

Dr inż. Stanisław ZIÓŁKIEWICZ<sup>1)</sup>, mgr inż. Maria GĄSIORKIEWICZ<sup>1)</sup>,  
mgr inż. Patrycja WESOŁOWSKA<sup>1)</sup>, prof. dr hab. inż. Stefan SZCZEPANIK<sup>2)</sup>,  
prof. dr hab. inż. Robert SZYNDLER<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań

<sup>2)</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

e-mail: stziolk@inop.poznan.pl

## Wpływ metody przygotowania wsadu ze stopu AZ31 na proces kucia korbowodów

### *Influence of the method of preparing AZ31 alloy preform on the connecting-rod forging process*

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań i ocenę wpływu metody przygotowania wsadu na proces kucia korbowodu ze stopu magnezu AZ31. W pracy wykorzystano dwa rodzaje wsadu wyciskanego z wlewka: jeden metodą tradycyjną na gorąco i drugi wyciskany na zimno metodą KOBO. Badano wpływ temperatury wsadu na prawidłowe wypełnienie wykroju matrycy oraz własności mechaniczne uzyskanych odkuwek.

#### Abstract

*This paper presents the results of studies and an evaluation of the influence of the method of preform preparation on the process of forging connecting-rods from AZ31 magnesium alloy. In the work, two types of preform extruded from an ingot were used: one hot extruded using the conventional method, and the other cold extruded using the KOBO method. The influence of preform temperature on the correct filling of the die cavity and mechanical properties of obtained forgings was studied.*

**Słowa kluczowe:** stopy magnezu, kucie izotermiczne, metoda KOBO

**Keywords:** magnesium alloys, isothermal forging, KOBO method

#### 1. WSTĘP

Stopy magnezu należą do najlżejszych metalicznych materiałów konstrukcyjnych o dużej wytrzymałości i dobrze tłumiących drgania. Niestety z uwagi na swoją budowę krystalograficzną charakteryzują się małą odkształcalnością plastyczną, szczególnie w temperaturze otoczenia. W literaturze przedstawionych jest wiele prac ukierunkowanych na poprawę własności stopów magnezu, przede wszystkim stopu AZ31, przez rozdrobnienie struktury metodami dużych odkształceń plastycznych (severe plastic deformation SPD). Stwierdzono, że materiały o ultra drobnych ziarnach posiadają większą wytrzymałość w temperaturze otoczenia i większą plastyczność w podwyższonych temperaturach.

#### 1. INTRODUCTION

*Magnesium alloys are one of the lightest metallic construction materials with a high strength and good vibration damping. Unfortunately, due to their crystallographic structure, they are characterized by a low plastic deformability, particularly in ambient temperature. The literature includes many works directed towards improvement of the properties of magnesium alloys, particularly the AZ31 alloy, through refinement of its structure through severe plastic deformation (SPD) methods. It was stated that ultra-fine-grained materials have a greater strength in ambient temperature and a greater plasticity in increased temperatures.*

Do najczęściej opisywanych metod stosowanych dla rozdrobnienia ziaren stopu magnezu zaliczyć należy wyciskanie przez kanał kątowy (ECAP). W pracach [1, 2] wskazuje się, że poprzez wielokrotne wyciskanie przez kanał kątowy w zakresie temperatur 200-220 °C otrzymuje się ziarna wielkości 1,9 μm. Zaobserwowano również, że podczas wyciskania zachodzą zjawiska dynamicznej rekrytalizacji materiału. W pracy [3] poprzez dwukrotne wyciskanie przez kanał kątowy uzyskano ziarno o wielkości 0,5 μm, co przełożyło się zarówno na wzrost naprężenia uplastyczniającego, jak i wydłużenia. Podobne wyniki uzyskano przy jednokrotnym wyciskaniu w zmodyfikowanej metodzie wyciskania przez kanał kątowy o zmiennej geometrii [4].

W Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu podjęto prace związane z badaniem wpływu metody plastycznego przygotowania wsadów do obróbki plastycznej na własności mechaniczne wyrobów ze stopów magnezu. W badaniach porównano odkształcalność plastyczną prętów ze stopów magnezu otrzymanych w procesie wyciskania z wlewka metodą tradycyjną i metodą KOBO tj. technologią opracowaną na Wydziale Metali Nieżelaznych Akademii Górniczo-Hutniczej przez prof. A. Korbela i prof. W. Bochniaka, polegającą na wymuszeniu lokalnego płynięcia metalu w pasmach ścinania, przez nałożenie na jednokierunkowy ruch narzędzi roboczych dodatkowego ruchu cyklicznie zmiennego. Stwierdzono, że zastosowanie metody KOBO tj. wykorzystanie w procesie wyciskania prętów ze stopów magnezu typu AZ31 i AM60 zmiennej drogi odkształcenia, pozwala na podniesienie ich wytrzymałości wraz ze wzrostem stopnia odkształcenia granicznego w określonym zakresie temperatury [6, 7].

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań procesu kucia odkuwek ze stopu AZ31, wykorzystujących wcześniejsze przygotowanie wsadu metodą KOBO.

## 2. BADANIA LABORATORYJNE

Badaniami objęto proces wytwarzania zaprojektowanej odkuwki korbowodu (rys. 1), przeznaczonej do silników spalinowych wykorzystywanych w ręcznych narzędziach (pilarki, kosiarki).

*One of the most widely described methods used to refine the grains of a magnesium alloy is the equal-channel angular pressing method (ECAP). In works [1, 2], it is indicated, that through multiple extrusion through an angular channel in the temperature range of 200-220 °C, grains with sizes of 1.9 μm are obtained. It was also observed, that dynamic recrystallization phenomena take place during extrusion of the material. In work [3], by means of double extrusion through an angular channel, a grain size of 0.5 μm was achieved, which translated into an increase of plasticizing stress as well as elongation. Similar results were obtained for single extrusion using a modified method of extrusion through an angular channel with changing geometry [4].*

*At the Metal Forming Institute in Poznan, work was undertaken in relation to the study of the influence of the method of plastic preparation of charges for plastic working on the mechanical properties of products made from magnesium alloys. In studies, the plastic deformability of magnesium alloy rods obtained by means of extrusion from an ingot through the conventional method were compared with that of rods obtained by means of KOBO method extrusion, that is, a technology developed at the Non-Ferrous Metal Faculty of the AGH University of Science and Technology by prof. A. Korbel and prof. W. Bochniak, based on forcing local metal flow in shear bands by applying additional cyclically variable motion to the uni-directional motion of working tools. It was stated that the application of the KOBO method, that is, of a variable strain path, during the process of extrusion of rods made from AZ31 and AM60 magnesium alloys, makes it possible to increase their strength along with the increase of the threshold strain in a specific temperature range [6, 7].*

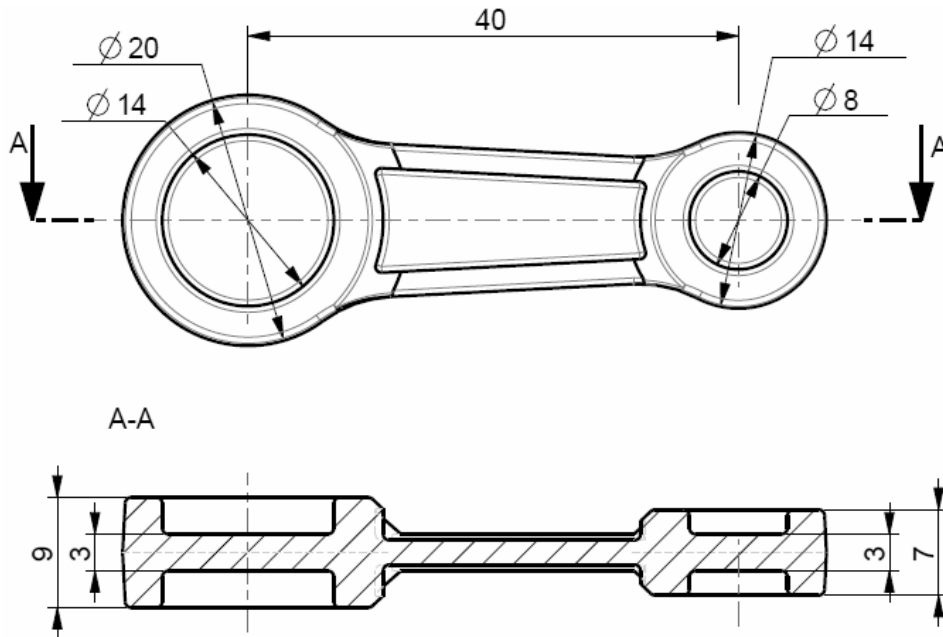
*This work presents the results of studies of the process of forging forgings made from AZ31 alloy, using a preform prepared earlier using the KOBO method.*

## 2. LABORATORY TESTS

*Studies included the production process of a designed connecting-rod forging (fig. 1),*

W oparciu o geometrie odkuwki opracowano proces technologiczny kucia oraz zaprojektowano i wykonano izotermiczne narzędzia przystosowane do kucia na prasie hydraulicznej PHDW-250 (rys. 2). Dla zapewnienia stałych warunków termicznych, narzędzia wyposażono w elektryczny układ nagrzewu wraz z układem sterowania temperaturą w wykroju matrycowym.

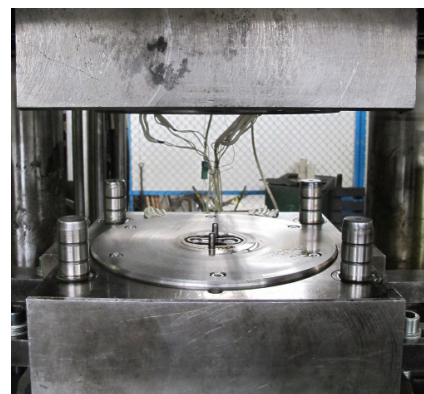
*used for combustion engines used in manual tools (sawing machines, mowers). Based on the geometry of the forging, a technological process of forging was developed and isothermal tools adapted for forging on a PHDW-250 hydraulic press were designed and made (fig. 2). To ensure constant thermal process conditions, tools were equipped with an electrical heating system with a temperature control system in the die cavity.*



Rys. 1. Kształt i wymiary odkuwki korbrowodu przyjętej w badaniach  
 Fig. 1. Shape and dimensions of the connecting-rod forging accepted for studies



a)



b)

Rys. 2. Narzędzia badawcze do kucia prototypowej odkuwki korbrowodu: a) matryca dolna, b) narzędzia zamocowane na stanowisku badawczym prasy PHDW-250

Fig. 2. Research tools for forging the prototype connecting-rod forging: a) lower die, b) tools fastened in the research station of the PHDW-250 press

Materiałem do badań były próbki wyciśnięte współbieżnie z niehomogenizowanego wlewka stopu magnezu AZ31 ze stopniem przerobu  $\lambda = 11,1$  i średnicy końcowej 12 mm. Próbki otrzymano w procesie wyciskania:

1. na zimno metodą KOBO przy zachowaniu stałej siły wyciskającej 95 T, stałej prędkości suwaka 0,33 mm/s oraz zmiennej częstotliwości obrotu matrycy,
2. metodą tradycyjną wyciskania współbieżnego na gorąco z temperatury 250 °C.

W obu przypadkach pręty po procesie wyciskania były studzone na powietrzu.

Z tak przygotowanego materiału wykonano wsad do procesu kucia, w postaci odcinków pręta o długości 47 mm i średnicy 12 mm. Wsad nagrzewany był w piecyku laboratoryjnym do następujących temperatur kucia: 150, 175, 200, 225 i 250 °C. Odkuwki kształtowano na prasie hydraulicznej PHdW-250 o prędkości ruchu suwaka 5 mm/s.

W tablicy 1 przedstawiono wyniki badań procesu kucia ze wsadu wyciśniętego metodą tradycyjnego wyciskania z opisem wad występujących w odkuwkach kutyh w różnych temperaturach. Odkuwki kute w temperaturze 150 °C wykazują pęknięcia na powierzchni i niewypełnienie wykroju matrycy w obszarze naroży. Stwierdzono również, że w trakcie okrawania wypłytki następuje rozwarstwienie materiału odkuwki i oderwanie fragmentu żebra. Kucie odkuwek korbowodu w temperaturze 225 °C pozwala na prawidłowe wypełnienie wykroju matrycy. Nie obserwuje się wówczas wad powierzchniowych odkuwek.

W tablicy 2 przedstawiono wyniki badań procesu kucia korbowodu ze wsadu wyciśniętego metodą KOBO z opisem występujących wad. Kucie w temperaturze 175 °C pozwala na uzyskanie poprawnie ukształtowanej odkuwki, bez widocznych śladów niewypełnienia wykroju matrycy. Na części odkuwek kutyh w ww. temperaturze dostrzega się jednak mikropęknięcia na powierzchni, będące prawdopodobnie efektem lokalnego przechłodzenia wsadu. Kształtowanie odkuwek korbowodu w temperaturze 200 °C pozwala na wytwarzanie odkuwek bez widocznych wad powierzchniowych.

*The material used in studies were samples extruded concurrently from an un-homogenized AZ31 magnesium alloy ingot with a processing degree of  $\lambda = 11.1$  and a final diameter of 12 mm. Samples were obtained during the extrusion process:*

- 1. cold extrusion using the KOBO method with maintenance of a constant extruding force of 95 T, a constant slider rate of 0.33 mm/s, and a variable frequency of die rotation,*
- 2. hot conventional concurrent extrusion from the temperature of 250 °C.*








*In both cases, after extrusion, rods were cooled in air.*

*A preform for the forging process was made from the so-prepared material, in the form of rod segments with a length of 47 mm and a diameter of 12 mm. The preform was heated in a laboratory furnace to the following forging temperatures: 150, 175, 200, 225 and 250 °C. Forgings were shaped on the PHDW-250 hydraulic press with a slider speed of 5 mm/s.*








*Table 1 show the results of studies of the forging process using a preform extruded using the conventional method with a description of the defects present on forgings forged at various temperatures. Forgings forged at a temperature of 150 °C exhibit surface cracks and incomplete filling of the die cavity in the area of its corners. It was also stated, that during trimming of the flash, the material of the forging is delaminated and a rib fragment is broken off. Forging connecting-rod forgings at a temperature of 225 °C makes it possible to correctly fill the die cavity. No surface defects of forgings are observed at this temperature.*

*Table 2 shows the results of studies of the process of forging a connecting-rod from a preform extruded using the KOBO method with a description of present defects. Forging at a temperature of 175 °C makes it possible to obtain a correctly formed forging, without visible traces of incomplete filling of the die cavity. On parts of forgings in the above temperature, however, micro-cracks are visible on the surface, and they are probably the effect of local over-cooling of the preform. Forming of connecting-rod forgings at a temperature of 200 °C*

Tablica 1. Zestawienie odkuwek korbowodu kutego ze stopu AZ31 ze wsadu wyciśniętego metodą tradycyjną  
 Table 1. List of connecting-rod forgings forged from AZ31 alloy from a preform extruded using the conventional method

Odkuwka / Forging		Opis wad / Description of defects	
150 ° C			<p>Na wszystkich odkuwkach występuje niewypełnienie matrycy, pęknięcia powierzchniowe oraz rozwarstwienie materiału w obszarze żebra podczas okrawania.</p> <p><i>On all forgings, there are incomplete die filling, surface cracks, and delamination of the material in the area of the rib during trimming.</i></p>
175 ° C			<p>Na wszystkich odkuwkach widoczne minimalne niewypełnienie matrycy oraz pęknięcia powierzchniowe.</p> <p><i>On all forgings, minimal incomplete filling of the die and surface cracks are visible.</i></p>
200 ° C			<p>Na odkuwkach widoczne lokalne niewypełnienie wykroju oraz mikropęknięcia na powierzchni.</p> <p><i>On forgings, local incomplete filling of the die cavity and micro-cracks on the surface are visible.</i></p>
225 ° C		<p>Brak wad <i>No defects</i></p>	
250 ° C		<p>Brak wad <i>No defects</i></p>	

Tablica 2. Zestawienie odkuwek korbowodu kutego ze stopu AZ31 ze wsadu wyciśniętego metodą KOBO  
 Table 2. List of connecting-rod forgings forged from AZ31 alloy from a preform extruded using the KOBO method

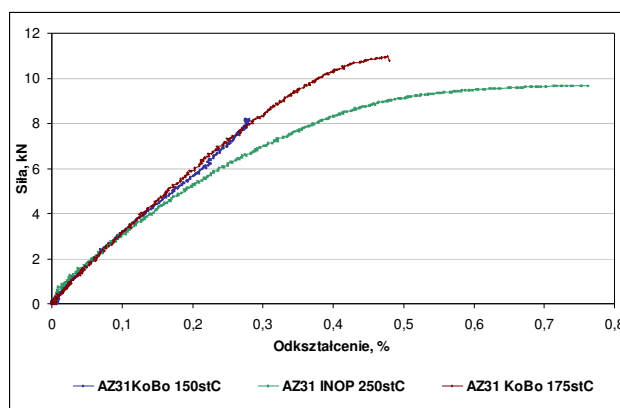
Odkuwka / Forging		Opis wad / Description of defects	
150 °C			<p>Na wszystkich odkuwkach minimalne niewypełnienie matrycy oraz pęknięcia powierzchniowe.</p> <p><i>On all forgings, minimal incomplete filling of the die and surface cracks are visible.</i></p>
175 °C			<p>Na części odkuwek pojawiające się drobne pęknięcia powierzchniowe.</p> <p><i>Small surface cracks appear on parts of forgings.</i></p>
200 °C		<p>Bez wad <i>No defects</i></p>	
225 °C		<p>Bez wad <i>No defects</i></p>	
250 °C		<p>Bez wad <i>No defects</i></p>	

Pozwala to wnioskować, że dla wsadu wytworzonego na zimno metodą KOBO graniczna temperatura kucia zawiera się w przedziale 175-200 °C, pozwalając na prawidłowe ukształtowanie złożonej geometrii bez śladu mikropęknięć na powierzchni odkuwek.

W celu weryfikacji wpływu metody przygotowania wsadu na własności wytrzymałościowe wyrobów końcowych, odkuwki korbowodów poddano badaniom wytrzymałości w statycznej próbie rozciągania. Objęto nimi odkuwki bez widocznych wad powierzchniowych, czyli wytworzone metodą KOBO w temperaturze 150 i 175 °C oraz odkuwkę kutą w temperaturze 250 °C z wsadu wytworzonego metodą tradycyjną. Do mocowania odkuwki w maszynie wytrzymałościowej wykorzystano uchwyt z pasowanymi kołkami przechodzącymi przez otwory wykonane w główkach korbowodu. Na rys. 3 przedstawiono wykresy prób rozciągania, a na rys. 4 - widok przykładowych korbowodów po próbie. W tabelicy 3 zestawiono wartości sił, przy której nastąpiło odkształcenie plastyczne i zerwanie odkuwek.

*makes it possible to produce forgings with visible surface defects. This makes it possible to conclude, that for a preform made using the cold KOBO method, the threshold forging temperature is within the range of 175-200 °C, enabling the correct forming of complex geometry without traces of microcracks on the surfaces of forgings.*

*To verify the influence of the preform preparation method on the strength properties of final products, connecting-rod forgings were subjected to strength tests during a static tensile test. Forgings with no visible surface defects, that is, forgings produced using the KOBO method at a temperature of 150 and 175 °C, as well as a forging forged at the temperature of 250 °C from a preform made using the conventional method, were subjected to tests. A grip with fitted pins passing through openings made in connecting-rod heads was used to fasten the forgings in the tester. Fig. 3 presents charts of tensile tests, and fig. 4 – a view of exemplary connecting-rods after the test. Table 3 lists the values of forces at which plastic deformation and breaking of forgings took place.*

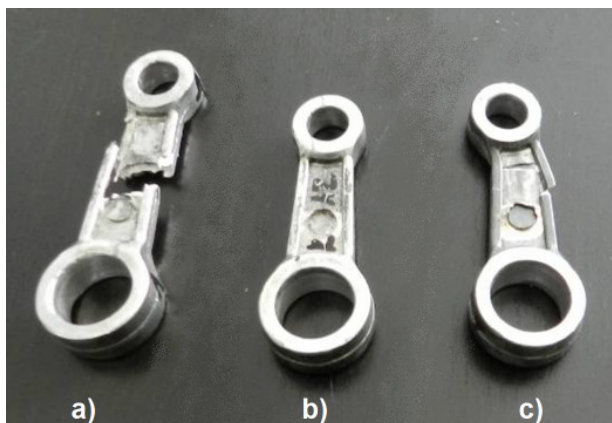


Rys. 3. Wykres zależności siły od odkształcenia dla próbek wykonanych ze stopu AZ31

*Fig. 3. Chart of the dependency of force on strain for samples made from AZ31 alloy*

Tablica 3. Siły potrzebne do zerwania korbowodów wyznaczone w statycznej próbie rozciągania  
 Table 3. Forces necessary to break connecting-rods as determined during the static tensile test

Nazwa próbki Sample name	$F_{p0,2}$	$F_m$
	kN	kN
AZ31 KOBO 150°C	---	<b>8,2</b>
AZ31 KOBO 175°C	8,8	<b>11</b>
AZ31 INOP 250°C	8,2	<b>10,2</b>



Rys. 4. Widok przykładowych korbowodów po statycznej próbie rozciągania:

a) AZ31 KOBO 150°C, b) AZ31 KOBO 175°C, c) AZ31 INOP 250°

Fig. 4. View of exemplary connecting-rods after the static tensile test:

a) AZ31 KOBO 150 °C, b) AZ31 KOBO 175 °C, c) AZ31 INOP 250 °

Korbowody wykonane ze stopu AZ31 z prętów wytworzonych na zimno metoda KOBO wykazują o ok. 10% większą wytrzymałość na rozciąganie (zarówno w zakresie osiągnięcia siły odkształcenia plastycznego jak i siły zrywającej) w stosunku do korbowodów kutych z prętów wytworzonych metoda tradycyjną.

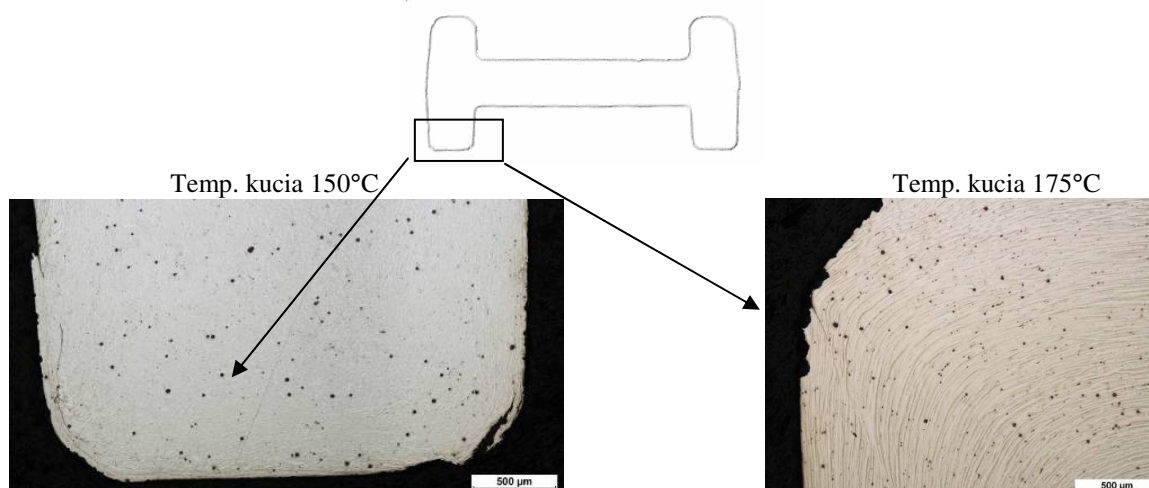
Następnie odkuwki korbowodów odkutych w temperaturach 150 i 175 °C poddano obserwacjom mikroskopowym.

Na rys. 5 przedstawiono zaobserwowane wady w warstwie powierzchniowej odkuwek kutych z wsadu wytworzonego metoda KOBO w obszarze główki korbowodu.

Connecting-rods made from AZ31 alloy from rods produced using the cold KOBO method exhibit an approx. 10% greater tensile strength (in the scope of achieving plastic strain force as well as breaking force) in comparison to connecting-rods forged from rods produced using the conventional method.

Next, connecting-rod forgings forged at temperatures of 150 and 175 °C were subjected to observation under a microscope.

Fig. 5 presents observed defects in the surface layer of forgings forged from a preform made using the KOBO method in the area of the connecting-rod head.



Rys. 5. Odkuwki korbowodu kute z prętów wytworzonych metoda KOBO w obszarze główki korbowodu:

a) w temperaturze 150 °C, b) w temperaturze 175°C

Fig. 5. Connecting-rod forgings forged from rods produced using the KOBO method in the area of the connecting-rod head: a) at a temperature of 150 °C, b) at a temperature of 175 °C



Odkuwki kute z prętów wytworzonych metodą KOBO w temperaturze 150 °C wykazują wyraźne, duże zakucia o długościach sięgających ponad 1 mm oraz pęknięcia. Wady takie dyskwalifikują odkuwki z eksploatacji i stanowią prawdopodobną przyczynę niższej wytrzymałości na rozciąganie.

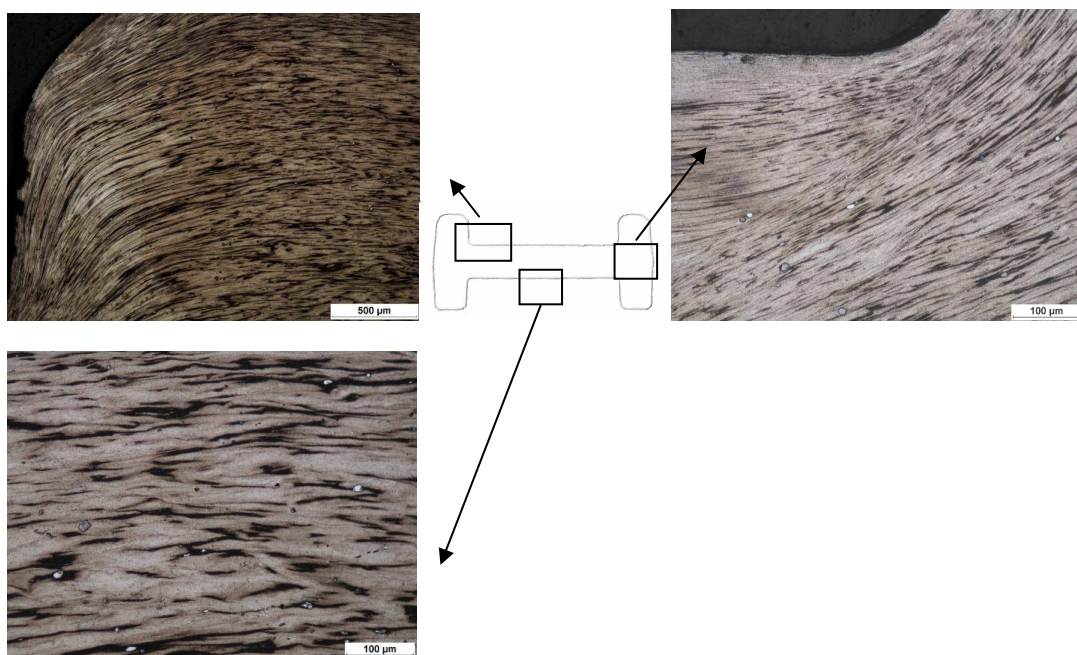
Dla odkuwek kutych ze wsadu wytworzonego metodą KOBO w temperaturze 175 °C dostrzec można pojedyncze, drobne pęknięcia przypowierzchniowe. Pęknięcia takie obserwowano jedynie przy próbkach niesmarowanych w czasie procesu kucia. W przypadku zastosowania smaru grafitowego pęknięć nie obserwowano (rys. 6). Długość pęknięć nie przekracza 500 µm. Najprawdopodobniejszą przyczyną tych pęknięć było niewystarczające smarowanie.

Na rysunku 6 pokazano dokumentację mikroskopową odkuwek korbowodu kutych ze stopu AZ31 w temperaturze 175°C z prętów wytworzonych metodą KOBO, w miejscach najintensywniejszego płynięcia metalu. Zachowana zostaje struktura włóknista po procesie wyciskania na zimno metodą KOBO [3], jednakże włókna ulegają wydłużeniu i układają się w kierunku płynięcia materiału. Zauważyć można również strefy odpowiadające zróżnicowanej prędkości płynięcia materiału. W strefach tych nie obserwuje się jednak pęknięć.

*Forgings forged from rods produced using the KOBO method at a temperature of 150 °C clearly exhibit large lappings with lengths reaching over 1 mm as well as cracks. Such defects disqualify the use of forgings and constitute the probable cause of a lower tensile strength.*

*For forgings forged from a preform made using the KOBO method at a temperature of 175 °C, single, small surface cracks can be observed. Such cracks were only observed in samples that were not lubricated during the forging process. In the case of the application of graphite lubricant, cracks were not observed (fig. 6). The length of cracks does not exceed 500 µm. The most probable cause of these cracks was insufficient lubrication.*

*Figure 6 shows microscope documentation of connecting-rod forgings forged from AZ31 alloy at a temperature of 175 °C from rods produced using the KOBO method, in areas of the most intensive metal flow. After the KOBO cold extrusion process, the fibrous structure is maintained [3], however fibers are subject to elongation and are arranged in the direction of material flow. Zones corresponding to variable material flow rate can also be observed. No cracks are observed in these zones, however.*



Rys. 6. Odkuwki z prętów wytworzonych metodą KOB, kute w temperaturze 175 °C

Fig. 6. Forgings from rods produced using the KOBO method, forged at a temperature of 175 °C

### 3. WNIOSKI

W odróżnieniu od metod ECAP, struktura wyjściowa wsadu ze stopu AZ31 wytworzonego metodą KOBO [3] nie wykazuje cech ultra-drobnoziarnistości.

Przedstawione powyżej wyniki wskazują, że odkształcenie stopu magnezu AZ31 w warunkach cyklicznie zmiennej drogi odkształcenia polepsza jego własności plastyczne, dzięki czemu możliwe było dalsze prowadzenie odkształcenia w procesie kucia i to w zakresie obniżonych temperatur (pomiędzy 175-200°C), w stosunku do tradycyjnie wytworzonego wsadu. W procesie kucia nie zatracą się podwyższonych własności wytrzymałościowych uzyskanych po procesie wyciskania KOBO, o czym świadczy 10% wzrost siły zrywającej odkuwki w procesie rozciągania.

Utrzymanie dobrych własności w dalszych operacjach kucia wymaga jednak utrzymania wysokiego reżimu technologicznego, a w szczególności utrzymania stałej temperatury narzędzi, stałego interwału czasowego pomiędzy wyjęciem wsadu z pieca a uruchomieniem procesu kształtowania oraz odpowiedniego smarowania.

### 3. CONCLUSIONS

*In contrast to ECAP methods, the structure of the AZ31 alloy preform made using the KOBO method [3] does not exhibit ultra-fine-grain qualities.*

*The results presented above indicate that the deformation of the AZ31 magnesium alloy under conditions of a cyclically variable strain path improve its plastic properties, thanks to which it was possible to introduce strain in the forging process in the range of decreased temperatures (between 175-200 °C) in comparison to a conventionally made preform. During the forging process, increased strength properties obtained after the KOBO extrusion process are not lost, as shown by the 10% increase in the breaking force of the forging during the tensile test.*

*Maintenance of good properties in further forging operations, however, requires the maintenance of a high-level technological regime, especially maintenance of a constant tool temperature, a fixed time interval between the removal of the preform from the furnace at starting of the forming process, as well as the appropriate lubrication.*

### LITERATURA/REFERENCES

- [1] Janeček M., Popov M., Krieger M.G., Hellmig R.J., Estrin Y.: Mechanical properties and microstructure of a Mg alloy AZ31 prepared by equal-channel angular pressing. *Materials Science and Engineering* 2007, 462(1-2), 116-120.
- [2] Su C.W., Lu L., Lai M.O.: Mechanical behaviour and texture of annealed AZ31 Mg alloy deformed by ECAP. *Materials Science and Technology* 2007, 23(3), 290-296.
- [3] Jin L., Lin D., Mao D., Zeng X., Ding W.: Mechanical properties and microstructure of AZ31 Mg alloy processed by two-step equal channel angular extrusion. *Materials Letters* 2005, 59(18), 2267-2270.
- [4] Liu T., Liu J., Lu L., Liu Y., Wang Z.: Change-Channel Angular Extrusion of Magnesium Alloy AZ31. *Materials Transactions* 2009, 50(04), 765-770.
- [5] Ravi Kumar N.V., Blandin J.J., Desrayaud C., Montheillet F., Suéry M.: Grain refinement in AZ91 magnesium alloy during thermomechanical processing. *Materials Science and Engineering* 2003, 359 (1-2), 150-157.
- [6] Ziółkiewicz S., Gąsiorkiewicz M., Wesołowska P., Szczepanik S., Szyndler R.: Wpływ obróbki KOBO na właściwości plastyczne stopu magnezu AZ31. *Obróbka Plastyczna Metali* 2012, t. XXIII nr 2 s. 57-67.
- [7] Ziółkiewicz S., Gąsiorkiewicz M., Wesołowska P., Szczepanik S., Szyndler R.: Wpływ obróbki KOBO na właściwości plastyczne stopu magnezu AM60. *Obróbka Plastyczna Metali* 2012 t. XXIII nr 3 s. 149-158.