parts and units will be made of those alloys. The annual increase of magnesium applications is estimated at about 15-20% [1]. In technology, casting magnesium alloys of grades AZ31, AZ91, AM60, having low plastic properties, particularly at low temperatures, are widely applied. However, those alloys can be subjected to hot forming in the temperature range from 250 to 350 °C [2, 3].

Szczególnie duże nadzieje wiąże się z metodami wytwarzania opartymi na dużych odkształceniach plastycznych SPD (ang. Severe Plastic Deformation), spośród których dużą szansę na przemysłowe zastosowanie ma metoda KOBO [4,5]. Jest to oryginalna polska technologia opracowana na Wydziale Metali Nieżelaznych Akademii Górniczo-Hutniczej przez prof. A. Korbela i prof. W. Bochniaka. Metoda KOBO polega na wymuszeniu lokalnego płynięcia metalu w pasmach ścinania, przez nałożenie na jednokierunkowy ruch narzędzi roboczych dodatkowego ruchu cyklicznie zmiennego.

W Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu podjęto badania wpływu metody przeróbki plastycznej na właściwości plastyczne stopu magnezu AZ31 [2]. Zastosowanie metody "KOBO" pozwoliło na odkształcanie plastyczne na zimno stopu AZ31 z dużym stopniem przerobu plastycznego ($\lambda = 16$) o drobnoziarnistej, stabilnej strukturze. Wyniki badań plastometrycznych oraz zgniotu krytycznego wykazały, że pręty uzyskane po wyciskaniu metodą KOBO można kształtować już w temperaturze 175 °C.

Aby potwierdzić korzystny wpływ metody KOBO (przerobu plastycznego odlewanych gąsek ze stopów magnezu) przeprowadzono badania wpływu tej metody na własności plastyczne stopu AM60.

2. BADANIA LABORATORYJNE

Materiałem badań były wlewki ze stopu magnezu AM60 o składzie chemicznym przedstawionym w tablicy 1. Stop AM60 jest stopem stosowanym przede wszystkim na wyroby odlewane. W badaniach stosowano wałki o średnicy 40 mm pobrane z odlanych gąsek.

Manufacturing methods based on severe plastic deformation (SPD) are believed to most hopeful. Among them, the KOBO method [4, 5] is most likely to be applied in industry. It is an original Polish technology elaborated in AGH University of Science and Technology by prof. A. Korbel and prof. W. Bochniak. The KOBO method consists in forcing local metal flow in bands of shearing by combination of the uniform motion of the working tools with additional cyclically variable motion.

The Metal Forming Institute in Poznań has undertaken investigation of the influence of plastic treatment method on the plastic properties of AZ31 magnesium alloy [2]. The application of the KOBO method has allowed for cold plastic deformation of the AZ31 alloy with high degree of plastic modification ($\lambda = 16$) with fine-grained, stable structure. The results of plastometric examinations and cold work examinations have shown the rods obtained after extrusion by the KOBO method could be formed at the temperature of only 175 °C.

In order to prove the advantageous influence of the KOBO method (plastic processing of cast magnesium alloy pig sows), the influence of that method on the plastic properties of the AM60 alloy has been investigated.

2. LABORATORY INVESTIGATION

The material under examination was ingots of AM60 magnesium alloy with the chemical composition shown in table 1. The AM60 is an alloy used, first of all, for cast products. In the investigation, 40 mm dia. shafts taken from the cast pig sows have been used.

Tablica 1. Skład chemiczny badanego stopu AM60
Table 1. Chemical composition of the AM60 alloy under examination

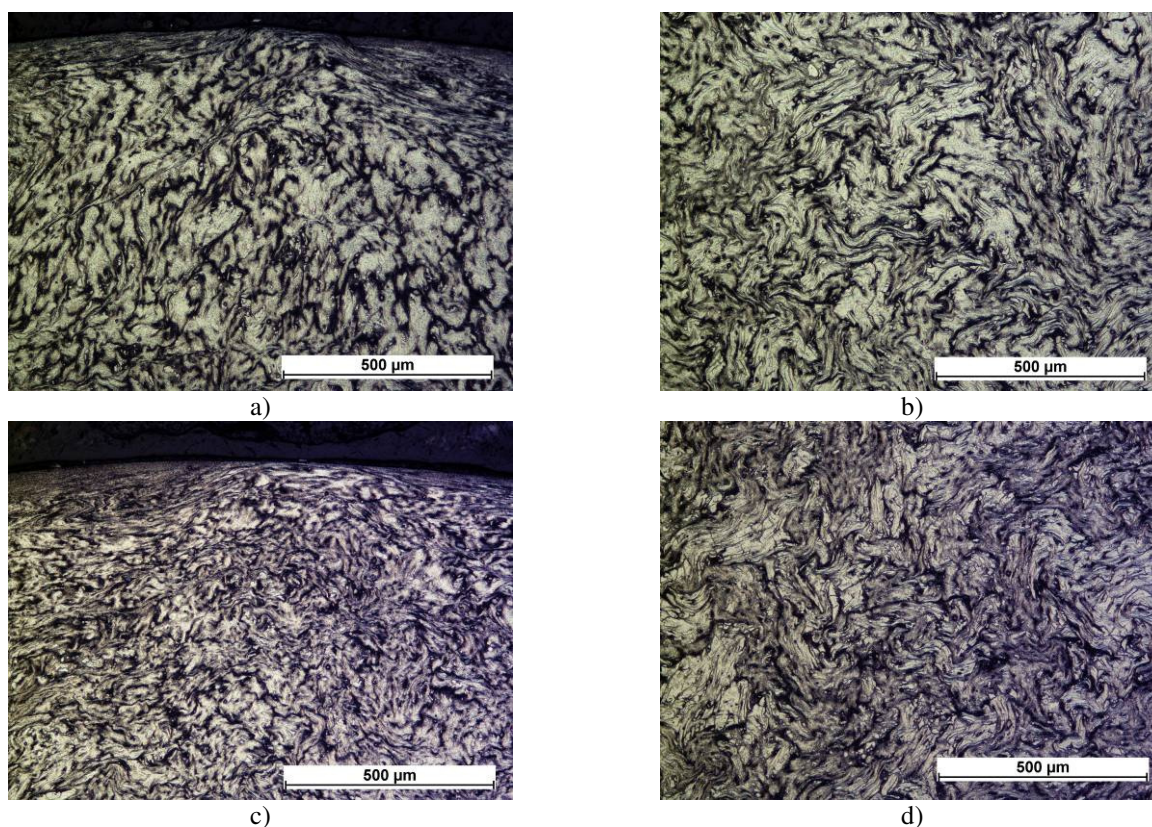
Stop Alloy	Al	Zn	Mn	Cu	Mg
	wag [%] weight [%]				
AM60	6,20	0,18	0,46	0,003	Reszta Remainder

Proces wyciskania współbieżnego metodą KOBO prowadzono na stanowisku badawczym znajdującym się w Katedrze Struktury i Mechaniki Ciała Stałego Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, otrzymując pręty o średnicy 10 mm (stopień przerobu $\lambda = 16$). Dobór parametrów wyciskania oparto na wynikach wcześniejszych badań procesu KOBO. Zastosowano prędkość przesuwu stempla 0,33 mm/s, kąt obracania matrycy $\pm 8^\circ$ i częstość 5 Hz. Temperatura początkowa próbki i narzędzi wynosiła 20 °C.

Na rysunku 1 przedstawiono mikrofotografie struktur wyciśniętych prętów. Miejsca obserwacji obejmują krawędź oraz środkowy obszar pręta w początkowej i końcowej fazie wyciskania. Rysunek przedstawia jednorodną strukturę w obydwu obserwowanych obszarach (początkowego i końcowego) bez śladów rekrytalizacji.

The process of forward extrusion by the KOBO method was performed on an experimental stand at the Department of Solid Body Structure and Mechanics of AGH University of Science and Technology in Cracow and rods with the diameter of 10 mm were obtained (degree of modification, $\lambda = 16$). The selection of the extrusion parameters was based on the results of earlier investigation of the KOBO process. The punch motion speed of 0.33 mm/s was applied; die rotation angle of $\pm 8^\circ$ and frequency of 5 Hz. The initial temperature of the sample and the tools was 20 °C.

Figure 1 shows microphotographs of the extruded rod structures. The inspection locations include the edge and the middle area of the rod in the initial and final phase of extrusion. The figure presents homogenous structure in both areas under examination (the initial and the final one) without traces of recrystallization.



Rys. 1. Struktura pręta wyciśniętego metodą KOBO: materiał – AM60; $v = 0,33$ mm/s; $F = 108$ T; v_0 - zmienna: krawędź i środkowy obszar na początku (a-b) i na końcu wyciskanego pręta (c-d)

Fig. 1. The structure of a rod extruded by the KOBO method: material – AM60; $v = 0.33$ mm/s; $F = 108$ T; v_0 – variable: the edge and middle area at the beginning (a-b) and at the end (c-d) of the extruded rod

3. ODKSZTAŁCENIE GRANICZNE

Celem badań było wyznaczenie odkształcenia granicznego próbek ze stopu AM60 wyciśniętego metodą KOBO, w zależności od temperatury, w zakresie od 20 do 225 °C. Przyjęto dwie prędkości odkształcania: $0,5 \text{ s}^{-1}$ – prędkość odpowiadająca kształtowaniu na prasach hydraulicznych i 8 s^{-1} – odpowiadająca kształtowaniu na prasach mechanicznych. Porównawczo, badano próbki wyciskane współbieżnie metodą tradycyjną, na prasie hydraulicznej. Proces tradycyjnego wyciskania współbieżnego prowadzono w temperaturze 250 °C, na stanowisku wyposażonym w prasę hydrauliczną o nacisku 2,5 MN, zgodnie z odkształcaniem próbek wykonanych metodą KOBO, tj. od średnicy wyjściowej 40 mm, do 10 mm.

Próbki wykonane ze stopów magnezu AM60 po tradycyjnym wyciskaniu współbieżnym oznaczono AM60-INOP, a próbki po wyciskaniu metodą KOBO, oznaczone odpowiednio AM60-KOBO. Do badań, z prętów wyciśniętych metodą KOBO i metodą tradycyjną, pobrano próbki o średnicy 8 mm i wysokości 10 mm. Próbki toczono i polerowano w celu usunięcia potencjalnych wad na pobocznicach. Próbki odkształcano pomiędzy płaskimi płytami w temperaturze otoczenia, tj. 20 °C oraz po nagraniu z kowadełkami, w piecu zainstalowanym na stanowisku badawczym, do temperatury odpowiednio 100, 150, 175, 200 i 225 °C. Jako smar zastosowano pastę grafitową. Mierzono wysokość początkową oraz drogę przemieszczania, do momentu zniszczenia próbki. Na tej podstawie obliczono wielkość odkształcenia krytycznego w zadanej temperaturze.

Na rysunku 2 przedstawiono próbki AM60-INOP i AM60-KOBO, po odkształceniu na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell, na Wydziale Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej AGH w Krakowie.

Zależności odkształcenia krytycznego stopu AM60 od temperatury przy prędkości odkształcania $0,5 \text{ s}^{-1}$ i 8 s^{-1} przedstawiono na rys. 3.

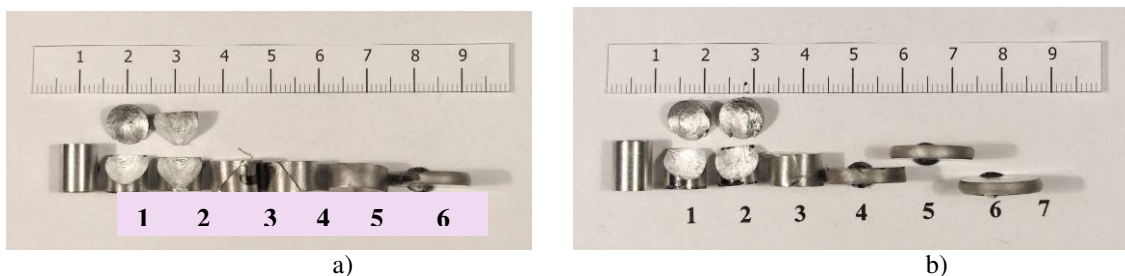
3. DEFORMATION LIMIT

The objective of the investigation was to determine the deformation limit of AM60 alloy samples extruded by the KOBO method depending on the temperature within the range of 20 to 225 °C. Two deformation speeds were adopted: 0.5 s^{-1} – a speed corresponding to forming on hydraulic presses and 8 s^{-1} – corresponding to forming on mechanical presses. For comparison, samples extruded by the traditional method on a hydraulic press were examined. The process of traditional forward extrusion was performed at the temperature of 250 °C, on a stand provided with a hydraulic press of 2.5 MN capacity, in accordance with the deformation of the samples made by the KOBO method, i.e. from the initial diameter of 40 mm to the final one of 10 mm..

The samples made of AM60 magnesium alloys after traditional forward extrusion were designated AM60-INOP and the samples after extrusion by the KOBO method were designated AM60-KOBO. For the examinations, test pieces with the diameter of 8 mm and height of 10 mm were taken from the rods made by the KOBO method and from the ones made by the traditional method. The test pieces were turned and polished to remove possible side wall defects. The test pieces were deformed between flat plates at ambient temperature, i.e. 20 °C and after heating with anvils, in a furnace installed in the test stand, up to the temperature of 100, 150, 175, 200 and 225 °C, respectively. As the lubricant, graphite paste was used. The initial height and the dislocation path were measured up to the moment of the test piece destruction. On that basis, the magnitude of critical strain at the predetermined temperature was found.

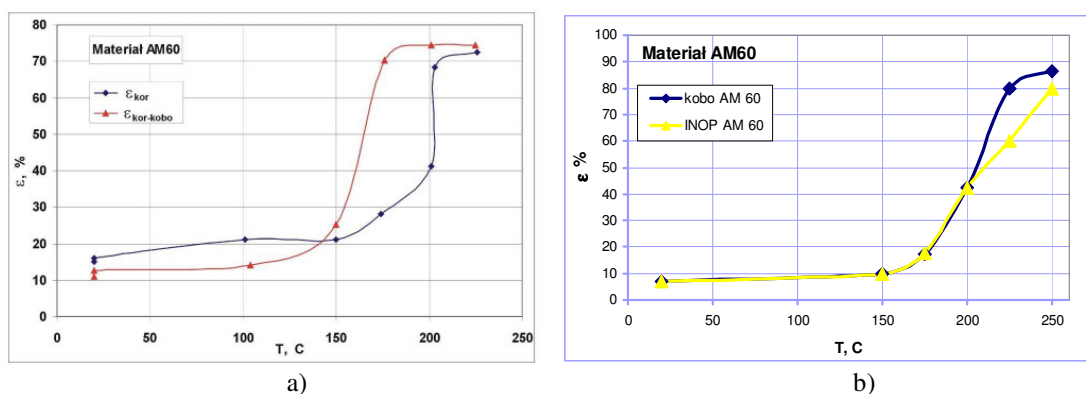
In figure 2, one can see AM60-INOP and AM60-KOBO samples after deformation on the Zwick/Roell machine in the Department of Metal Engineering and Industrial Computer Science of AGH University of Science and Technology.

The dependence of the critical strain of the AM60 alloy on the temperature at the deformation speed of 0.5 and 8 s⁻¹ can be found in fig. 3.



Rys. 2. Próbkki po odkształceniu i spęczaniu w temperaturze: 1 – 20 °C; 2 – 100 °C; 3 – 150 °C; 4 – 175 °C; 5 – 200 °C; 6 – 225 °C; a) AM60-INOP, b) AM60- KOBO

Fig. 2. Samples after deformation and upsetting at the temperatures of: 1 – 20 °C; 2 – 100 °C; 3 – 150 °C; 4 – 175 °C; 5 – 200 °C; 6 – 225 °C; a) AM60-INOP, b) AM60-KOBO



Rys. 3. Odkształcenie krytyczne w zależności od temperatury ściskania próbek ze stopu AM60, otrzymanych przez wyciskanie tradycyjne i w procesie KOBO. Prędkości odkształcania: a) 0,5 s⁻¹; b) 8 s⁻¹

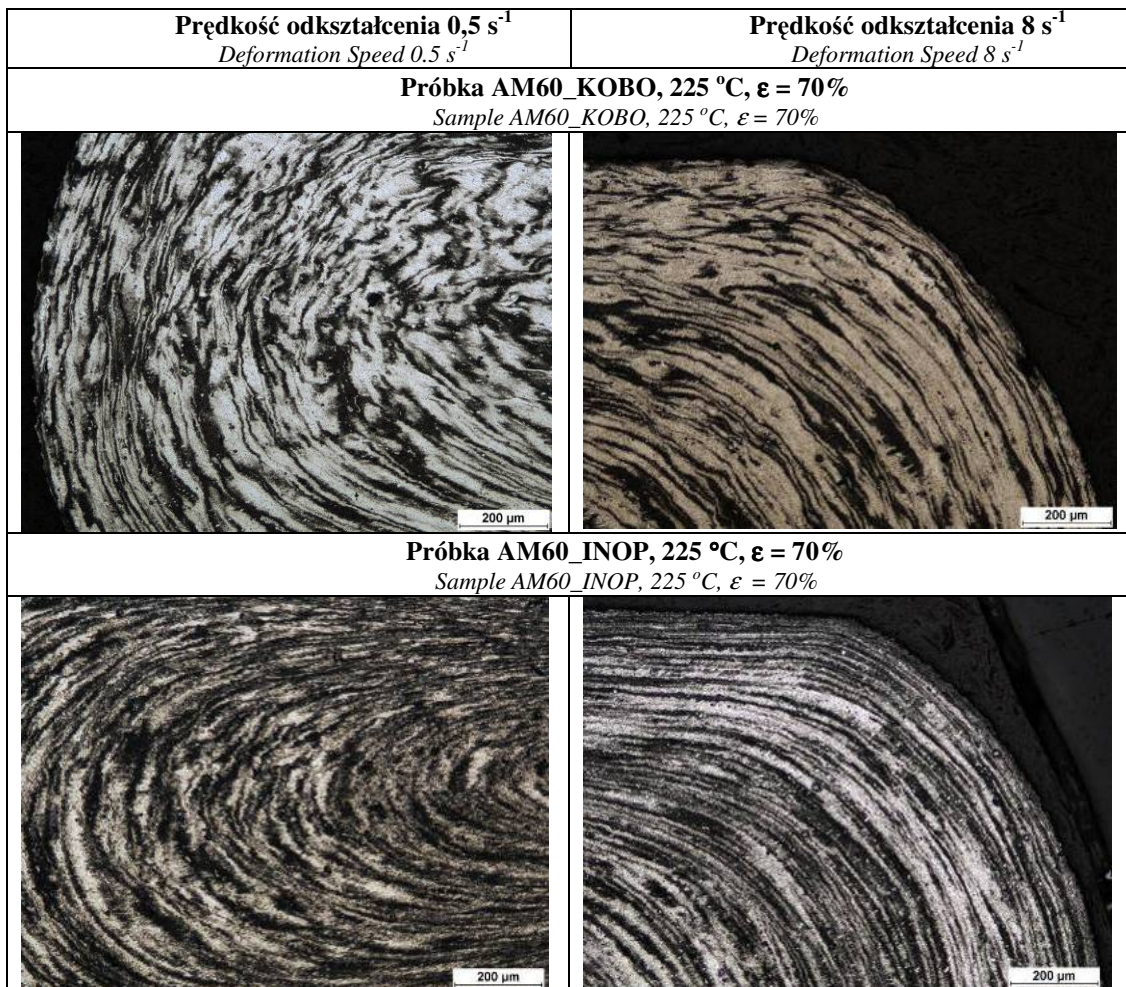
Fig. 3. Critical strain depending on the temperature of compressing the test pieces made of the AM60 alloy by traditional extrusion and in the KOBO process. Deformation speeds: a) 0,5 s⁻¹; b) 8 s⁻¹

Odkształcenie graniczne stopu magnezu AM60, wyznaczone w momencie początku pęknięcia, zależy od sposobu przygotowania próbki i prędkości odkształcania. Podobnie jak to miało miejsce podczas badania stopu AZ31 [2], dla stopu AM60, do temperatury około 125 °C, odkształcenie graniczne materiału wyciskanego jest niewiele większe od odkształcenia granicznego materiału po procesie KOBO. Natomiast powyżej temperatury 150 °C, dla prędkości odkształcania 0,1 s⁻¹, odkształcenie graniczne materiału po procesie KOBO jest większe przy temperaturze 175 °C, osiąga wartość 70% i jest prawie stabilne do temperatury 225 °C. W przypadku prędkości odkształcania 8 s⁻¹ obserwowano nieznaczny wzrost odkształcenia granicznego w temperaturze 175 °C (próbki odkształcanych metodą KOBO), wyraźny od temperatury 200 °C. Zmiany odkształcenia granicznego niezależnie od sposobu przygotowania próbek mają zbliżone przebiegi.

The deformation limit of the AM60 magnesium alloy determined at the moment of cracking start depends on the way of sample preparation and deformation speed. Like in the case of AZ31 examination [2], for the AM60 alloy, up to the temperature of about 125 °C, the deformation limit of the extruded material is only slightly larger than that of the material after the KOBO process. On the other hand, above the temperature of 150 °C, for the deformation speed of 0.1 s⁻¹, the deformation limit of the material after the KOBO process is larger at 175 °C, reaches the value of 70%, and is almost stable up to 225 °C. In the case of deformation speed of 8 s⁻¹, slight increase of the deformation limit was observed at the temperature of 175 °C (samples deformed by the KOBO method); the increase was clear from the temperature of 200 °C. The changes of the deformation limit are similar regardless of the way of sample preparation.

Tablica 2. Porównanie zglądów metalograficznych próbek, po zgnioście krytycznym, odkształconych metodą KOBO i tradycyjnie z prędkością $0,5 \text{ s}^{-1}$ i 8 s^{-1}

Table 2. Comparison of metallographic specimens of the samples after critical strain, deformed by the KOBO method and traditionally at the speed of 0.5 s^{-1} and 8 s^{-1}



W tablicy 2 porównano struktury stopu AM60, po spęczaniu w temperaturze 225 °C , z różną prędkością, przy zbliżonej wartości odkształcenia.

Struktura próbek stopu AM60 niezależnie od metody przygotowania (KOBO, tradycyjne wyciskanie) nie wykazuje cech rekrytalizacji, cechuje się wydłużonymi ziarnami.

4. BADANIA PLASTOMETRYCZNE

Podczas badań plastometrycznych wyznaczono krzywe umocnienia przy różnej prędkości i temperaturze odkształcania, jak w tablicy 3.

In table 2, one can find a comparison of the AM60 alloy structures after upsetting in 225 °C at various speeds at similar deformation value.

The structure of the AM60 samples does not show features of recrystallization regardless of the method of preparation (KOBO, traditional extrusion) and is characterized by elongated grains.

4. PLASTOMETRIC EXAMINATION

During plastometric examination the work-hardening curves were determined at various deformation speeds and temperatures, as in table 3.

Tablica 3. Parametry badań plastometrycznych stopu AM60
 Table 3. Parameters of plastometric examination of the AM60 alloy

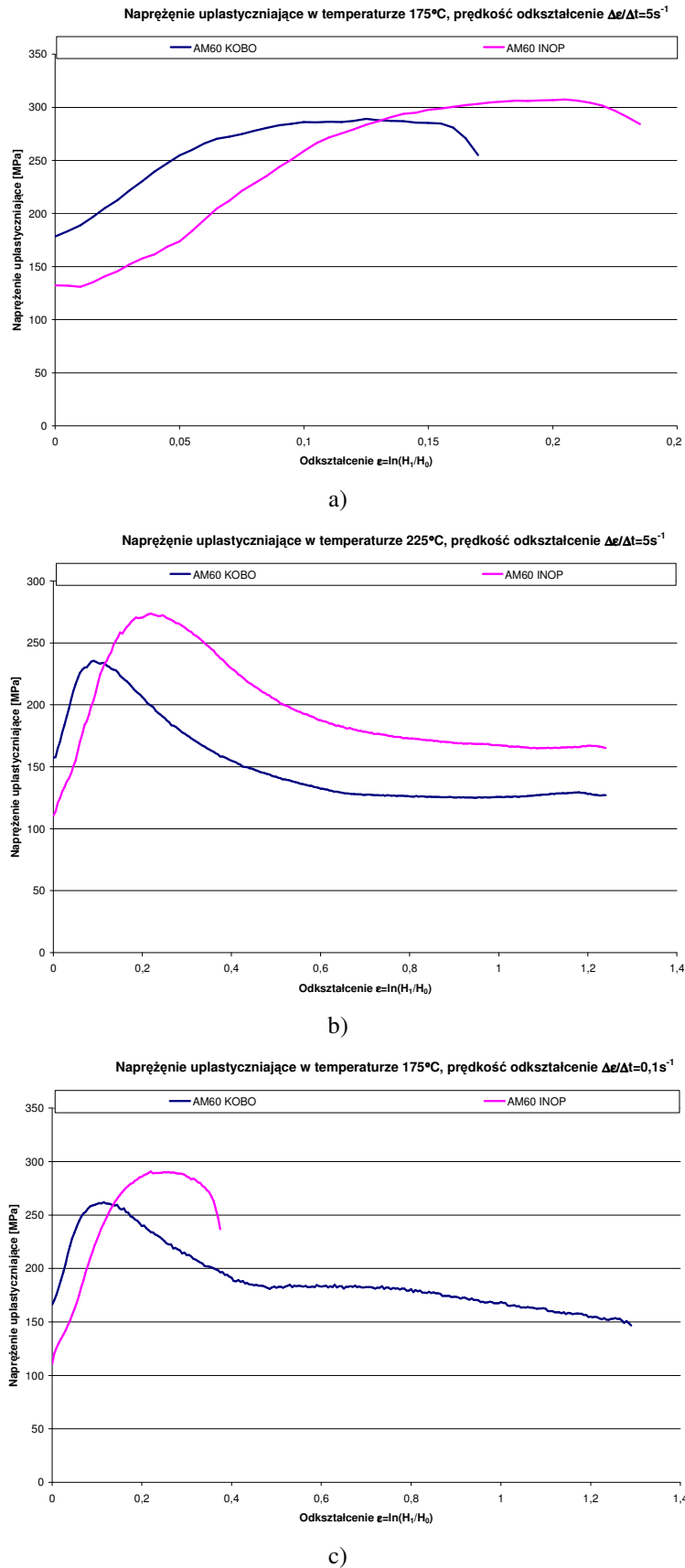
Metoda obróbki i rodzaj materiału <i>Preparation method and kind of material</i>	Temperatura badań [°C] <i>Examination temperature [°C]</i>	Prędkość odkształcania [$1s^{-1}$] <i>Deformation speed [$1s^{-1}$]</i>
AM60 KOBO	20, 100, 150, 175, 225	0,1, 5, 30
AM60 INOP (tradycyjnie / <i>traditionally</i>)	225	5

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki badań plastometrycznych, krzywe umocnienia próbek ze stopu AM60. Widać, że niezależnie od prędkości odkształcania i sposobu wyciskania (KOBO, tradycyjnie) do temperatury 150 °C odkształcenie rzeczywiste nie przekraczało 0,15. Uniemożliwia to kształtowanie badanego stopu metodami obróbki plastycznej na zimno. Również próby przeprowadzone w temperaturze 175 °C, przy prędkości odkształcania 5 s⁻¹, wykazały, że odkształcenie nie przekracza wartości 0,25, co stanowi istotne ograniczenie przy plastycznym kształtowaniu wyrobów. Dopiero podniesienie temperatury obróbki do 225 °C, niezależnie od sposobu przygotowania próbek, pozwala na zwiększenie odkształcenia powyżej 1. Zwraca uwagę fakt, że próbki przygotowane metodą KOBO wykazują mniejsze naprężenie uplastyczniające. Jednakże, zmniejszenie prędkości odkształcania do wartości 0,1 s⁻¹ powoduje, że próbki wyciskane metodą KOBO wykazują znaczący wzrost odkształcenia, porównywalny z odkształceniem tych materiałów kształtowanych tradycyjnie w temperaturze 225 °C. Badania wykazały, że przebiegi zależności naprężenie uplastyczniające – odkształcenie, w temperaturze 225 °C, są zbliżone z wynikami badań opisanymi w pracy [4].

Na rys. 5 zestawiono zależności naprężenia uplastyczniającego stopów AZ31 [2] i AM60 badanych w temperaturze 175 °C, przy prędkości odkształcania 0,1 s⁻¹. Z rysunku wynika, że przygotowanie materiału metodą KOBO zarówno stopu AZ31, jak i AM60, powoduje wzrost odkształcenia plastycznego przy niższej temperaturze i małych prędkościach odkształcania. Zjawiska nie obserwowano, gdy próbki wykonane były metodą tradycyjną, wyciskane na gorąco prętów z gąski.

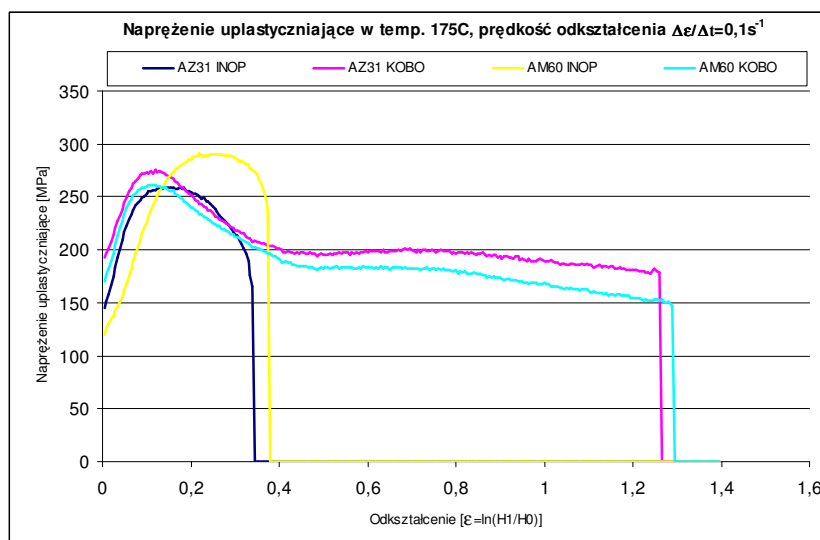
In figure 4, one can find the results of plastometric examination, work-hardening curves of the SM60 alloy samples. It can be seen that, regardless of the deformation speed and the way of extrusion (KOBO, traditional) the true strain did not exceed 0.15 up to the temperature of 150 °C. This prevents forming the alloy under investigation by the methods of cold metal forming. Tests performed at 175 °C and deformation speed of 5 s⁻¹, too, have shown that the strain does not exceed the value of 0.25, which is a significant barrier in plastic forming of products. The strain can be increased above 1 only when the process temperature is raised up to 225 °C, regardless of the way of sample preparation. It is noticeable that the samples prepared by the KOBO method show lower yield stress. However, reduction of the deformation speed down to 0.1 s⁻¹ results in that the samples extruded by the KOBO method show a significant deformation increase, comparable to the deformation of those materials traditionally formed at the temperature of 225 °C. Investigation has shown that the curves of the yield stress-strain relationship at 225 °C are close to the results of the investigation described in work [4].

In fig. 5, the relationships of the yield stresses of the AZ31 [2] and AM60 alloys examined at 175 °C and deformation speed of 0.1 s⁻¹ have been assembled. It can be seen from the figure that material preparation by the KOBO method, both AZ31 and AM60, results in an increase of plastic strain at a lower temperature and low deformation speeds. The phenomenon has not been observed when the samples were made by the traditional method of hot extrusion of rods from pig sows.



Rys. 4. Napężenie uplastyczniające w zależności od odkształcenia, temperatury i prędkości odkształcania badanego stopu AM60. Temperatura i prędkość odkształcania: a) 175 °C, 5 s⁻¹, b) 225 °C, 5 s⁻¹, c) 175 °C, 0,1 s⁻¹

Fig. 4. Yield stress depending on strain, temperature and speed of deformation of the AM60 alloy under investigation. Deformation temperature and speed: a) 175 °C, 5 s⁻¹, b) 225 °C, 5 s⁻¹, c) 175 °C, 0,1 s⁻¹



Rys. 5. Porównanie krzywych naprężenie uplastyczniające-odkształcenie stopów AZ31 i AM60 w zależności od metody wstępnego przerobu. Temperatura i prędkość odkształcania (175°C i $0,1\text{ s}^{-1}$)

Fig. 5. Comparison of the yield stress-strain curves of the AZ31 and AM60 alloys depending on the method of initial processing. Deformation temperature and speed (175°C and $0,1\text{ s}^{-1}$.)

5. PODSUMOWANIE

Sposób przygotowania wlewka z odlewniczego stopu magnezu AM60 wpływa na jego podatność do plastycznego odkształcania. Wyściskanie na zimno metodą KOBO powodowało silną deformację ziaren charakterystyczną dla tego procesu. Struktura po takiej obróbce, do temperatury 225°C , nie podlega rekrytalizacji.

Wyniki badań wykazały, że przygotowanie stopu magnezu metodą dużych odkształceń granicznych (SPD), metodą KOBO, polepsza właściwości plastyczne kształtowanych stopów metali. Możliwe jest także obniżenie temperatury obróbki plastycznej stopów magnezu. Zarówno stop AZ31, jak pokazano w [2], oraz stop AM60, można kształtować z dużymi odkształceniami w szczególnych warunkach, tj. przy małych prędkościach odkształcania, już w temperaturze 175°C . Wykazano, że zwiększenie odkształcalności badanych materiałów, po procesie KOBO, jest efektem skumulowanej energii odkształcania materiału.

Praca finansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach projektu nr NN507 439938 pt. "Niskotemperaturowe kształtowanie plastyczne wyrobów z trudno odkształcalnych stopów magnezu".

5. SUMMARY

The way of AM60 alloy ingot preparation influences its plastic deformability. Cold extrusion by the KOBO method has resulted in strong deformation of grains, characteristic of that process. After such processing, the structure does not undergo recrystallization up to the temperature of 225°C .

The investigation results have shown that preparation of magnesium alloy by the method of severe plastic deformation (SPD), by the KOBO method improves the plastic properties of the metal alloys under investigation. It is also possible to reduce the temperature of plastic forming of magnesium alloys. Both alloy AZ31, as shown in [2] and alloy AM60 can be formed with large deformations at as low temperature as 175°C . It has been proved that the increase of deformability of the material under investigation after the KOBO process is an effect of accumulated material deformation energy.

The work is financed by the Ministry of Science and Higher Education within the project NN507 439938 entitled "Low temperature plastic forming of hard-to-deform magnesium alloy products".

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] Ziólkiewicz 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.
- [5] Korbel A., Bochniak W.: Method of Plastic Forming of Materials. U.S. Patent no 5, 737, 959 (1997).
- [6] Kostecki M., Bochniak W., Olszyna A.: Otrzymywanie kompozytów Cu/Al₂O₃ metodą współbieżnego wyciskania. *KOBOKOMPOZYTY (COMPOSITES)* 6(2006)4, s. 29-34.
- [7] Kuc D., Hadasik E., Niewielski G., Płachta A.: Structure and plasticity of the AM60 magnesium alloy after hot deformation. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 2008 vols. 27 s. 27-30.
- [8] Szyndler R., Ziólkiewicz St. (i in.): Raport końcowy z projektu N N507 439938, praca niepublikowana, 2012.