

Dr inż. Beata PACHUTKO, dr inż. Stanisław ZIÓŁKIEWICZ  
Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań  
E-mail: pachutko@inop.poznan.pl

# Badania metalograficzne odlewniczego stopu magnezu AZ91 po współbieżnym wyciskaniu

## *Metallographic investigation of AZ91 magnesium casting alloy after the forward extrusion*

### Streszczenie

W publikacji przedstawiono wyniki badań metalograficznych stopu magnezu AZ91 - wlewka surowego i po procesach przesycania oraz współbieżnie wyciskanych prętów. Procesy wyciskania prowadzono w temperaturze: 280°C, 300°C, 316°C i 338°C przy współczynniku wydłużenia  $\lambda$  wynoszącym 4,14 i 5,78 odpowiednio dla średnic wyciskanych prętów wynoszących 16 mm i 20 mm. Jedynie w wyniku wyciskania w temperaturze 280°C otrzymano pręty pozbawione wad (nieciągłości) powierzchniowych i wewnętrznych. Zwiększanie temperatury procesu od 300°C do 338°C skutkowało pojawieniem się nieciągłości wewnętrznych lub powierzchniowych w skali makroskopowej. Podczas procesu wyciskania następowała dynamiczna rekrytalizacja ziaren. Gęstość wydzieliń fazy  $\gamma$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> w pasmach i skupiskach wyraźnie zmniejszyła się, kiedy proces wyciskania prowadzono w największej temperaturze.

### Abstract

*The paper presents the results of metallographic examination of AZ91 magnesium alloy – a raw ingot and one after the processes of supersaturation and forward extrusion of rods. The extrusion processes have been performed at the temperatures of 280°C, 316°C and 338°C with the elongation coefficient,  $\lambda$  equal to 4.14 and 5.78, respectively, for the extruded rod diameters of 16 mm and 20 mm. Rods free of surface and internal defects (discontinuities have been obtained only as result of extrusion at the temperature of 280°C. Increase of the process temperature from 300°C to 338°C has resulted in internal or surface discontinuities in the macroscopic scale. During the extrusion process, dynamic recrystallization of grains took place. The density of the secretions of phase  $\gamma$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> has clearly decreased when the process of extrusion was performed at the highest temperature.*

**Słowa kluczowe:** stop magnezu, metalografia

**Keywords:** magnesium alloy, metalography

## 1. WSTĘP

Stop AZ91 jest obecnie najbardziej popularnym stopem odlewniczym na osnowie magnezu, szczególnie ze względu na dobrą kombinację właściwości takich, jak: lejność, plastyczność i koszt. Stop ten wykazuje nadplastyczność w niskiej temperaturze, kiedy wielkość ziaren wynosi poniżej 10  $\mu$ m [1]. Drobnodziarnistą strukturę stopu AZ91 można uzyskać w wyniku różnej obróbki plastycznej, takiej jak: walcowanie, wyciskanie oraz metodą ECAE (equal channel angular extrusion) [1, 2].

## 1. INTRODUCTION

*The AZ91 alloy is the most popular casting alloy on magnesium matrix, especially for its good combination of such properties as: castability, plasticity and cost. The alloy reveals superplasticity at low temperature when the grain size is below 10  $\mu$ m [1]. Lose-grained structure of the AZ91 alloy can be obtained as result of various forming processes, such as rolling, extrusion and by the ECAE method (equal channel angular extrusion) [1, 2].*

Głównymi składnikami stopu AZ91 są: aluminium o zawartości  $8,5 \div 9,5\%$  wag., cynk o zawartości  $0,45 \div 0,9\%$  wag. i mangan o zawartości  $0,17 \div 0,3\%$  wag. Stężenie masowe pozostałych pierwiastków stopowych, takich jak: krzem, miedź, nikiel, żelazo i beryl nie przekracza wartości  $0,1\%$ . Rola podstawowych składników stopowych stopu jest następująca: aluminium zwiększa wytrzymałość na rozciąganie i twardość, polepsza leżność i zmniejsza skurcz, cynk zwiększa wytrzymałość w temperaturze pokojowej i wydłużenie, również polepsza leżność, a mangan dodaje się do stopu magnezu w celu poprawy odporności na korozję. Niemniej duża zawartość aluminium w stopie AZ91 powoduje małą plastyczność w temperaturze pokojowej, co spowodowane jest występowaniem na granicach ziaren, kruchej fazy międzymetalicznej  $Mg_{17}Al_{12}$  [3-5].

Z izotermicznych wykresów równowagi fazowej, dla układów Mg-Al i Mg-Zn, wynika, że stop AZ91 znajduje się w obszarze dwufazowym  $\alpha$ -Mg (roztwór stały  $\alpha$  magnezu o zmiennej zawartości aluminium zgodnie z linią solvus) i fazy  $\gamma$ - $Mg_{17}Al_{12}$  (o zawartości  $37,7\%$  wag. aluminium) [6, 7]. Skutkiem tego stop AZ91 jest podatny na umocnienie wydzieleniowe. Efekt umocnienia wskutek obróbki cieplnej zależy od właściwości wydzielonej fazy, wielkości wydzielań oraz stopnia ich dyspersji [8].

Celem badań podjętych w niniejszej pracy były obserwacje struktury stopu AZ91 po współbieżnym wyciskaniu w różnych warunkach.

## 2. BADANY MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Badany materiał stanowiły obrobione mechanicznie wlewki o średnicy ok. 39,8 mm ze stopu magnezu AZ91. Dostawcą stopu była firma Magnesium Elektron UK (Wielka Brytania). Wlewki zostały pocięte na wstępniaki o długości 40 mm, a następnie poddane współbieżnemu wyciskaniu na prasie PYE250, wyposażonej w przyrząd do wyciskania izotermicznego z siłomierzem typu C6A (HBM) o maksymalnej sile obciążającej 2 MN, czujnik drogi typu WA 500 (HBM) oraz komputer

*The major components of the AZ91 alloy are: aluminium with the content of  $8.5 \div 9.5\%$  wt, zinc with the content of  $0.45 \div 0.9\%$  wt. Mass concentration of the other alloy elements, such as silicon, copper, nickel, iron and beryllium does not exceed  $0.1\%$ . The role of the major alloy components is as follows: aluminium increases the tensile strength and hardness, improves castability and reduces shrinkage; zinc increases strength at room temperature and elongation; it also improves castability and manganese is added to the magnesium alloy to improve its corrosion resistance. Nevertheless, high content of aluminium in the AZ91 alloy results in low plasticity at room temperature due to the presence of brittle intermetallic phase,  $Mg_{17}Al_{12}$ , at the grain boundaries [3-5].*

*Isotermic graphs of phase balance for Mg-Al arrangements indicate that AZ91 alloy is in the two-phase  $\alpha$ -Mg area (solid solution of  $\alpha$ -magnesium with variable aluminium content in accordance with solvus line) and phase  $\gamma$ - $Mg_{17}Al_{12}$  (with aluminium content of  $37.7\%$  wt) [6,7]. Due to that the AZ91 alloy is susceptible to secretion hardening. The effect of hardening due to heat treatment depends on the properties of the precipitated phase, the magnitude of secretions and the degree of their dispersion [8].*

*The purpose of the examinations undertaken in the present work was to observe the structure of the AZ91 alloy after forward extrusion in various conditions.*

## 2. THE MATERIAL UNDER EXAMINATION AND EXAMINATION METHODOLOGY

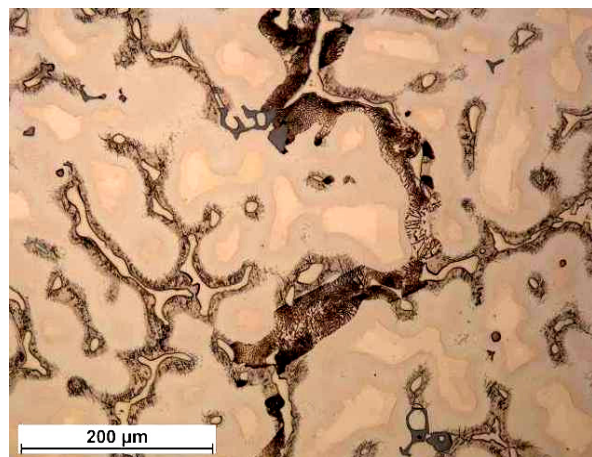
*The material under examination was machined ingots of AZ91 magnesium alloy, with the diameter of about 39.8 mm. The supplier of the alloy was Magnesium Elektron UK (Great Britain). The ingots have been cut into 40 mm long blanks and then subjected to forward extrusion on a PYE250 press provided with a device for isothermic extrusion with a force gauge type C6A (HBM) with maximum load force of 2 MN, a path sensor type WA 500 (HBM) and an industrial computer with a recording software [8].*

przemysłowy z oprogramowaniem rejestrującym [8]. Wstępniaki do wyciskania stosowano w stanie surowym oraz przesyconym w warunkach: 430°C/12 godzin - chłodzenie azotem lub 418°C/10 godzin - chłodzenie azotem. Procesy wyciskania prowadzono w temperaturze: 280°C, 300°C, 316°C i 338°C przy współczynniku wydłużenia  $\lambda = l/l_0$  o wartości 4,14 - dla średnicy wyciśniętego pręta wynoszącej 20 mm i  $\lambda$  o wartości 5,78, dla średnicy wyciśniętego pręta wynoszącej 16 mm.

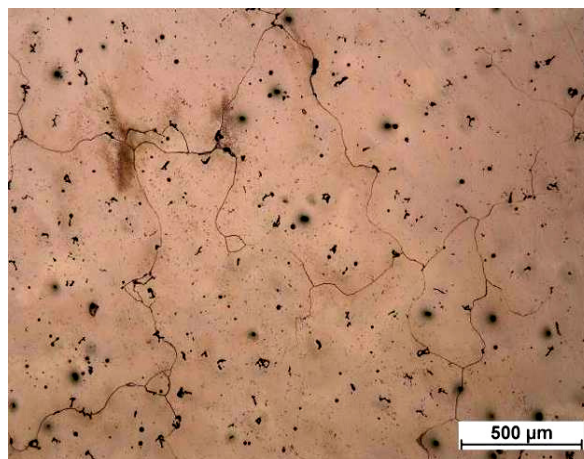
Badania struktury wykonano na zglądach metalograficznych próbek pobranych wzdłużnie z wlewka surowego i po przesycaaniu oraz z wyciśniętych prętów, trawionych 3% roztworem kwasu azotowego w alkoholu etylowym (nital). W badaniach stosowano technikę jasnego pola za pomocą mikroskopu świetlnego Eclipse L150 (Nikon).

### 3. WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

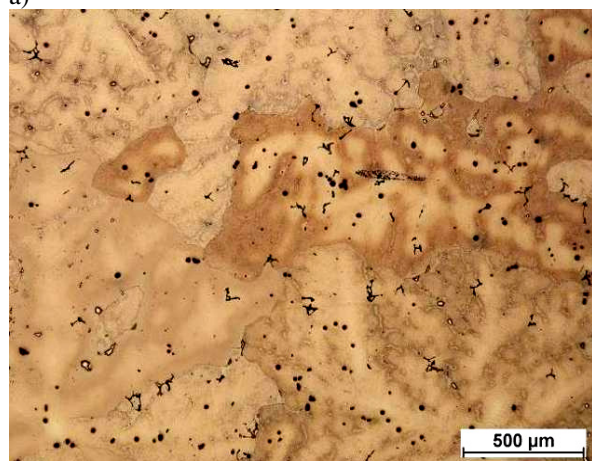
Strukturę materiału wlewka w stanie surowym i po zabiegach przesycaania pokazano na rys. 1.



a)



b)



c)

The blanks for extrusion were in raw condition and supersaturated in the following conditions: 430°C/12 hours – nitrogen cooling or 418°C/10 hours – nitrogen cooling. The extrusion processes have been performed at the temperatures of: 280°C, 300°C, 316°C and 338°C, with the coefficient of elongation,  $\lambda = l/l_0$  equal to 4.14 for the extruded rod diameter of 20 mm and  $\lambda$  equal to 5.78 for the extruded rod diameter of 16 mm.

Structure examinations have been performed on metallographic microsections of samples longitudinally taken from a raw ingot and one after supersaturation, as well as from extruded rods etched with a 3% solution of nitric acid in ethyl alcohol (nital). The examinations have been effected with the use of the bright-field technique by means of an Eclipse L150 optical microscope (Nikon).

### 3. EXAMINATION RESULTS AND DISCUSSION OF THEM

The structure of a raw ingot and one after the operations of supersaturation are shown in fig. 1.

Rys. 1. Struktura w środkowej części wlewka ze stopu AZ91: a) stan surowy, b) po przesycaaniu w warunkach: 430°C/12 godzin, chłodzenie azotem, c) po przesycaaniu w warunkach: 418°C/10 godzin, chłodzenie azotem

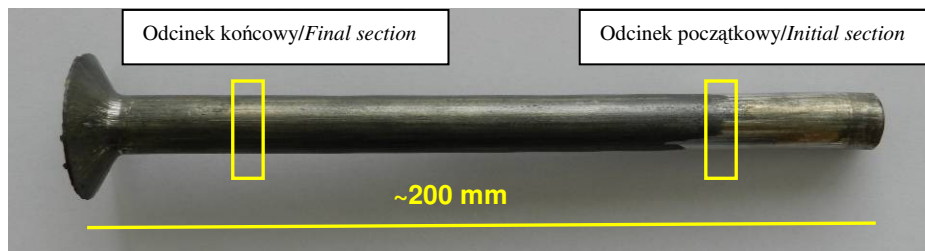
Fig. 1. Material structure in the middle part of an AZ91 alloy ingot: a) raw condition, b) after supersaturation under the following conditions: 430°C/12 hours, nitrogen cooling, c) after supersaturation under the following conditions: 418°C/10 hours, nitrogen cooling

W strukturze wlewka surowego widoczne są masywne i płytkowe wydzielania fazy  $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  na granicach ziaren dendrytów fazy  $\alpha\text{-Mg}$  [6, 7]. Po przesycaniu z temperatury  $430^\circ\text{C}$  w czasie 12 godzin lub  $418^\circ\text{C}$  w ciągu 10 godzin, masywne wydzielania fazy  $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  uległy w większości rozpuszczeniu, ale nastąpił niejednorodny rozrost ziaren fazy  $\alpha\text{-Mg}$ . Ziarna miały długość od ok. 0,06 mm do ok. 1,7 mm. Nie stwierdzono istotnych różnic w strukturze wlewków przesycanych w ww. warunkach.

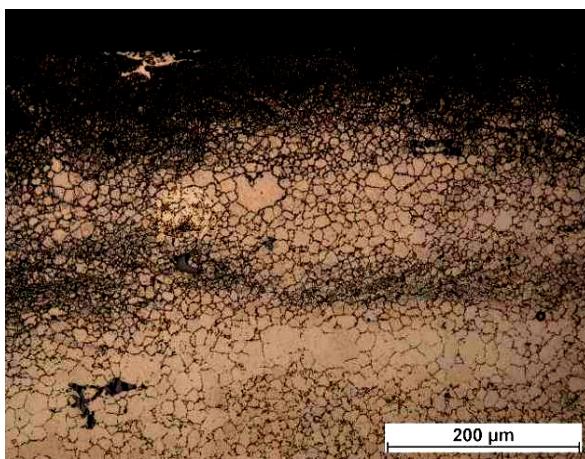
Miejsca pobrania próbek z odcinków początkowego i końcowego pręta o średnicy 16 mm, który wyciśnięto współbieżnie w temperaturze  $280^\circ\text{C}$ , po uprzednim przesycaniu w warunkach  $430^\circ\text{C}/12$  godzin, pokazano na rys. 2. Strukturę próbek na zglądach wzdłużnych pobranych z tego pręta przedstawiono na rys. 3.

*In the structure of a raw ingot, massive and lamellar secretions of phase  $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  at the grain boundaries of the phase  $\alpha\text{-Mg}$  dendrites [6, 7]. After supersaturation from  $430^\circ\text{C}$  for 12 hours or from  $418^\circ\text{C}$  for 10 hours, most secretions of phase  $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  have been dissolved but heterogeneous growth of the grains of phase  $\alpha\text{-Mg}$  has taken place. The grains had the length of 0.06 mm to about 1.7 mm. No significant differences have been found in the structure of the ingots supersaturated under the above mentioned conditions.*

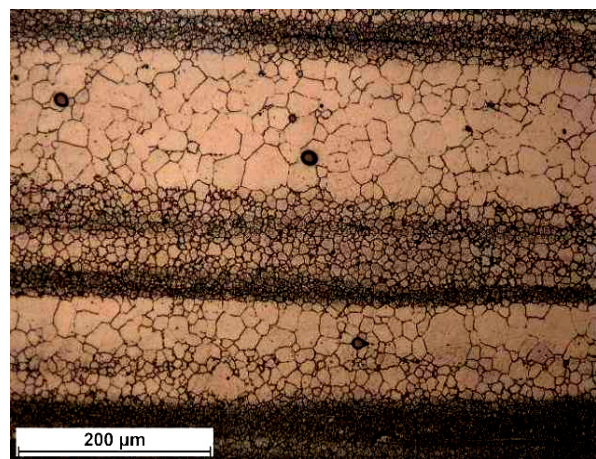
*Locations of sampling in the initial and final sections of a rod dia. 16 mm, forwardly extruded at  $280^\circ\text{C}$ , after supersaturation at  $430^\circ\text{C}$  for 12 hours, can be seen in fig. 2. The structure of samples on the longitudinal microsections taken from that rod have been shown in fig.3.*



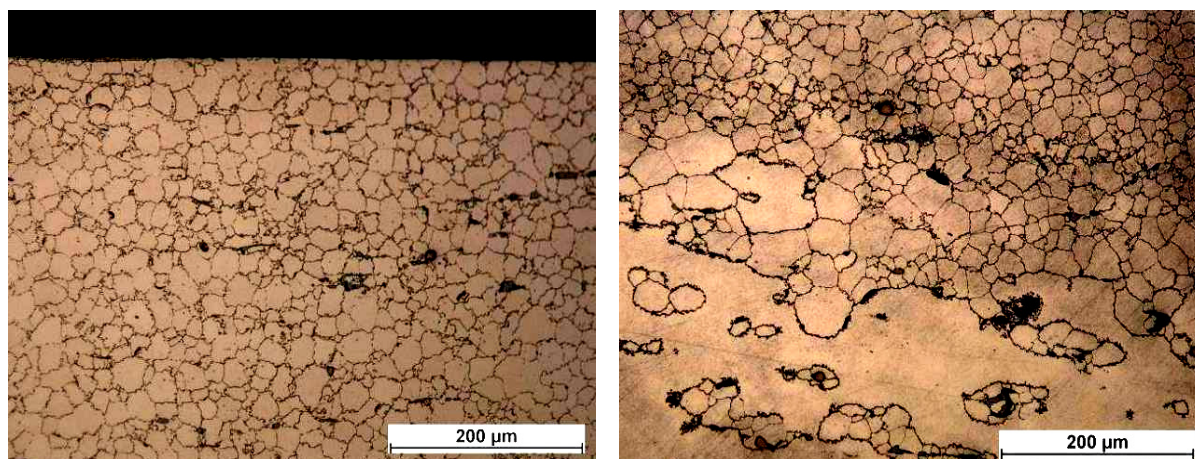
Rys. 2. Schemat miejsc pobrania próbek z wyciśniętego pręta o średnicy 16 mm  
 Fig. 2. A diagram of the locations of sampling on an extruded rod dia. 16 mm



a) obszar przy powierzchni (area at the surface)



b) obszar w środku próbki (area inside the sample)

c) obszar przy powierzchni (*area at the surface*)d) obszar w środku próbki (*area inside the sample*)

Rys. 3. Struktura pręta o średnicy 16 mm po wyciskaniu w temperaturze 280°C. Warunki przesylenia 430°C/12 godzin, a) i b) – próbka pobrana z odcinka początkowego pręta, c) i d) – próbka pobrana z odcinka końcowego pręta

Fig. 3. The structure of a rod, dia. 16 mm after extrusion at 280°C. Supersaturation conditions; 430°C/12 hours, a) and b) – a sample taken from the initial section of the rod; c) and d) – sample taken from the final section of the rod

W próbce pobranej wzdłużnie z początkowego odcinka pręta o średnicy 16 mm wyciskanego w temperaturze 280°C zaobserwowano pasmowy układ wydzieleni fazy  $\gamma$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> oraz zrekrystalizowanych dynamicznie ziaren. Ziarna w pasmach wydzieleni fazy  $\gamma$  były znacznie drobniejsze od ziaren znajdujących się między pasmami (rys. 3a i 3b). Gęstość pasm w strefie środkowej próbki (rys. 3b) była większa w porównaniu z gęstością pasm przy powierzchni próbki (rys. 3a). Natomiast w próbce pobranej z odcinka końcowego wyciskanego w temperaturze 280°C nie stwierdzono pasmowego układu wydzieleni fazy  $\gamma$  (rys. 3c i 3d). W strefie przypowierzchniowej nastąpiła dynamiczna rekrytalizacja ziaren. W strefie środkowej próbki nastąpiła niecałkowita rekrytalizacja, ponieważ zidentyfikowano obszar z dużym ziarnem pierwotnymi i łańcuchkami zrekrystalizowanych ziaren.

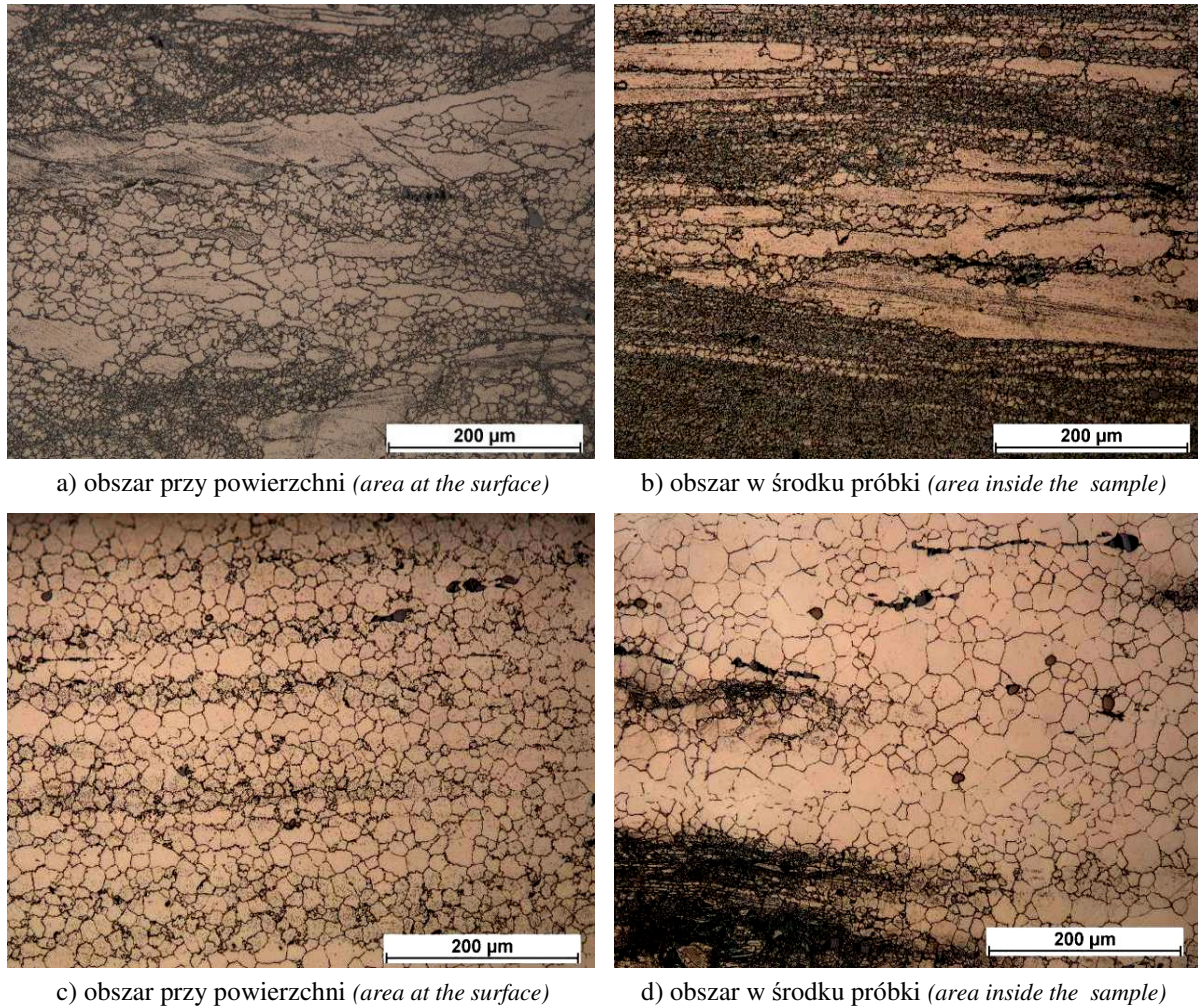
Wyniki obserwacji mikroskopowych próbek pobranych zgodnie ze schematem jak na rys. 2, z pręta o średnicy 16 mm, ale wyciskanego w temperaturze 295°C pokazano na rys. 4.

W próbce pobranej z początkowego odcinka pręta o średnicy 16 mm, który wyciskano w temperaturze 295°C, zaobserwowano odkształcone plastycznie ziarna pierwotne i łańcuchki ziaren zrekrystalizowanych na granicach ziaren pierwotnych, zarówno w obszarze przy powierzchni, jak i w środku próbki (rys. 4a, b).

*In a sample taken longitudinally from the initial section of the 16 mm dia. rod extruded at 280°C, a band arrangement of phase  $\gamma$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> secretions and dynamically recrystallized grains has been observed. The grains in the bands of  $\gamma$  phase secretions were much finer than those between the bands (fig. 3a and 3b). The density of the bands in the middle zone of the sample (fig. 3b) was larger as compared to the density of bands at the sample surface (fig. 3a). In the sample taken from the final section of the rod extruded at 280°C a band arrangement of  $\gamma$  phase secretions has not been observed (fig. 3c and 3d). In the near-surface zone, dynamic recrystallization of grains has taken place. In the inner zone of the sample an incomplete recrystallization has taken place for an area with big primary grain and chains of recrystallized grains has been identified.*

*The results of microscopic inspection of samples taken in accordance with the diagram as in fig. 2 from a rod dia. 16 mm, but extruded at 295°C, can be seen in fig. 4.*

*In the sample taken from the initial section of the rod extruded at 295°C, plastically deformed primary grains have been observed, as well as chains of recrystallized grains at the boundaries of the primary grains, both in the area near the surface and inside the sample (fig. 4a, b).*

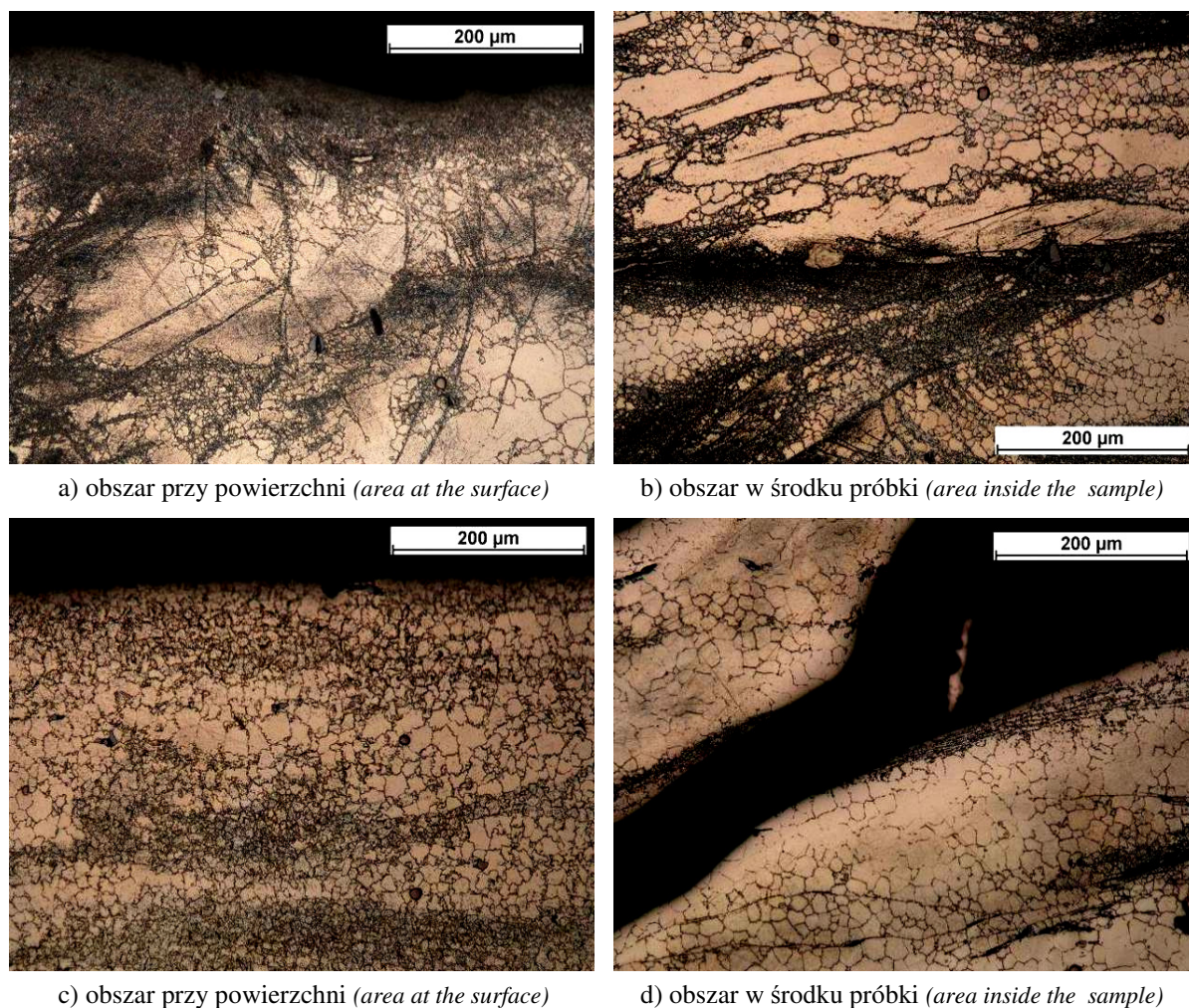


Rys. 4. Struktura pręta o średnicy 16 mm po wyciskaniu w temperaturze 295°C. Warunki przesylenia 430°C/12 godzin, a) i b) – próbka pobrana z odcinka początkowego pręta, c) i d) – próbka pobrana z odcinka końcowego pręta

Fig. 4. The structure of a 16 mm dia. rod after extrusion at 295°C. Conditions of supersaturation: 430°C/12 hours, a) and b) – a sample taken from the initial section of the rod, c) and d) – a sample taken from the final section of the rod

W obszarze środkowym, w pasmach wydzieleni fazy  $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ , zrekrystalizowane ziarna były znacznie drobniejsze, niż w obszarach pomiędzy tymi pasmami. W obszarze przypowierzchniowym próbki pobranej z odcinka końcowego pręta nastąpiła całkowita rekrytalizacja ziaren, których wielkość była równomierna w porównaniu ze środkiem próbki, gdzie proces dynamicznej rekrytalizacji nie w pełni został zakończony (rys. 4c i 4d). Różnice w strukturze próbek wyciskanych w temperaturze 280°C i 295°C mogą wynikać z różnej odległości pobrania próbek z początkowych odcinków wyciśniętych prętów. Mogło też wystąpić szybsze wychłodzenie wyciśniętej części, a tym samym różne odkształcenie plastyczne materiału na długości pręta.

In the middle area, in the bands of phase  $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  secretions, the recrystallized grains were much finer than those in the areas between the bands. In the near-surface area of the sample taken from the final section of the rod, complete recrystallization of the grains took place and their size was even as compared to the sample inside where the process of dynamic recrystallization has not been fully completed (fig. 4c and 4d). The differences in the structure of samples extruded at 280°C and 295°C can result from different distances of sampling from the initial sections of the extruded rods. There could also occur quicker cooling of the extruded part and, consequently, different plastic deformation of the material in the rod length.



Rys. 5. Struktura pręta o średnicy 20 mm po wyciskaniu w temperaturze 300°C. Warunki przesylenia 430°C/12 godzin, a) i b) – próbka pobrana z odcinka początkowego pręta, c) i d) – próbka pobrana z odcinka końcowego pręta

Fig. 5. The structure of a rod dia. 20 mm after extrusion at 300 °C. Conditions of supersaturation: 430 °C/12 hours, a) and b) – sample taken from the initial section of the rod, c) and d) – sample taken from the final section of the rod

Sposób pobrania próbek z pręta o średnicy 20 mm, po wyciskaniu w temperaturze 300°C był analogiczny jak dla pręta wyciskanego w temperaturze 280°C (rys. 2). Strukturę próbek pobranych z odcinka początkowego i końcowego pręta pokazano na rys. 5.

W próbce pobranej z początkowego odcinka pręta o średnicy 20 mm, wyciskanego w temperaturze 300°C, zaobserwowano w strefie przypowierzchniowej, jak i środkowej próbki, odkształcone plastycznie ziarna pierwotne, na granicach których utworzyły się łańcuszki dynamicznie zrekrytalizowanych ziaren o zróżnicowanej wielkości oraz nieregularne pasma wydzieleni fazy  $\gamma$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> (rys. 5a, b).

The way of sampling the 20 mm dia. rod after extrusion at 300°C was similar to that for the rod extruded 280°C (fig. 2). The structure of samples taken from the initial section and from the final one have been shown in fig. 5.

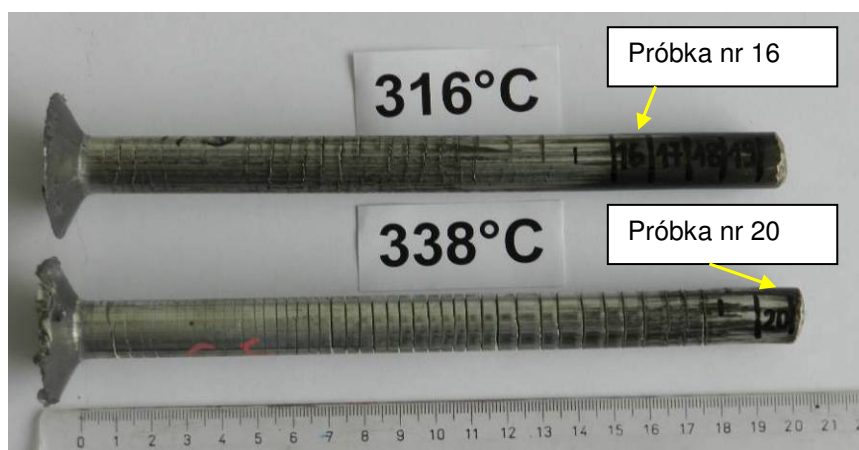
In the sample taken from the initial section of a rod, dia. 20 mm, extruded at 300°C, both in the zone near the surface and that inside the sample, plastically deformed primary grains have been observed, at the boundaries of which chains of dynamically recrystallized grains of various sizes have been formed, as well as irregular bands of phase  $\gamma$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> secretions (fig. 5a, b).

Natomiast w obszarze przypowierzchniowym próbki pobranej z odcinka końcowego, po wyciskaniu w temperaturze 300°C, nastąpiła całkowita dynamiczna rekrystalizacja ziaren (rys. 5c). W strukturze tej próbki widoczne były też pasma wydzieleń fazy  $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ . Precyzyjne określenie, czy w strukturze próbki obserwowano pasma wydzieleń fazy  $\gamma$ , czy były to obszary byłych pasm ścinania, wymagało by dodatkowych badań na TEM. W próbce pobranej ze środka odcinka końcowego zaobserwowano wyrwanie materiału próbki i pęknięcie w paśmie wydzieleń fazy  $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  (rys. 5d). Wyniknęło to najprawdopodobniej z naprężeń, które powstały wskutek zróżnicowanej prędkości odkształcenia warstwy powierzchniowej i środkowej podczas wyciskania pręta. Ponadto struktura ziaren w tym obszarze była niejednorodna, co wskazuje na niecałkowity przebieg procesu rekrystalizacji.

Ze zwiększaniem temperatury wyciskania stopu AZ91 od temperatury 295°C do temperatury 316°C lub 338°C, przy współczynniku wydłużenia  $\lambda$  wynoszącym 5,78, następowało pęknięcie powierzchni wyciskanych prętów o średnicy 16 mm tak, że długość popęknanego odcinka obejmowała niemal cały pręt po wyciskaniu w największej temperaturze, co pokazano na rys. 6.

*On the other hand, in the area near the surface of the sample taken from the final section after extrusion at 300°C, complete dynamic recrystallization of grains has taken place (fig. 5c). In this sample structure, bands of phase  $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  have also been visible. Precise determination, whether bands of phase  $\gamma$  secretions have been observed in the sample structure or those were areas of former shearing bands would require additional examination on TEM. In a sample taken from the middle of the final section, material breaking has been observed and a crack in the band of phase  $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  secretions (fig. 5d) This has most probably resulted from the stresses which have arisen due to the different speed of deformation of the surface and inside layer during extrusion of the rod. Furthermore, the grain structure in that area was not homogenous, which indicates incomplete process of recrystallization.*

*When the temperature of extruding the AZ91 alloy was increased from 295°C up to 316°C or 338°C, with the coefficient of elongation,  $\lambda$ , equal to 5.78, cracking of the surface of extruded rods with the diameter of 16 mm took place so that the length of the cracked section covered almost all the rod after extrusion at the highest temperature, which can be seen in fig. 6.*



Rys. 6. Widok prętów o średnicy 16 mm, wyciskanych w temperaturze 316°C i 338°C oraz miejsca pobrania próbek do badań

*Fig. 6. A view of rods, dia. 16 mm, extruded at the temperature of 316°C and 338°C and sampling locations*

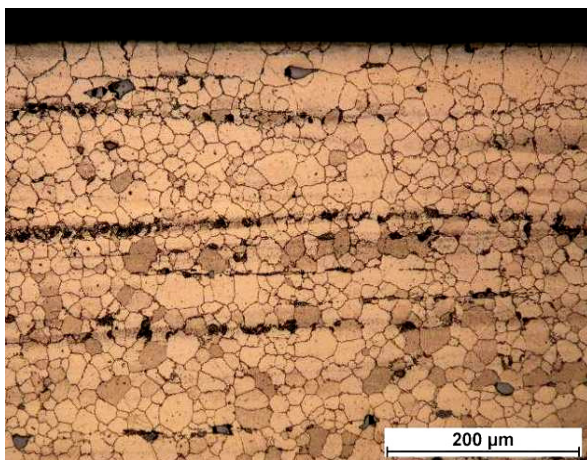


Strukturę próbki nr 16 pobranej z początkowego odcinka pręta o średnicy 16 mm wyciskanego w temperaturze 316°C przedstawiono na rys. 7, a próbki nr 20 wyciętej z pręta o tej samej średnicy wyciskanego w temperaturze 338°C pokazano na rys. 8.

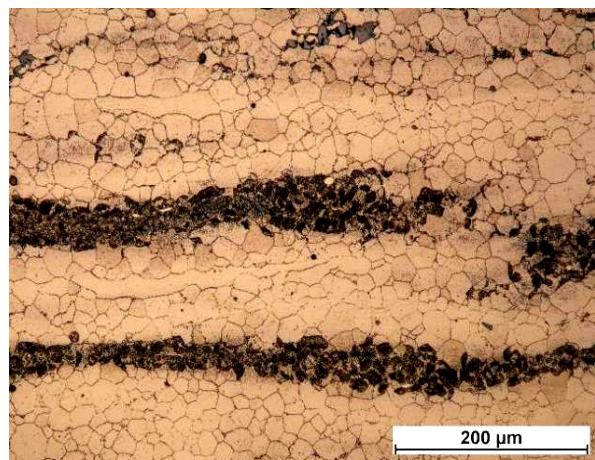
Zwiększenie temperatury procesu wspólnego wyciskania z 280°C do 316°C powoduje w początkowym odcinku pręta o średnicy 16 mm niewielki rozrost ziaren przy powierzchni (rys. 3a) oraz uzyskanie ziaren bardziej jednorodnych na przekroju pręta po wyciskaniu.

*The structure of sample no. 16 taken from the initial section of a rod with the diameter of 16 mm extruded at 316°C can be seen in fig. 7 and that of sample no. 20 cut out of a rod with the same diameter extruded at 338°C has been shown in fig. 8.*

*Increasing the temperature of the process of forward extrusion from 280°C to 316°C causes a little growth of grains at the surface in the initial section of the rod (fig. 3a) and obtaining of more homogenous grains in the rod cross section after extrusion.*



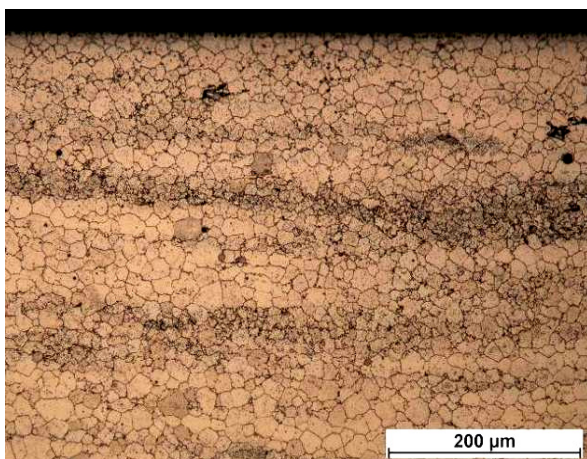
a) obszar przy powierzchni (*area at the surface*)



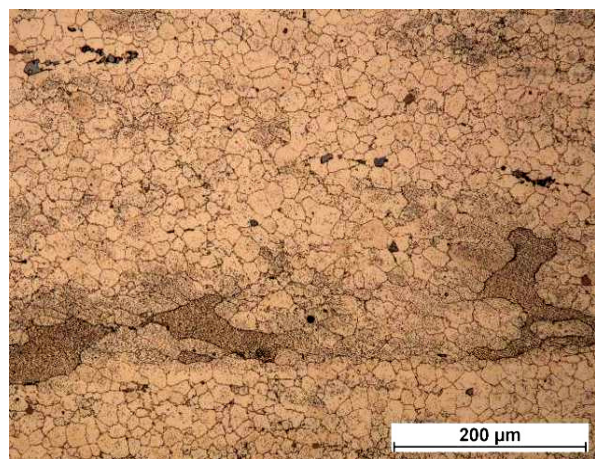
b) obszar w środku próbki (*area inside the sample*)

Rys. 7. Struktura pręta o średnicy 16 mm po wyciskaniu w temperaturze 316°C. Warunki przesycańia 418°C/10 godzin: a) i b) – próbka nr 16 pobrana z odcinka początkowego pręta

*Fig. 7. Structure of a rod with threwh diameter of 16 mm after extrusion at 316°C. Conditions of supersaturation: 418 °C/10 hours: a) and b) – sample no. 16 taken from the initial section of the rod*



a) obszar przy powierzchni (*area at the surface*)



b) obszar w środku próbki (*area inside the sample*)

Rys. 8. Struktura pręta o średnicy 16 mm po wyciskaniu w temperaturze 338°C. Warunki przesycańia 418°C/10 godzin: a) i b) – próbka nr 20 pobrana z odcinka początkowego pręta

*Fig. 8. The structure of a rod with the diameter of 16 mm after extrusion at 338°C. Conditions of supersaturation 418°C/10 hours: a) and b) sample no. 20 taken from the initial section of the rod*

Z kolei dalsze zwiększanie temperatury procesu wyciskania do 338°C spowodowało w odcinku początkowym pręta przede wszystkim wyraźne zmniejszenie gęstości wydzielen fazy  $\gamma$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> w pasmach lub skupiskach oraz ich bardziej równomierne rozłożenie zarówno w strefie przypowierzchniowej, jak i środkowej pręta.

#### 4. WNIOSKI

- 1) Proces współbieżnego wyciskania pręta ze stopu AZ91 przy współczynniku  $\lambda$  wynoszącym 5,78 w temperaturze 280°C i 295°C osiągnął stabilizację dopiero na odcinku końcowym pręta, kiedy proces dynamicznej rekrytalizacji wystąpił niemal całkowicie na przekroju pręta i wielkość zrekrystalizowanych ziaren na przekroju pręta była zbliżona.
- 2) Nieciągłości materiału o wielkości makroskopowej pojawiły się w przecie wyciskanym w temperaturze 300°C przy współczynniku  $\lambda$  wynoszącym 4,14 najprawdopodobniej wskutek naprężeń wywołanych różnicową prędkością odkształcenia między warstwami powierzchniową i środkową wyciskanego pręta.
- 3) Zwiększanie temperatury wyciskania z 316°C do 338°C przy współczynniku  $\lambda$  wynoszącym 5,78 powodowało, w odcinku początkowym pręta (rys. 8), zmniejszenie gęstości wydzielen fazy  $\gamma$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> w pasmach lub skupiskach i ich bardziej równomierne rozłożenie na przekroju pręta.

*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.*

*Further increasing of the extrusion process temperature, up to 338 °C has resulted in, first of all, clear reduction of the density of phase  $\gamma$  - Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> secretions in bands or aggregations and more uniform distribution of them, both in the zone near the surface and inside the rod.*

#### 4. CONCLUSIONS

- 1) *The process of forward extrusion of a rod of AZ91 alloy, with the coefficient of elongation,  $\lambda$  equal to 5.78, at the temperatures of 280°C and 295°C, has reached stabilisation as late as the final section of the rod when the process of dynamic recrystallization has taken place almost completely on the rod cross section and the recrystallized grains in the rod cross section were close in size.*
- 2) *Macroscopic size material discontinuities have appeared in a rod extruded at 300°C with the  $\lambda$  coefficient equal to 4.14, most probably due to the stresses resulting from the different speed of deformation between the surface and the inside layers of the rod being extruded.*
- 3) *Increasing of the extrusion temperature from 316°C to 338°C with the  $\lambda$  coefficient equal to 5.78, has resulted in a reduction of the density of phase  $\gamma$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> secretions in bands and aggregations and more uniform distribution of them on the rod cross section.*

*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] Wei Y. H., Wang Q. D., Zhu Y. P., Zhou H. T., Ding W. J., Ding, Chino Y., Mabuchi M.: Superplasticity and grain boundary sliding in rolled AZ91 magnesium alloy at high rates. *Materials Science & Engineering* 2003 s. 107-115.

- 
- [2] Ding H., Liu L., Kamado S., Ding W., Kojima Y.: Study of the microstructure, texture and tensile properties of as-extruded AZ91 magnesium alloy. *Journal of Alloys and Compounds* 2008 s. 400-406.
  - [3] Reguła T., Bronicki M., Lech-Grega M., Czekaj E.: Ocena możliwości kształtowania właściwości mechanicznych odlewniczego stopu magnezu AZ91 przez zastosowanie odpowiedniej obróbki cieplnej. *Prace Instytutu Odlewnictwa* 2008 nr 1 s. 39-45.
  - [4] Influence of  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetallic compounds on the hot extruded microstructures and mechanical properties of Mg-9Al-1Zn alloy. *Materials Science & Engineering* 2007 s. 134-139.
  - [5] Li J., Xie J., Jin J., Wang Z.: Microstructural evolution of AZ91 magnesium alloy during extrusion and heat treatment. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 2012 Vol. 22 s. 1028-1034.
  - [6] Okamoto J.: *Phase Equilibria* 1998 nr 19 s. 598.
  - [7] Okamoto J.: *Phase Equilibria* 1994 nr 15 s. 129.
  - [8] Stevenson A.: Heat treating of magnesium alloys. *ASM Handbook, Vol. 4 Heat Treating*, ASM International, 1991.