



## Wpływ temperatury i prędkości odkształcania na naprężenie uplastyczniające blach ze stopu magnezu AZ31

### *Effect of temperature and strain rate on flow stress of AZ31 magnesium alloy sheets*

(1) Zbigniew Gronostajski, (2) Jakub Krawczyk\*, (3) Paweł Kaczyński, (4) Paweł Kaźmierczak

Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Obróbki Plastycznej i Metrologii, ul. Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław, Poland

#### Informacje o artykule

Zgłoszenie: 22.08.2016

Recenzja: 30.08.2016

Akceptacja: 31.03.2017

#### Wkład autorów

- (1) Autor koncepcji i główny twórca założeń
- (2) Tworzenie artykułu, opracowanie wyników badań
- (3) Opracowanie wyników badań, nadzór nad ich wykonywaniem
- (4) Przeprowadzenie prób jednoosiowego rozciągania

#### Streszczenie

Praca dotyczy badań właściwości mechanicznych jednego ze stopów magnezu, który ze względu na jego mały ciężar właściwy jest coraz częściej wykorzystywany w przemyśle motoryzacyjnym, w celu obniżenia masy elementów konstrukcyjnych pojazdów. Omawiany w pracy materiał to stop magnezu z aluminium, cynkiem i manganem o nazwie handlowej AZ31B. Chociaż stop ten jest bardzo atrakcyjny ze względu na jego małą gęstość (możliwość wykorzystania w konstrukcjach lekkich), to kształtowanie z niego elementów nadwozi samochodowych jest znacznie utrudnione przez jego niską odkształcalność w temperaturze otoczenia. W celu wytwarzania bardziej skomplikowanych wyrobów ze stopu magnezu AZ31B wymagane jest jego podgrzanie. Chcąc zastąpić dany element stalowy elementem z tego stopu, należy również pamiętać, że stop AZ31B charakteryzuje się niższym modułem sprężystości podłużnej niż stal (mniejsza sztywność). Praca przedstawia wyniki badań wpływu temperatury oraz prędkości odkształcania na przebieg naprężeń uplastyczniających dla blach z tego stopu. W pracy opisano stanowisko badawcze i metodologię przeprowadzania prób jednoosiowego rozciągania. Badania przeprowadzono przy 2 prędkościach odkształcania, w 5 temperaturach 21, 100, 200, 300 oraz 350°C. Wyznaczono parametry wytrzymałościowe takie, jak: umowna granica plastyczności, moduł Younga, naprężenie maksymalne i wydłużenie w momencie zerwania. Wykazano, że wraz ze wzrostem temperatury poziom naprężeń uplastyczniających maleje, a wydłużenie całkowite przed zerwaniem wyraźnie rośnie; poprawiają się tym samym właściwości plastyczne badanego stopu magnezu.

**Słowa kluczowe:** materiały lekkie, stopy magnezu, próby jednoosiowego rozciągania, właściwości mechaniczne

#### Article info

Received: 22.08.2016

Reviewed: 30.08.2016

Accepted: 31.03.2017

#### Authors' contribution

- (1) Author of concept and the main author of assumptions
- (2) Article preparation and description of test results
- (3) Description of test results, tests' supervision
- (4) Uniaxial tensile testing

#### Abstract

*This paper concerns testing of the mechanical properties of a certain magnesium alloy, which, due to its specific gravity, is being used with increasing frequency in the motorization industry to reduce the weight of vehicles' structural elements. The material discussed in this paper is a magnesium alloy with aluminum, zinc and manganese, sold under trade name AZ31B. Although this alloy is very attractive considering its low density (possibility of using it in light constructions), forming body elements out of it poses significant difficulties due to its low deformability at ambient temperature. In order to manufacture more complicated products from AZ31B magnesium alloy, it must be heated. When replacing a given steel element with an element made of this alloy, one must also remember that AZ31B alloy is characterized by a lower Young's modulus than steel (lower rigidity). This paper presents the results of tests of the effect of temperature and strain rate on the progression of flow stresses in sheets made from this alloy. The test stand and methodology of conducting uniaxial tensile tests are described. Tests were*

\* Autor do korespondencji. Tel.: +48 71 320 21 71; e-mail: jakub.krawczyk@pwr.edu.pl

\* Corresponding author. Tel.: +48 71 320 21 71; e-mail: jakub.krawczyk@pwr.edu.pl

*conducted at 2 strain rates, at 5 temperatures: 21, 100, 200, 300 and 350°C. The following strength parameters were determined: offset yield strength, Young's modulus, maximum stress and elongation upon breaking. It was demonstrated that the level of flow stresses decreases as temperature increases, and total elongation prior to breaking clearly increases, thus improving the plastic properties of the studied magnesium alloy.*

**Keywords:** *light materials, magnesium alloys, uniaxial tensile testing, mechanical properties*

## 1. WPROWADZENIE

Magnez i jego stopy cieszą się coraz większym zainteresowaniem przemysłu metalowego. Materiały te łączą gęstość z właściwościami mechanicznymi i fizycznymi w sposób, który czyni je doskonale przydatnymi do zastosowań w lekkich konstrukcjach. Mają zatem wysoki potencjał innowacyjny [1].

Zainteresowanie stopami magnezu na elementy konstrukcyjne dla przemysłu lotniczego sięga lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku. Spowodowane było to poszukiwaniem materiału, który zmniejszy ciężar samolotu i może zastąpić stosowane stopy aluminium. Dzięki zastosowaniu magnezu, którego gęstość wynosi  $1,74 \text{ g/cm}^3$ , otrzymuje się zmniejszenie masy wyrobu o 30%. Ograniczone dotychczas zastosowanie stopów magnezu wynika przede wszystkim z ich podatności na korozję (główna wada), łatwopalności, małej wytrzymałości, wysokiego kosztu ich przetwarzania drogą obróbki plastycznej (konieczność podgrzania przed formowaniem) oraz złej obrabialności mechanicznej [2, 3].

Choć stopy magnezu posiadają wiele wad, to stosowanie ich w różnego rodzaju konstrukcjach może znacznie obniżyć ich masę, co w niektórych przypadkach jest bardzo pożądane. Obecnie niewiele jest publikacji opisujących w sposób wyczerpujący właściwości mechaniczne oraz technologiczne blach ze stopu magnezu [1–6], co stanowiło motywację dla autorów obecnej pracy do podjęcia tego tematu.

## 2. OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO

W pracy krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie wyznaczono w próbie jednoosiowego rozciągania. Znajomość takich przebiegów dla badanych materiałów ma duże znaczenie praktyczne, zwłaszcza przy projektowa-

## 1. INTRODUCTION

*Magnesium and its alloys are enjoying increasing interest from the metalworking industry. These materials combine density with mechanical and physical properties in such a way that makes them ideally suited for applications in light constructions. Therefore, they present a high potential for innovation [1].*

*The interest in magnesium alloys as structural elements in the aviation industry reaches back to the 1950s. This interest was spurred by the search for a material that would reduce the weight of an airplane and be capable of replacing aluminum alloys applied previously. Thanks to the application of magnesium, with a density of  $1.74 \text{ g/cm}^3$ , a product's weight is reduced by 30%. The limited application of magnesium alloys, until now, are mostly due to their susceptibility to corrosion (main flaw), flammability, low strength, high costs of processing by way of plastic working (must be heated before forming), and poor mechanical workability [2, 3].*

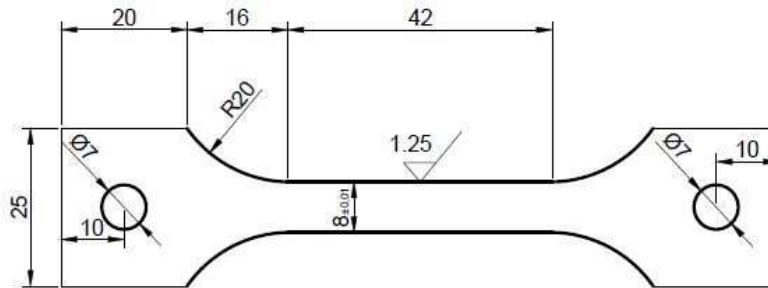
*Although magnesium alloys have many flaws, their application in various types of constructions may result in significant weight reduction, which is very desirable in certain cases. Currently, there are not many publications that exhaustively describe the mechanical and technological properties of magnesium alloy sheets [1–6], which motivated the authors of this paper to undertake this subject.*

## 2. DESCRIPTION OF TEST STAND

*Flow stress – strain curves were determined by a uniaxial tensile test. Familiarity with such progressions may have large practical significance when dealing with the studied materials, particularly when designing plastic working pro-*

niu procesów obróbki plastycznej przy użyciu metod numerycznych.

Do badań przygotowane zostały próbki płaskie o długości części równoległej wynoszącej 42 mm (rys. 1). Próbki wycinano elektroerozyjnie bezpośrednio z arkuszy blach. W celu uzyskania mniejszej chropowatości części pomiarowej zastosowano podwójne wyskrzanie.



Rys. 1. Kształt i wymiary próbek użytych w badaniach

Fig. 1. Shape and dimensions of specimens used in tests

Próbki wycinane były:

1. wzdłuż kierunku walcowania blach (KW 0°),
2. w poprzek kierunku walcowania blach (KW 90°),
3. pod kątem 45° do kierunku walcowania blach (KW 45°).

Pomiar grubości oraz szerokości każdej próbki wykonywany był w trzech różnych miejscach za pomocą mikrometru. Do dalszych obliczeń przyjmowano wartość średnią uzyskanych pomiarów.

### 3. PRZEBIEG EKSPERYMENTU

Próby rozciągania przeprowadzono na dwukolumnowej, uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell – typ 147800/01, wyposażonej w głowicę tensometryczną do pomiaru siły o zakresie pomiarowym 0–100 kN. Do rejestracji odkształcenia zastosowano ekstensometr firmy ZWICK o długości bazy pomiarowej 25 mm. Jest on przeznaczony do rejestracji odkształcenia próbek w temperaturach do 1200°C. Opisane stanowisko badawcze zostało przedstawione poniżej (rys. 2).

cesses with the application of numerical methods.

Flat specimens with a length of the parallel part equal to 42 mm were prepared for tests (Fig. 1). Specimens were cut out by electric discharge machining directly from sheets. To obtain lower roughness of the measured part, double sparking out was applied.

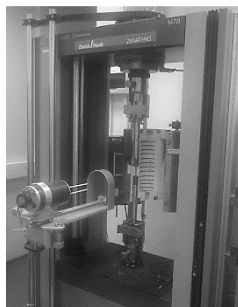
Specimens were cut out:

1. along the sheet rolling direction (RD 0°),
2. perpendicularly to the sheet rolling direction (RD 90°),
3. at a 45° angle to the sheet rolling direction (RD 45°).

The thickness and width of each specimen were measured at three different points by means of a micrometer. The average value from measurements was accepted for further calculations.

### 3. PROGRESSION OF THE EXPERIMENT

Tensile tests were conducted on a dual-column, universal Zwick/Roell strength tester – type 147800/01, equipped with a tensometric head for force measurement, with a measuring range of 0–100 kN. An extensometer from the ZWICK company, with a measuring base length of 25 mm was used to record strain (deformation). It is intended for recording specimen deformation at temperatures up to 1200°C. The described test stand is presented below (Fig. 2).



Rys. 2. Stanowisko do prób rozciągania

Fig. 2. Tensile test stand

Po uzyskaniu zadanej temperatury próbka była wygrzewana przez 20 min przy utrzymaniu nastawionej temperatury w zakresie  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ , próbka obciążana była wstępnym naprężeniem wynoszącym 5 MPa. Po nałożeniu ekstensometru rozciągano próbkę z zadaną prędkością. Badania wykonano przy różnej prędkości przesuwu belki wynoszącej 4,2 oraz 0,042 mm/s, co odpowiadało prędkościom początkowym odkształcania wynoszącym odpowiednio  $10^{-3}$  oraz  $10^{-1}$  1/s. Kilka wybranych próbek rozciągnięto z prędkością  $10^{-4}$  1/s (0,0042 mm/s). W przypadku dużych prędkości maszyna wytrzymałościowa była zatrzymywana celem ściągnięcia czujników ekstensometru. W przypadku prędkości mniejszych niż 0,1 1/s nie było to konieczne. Rejestracja danych odbywała się z częstotliwością dostosowaną do czasu trwania pomiaru, podczas którego rejestrowano siłę i przemieszczenie w funkcji czasu na PC. Z uwagi na to, że zakres pomiarowy ekstensometru wynosił 10 mm, docelowe wykresy były tworzone ręcznie przez złożenie sygnału z ekstensometru (do 3,6% wydłużenia bazy pomiarowej ekstensometru) i sygnału z trawersy (powyżej 3,6% wydłużenia bazy pomiarowej ekstensometru).

Wyniki zrywania części próbek zostały po wstępnej kontroli odrzucone. Było to spowodowane występowaniem zaburzeń podczas badania materiału, jak np. zbyt długie wygrzewanie próbki lub gdy temperatura próbki odbiegała od zadanej o więcej niż  $5^{\circ}\text{C}$ . Pozostałe wyniki poddane zostały dalszej obróbce; wielkości przeliczano na naprężenia i odkształcenia względne. Otrzymane przebiegi przekształcano do postaci naprężenia rzeczywistego i odkształcenia logarytmicznego za pomocą wzorów (1) oraz (2).

*After reaching the set temperature, a specimen was held within  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  of this temperature for 20 min and was loaded with preliminary stress equal to 5 MPa. After the extensometer was applied, the specimen was subjected to tension at the set speed. Tests were performed at different crossbar advance speeds, equal to 4.2 and 0.042 mm/s, which corresponded to the initial strain rates, equal to  $10^{-3}$  and  $10^{-1}$  1/s respectively. Several of the selected specimens were subjected to tension at a speed of  $10^{-4}$  1/s (0.0042 mm/s). In the case of high speeds, the strength tester was stopped so that the extensometer's sensors could be removed. This was not necessary for speeds of less than 0.1 1/s. Data recording took place at a frequency adjusted to the duration of measurement, during which force and displacement were recorded as a function of time on the PC. Due to the fact that the extensometer's measuring range was 10 mm, the target charts were created manually by superposing the signal from the extensometer (up to 3.6% elongation of its measuring base) and the signal from the crossbar (above 3.6% elongation of the extensometer's measuring base).*

*Breaking results for some specimens were rejected after preliminary checks. This was due to the occurrence of disruptions during testing of the material, such as excessive holding of the specimen at the set temperature or deviation of the specimen's temperature from the set temperature by more than  $5^{\circ}\text{C}$ . Other results were accepted for further processing; quantities were converted to stresses and relative strains. The obtained progressions were converted to the form of actual stress and logarithmic strain by means of formulas (1) and (2).*

$$\sigma_{rzecz} = \sigma \cdot (1 + \varepsilon) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\log} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2)$$

Większość z badanych materiałów, niezależnie od temperatury i prędkości odkształcania, wykazywała brak wyraźnej granicy plastyczności. Wyznaczano więc umowną granicę plastyczności. Dla każdej próbki wyznaczano nachylenie krzywej w zakresie od 10 MPa do około 60–70% górnej granicy przedziału, w którym krzywa była liniowa (ocena wizualna). Wartość 60–70% wybrano, aby zminimalizować zjawisko zaniżania wartości modułu Younga, w przypadku wybrania zbyt szerokiego zakresu (zawiera on obszar, w którym naprężenia zaczynają przyrastać wolniej). Następnie wyznaczano przecięcie krzywej równoległej przechodzącej przez punkt  $\varepsilon=0,002$  i krzywej odkształcania próbki. Tak wyznaczoną wartość przyjmowano za umowną granicę plastyczności. Ten sam algorytm posłużył do ustalenia wartości modułu sprężystości podłużnej dla każdej z próbek. Wartości maksymalnego naprężenia umownego oraz wydłużenia, w momencie zerwania, były odczytywane bezpośrednio z wykresu. Następnie obliczano wartość średnią właściwości wszystkich analizowanych próbek.

#### 4. BADANY MATERIAŁ

Stop AZ31B cechuje się podwyższoną wytrzymałością uzyskiwaną dzięki hartowaniu z częściowym wyżarzaniem. Jest to materiał o zwiększonej odkształcalności, odporny na korozję, dobrze spawalny. Można go kształtować poprzez obróbkę ubytkową. Jest niemagnetyczny o dobrym przewodnictwie cieplnym i elektrycznym, co pozwala na jego zastosowanie do produkcji opłotów i osłon magnetycznych stosowanych w elektronice. Kształtowanie na gorąco stopu AZ31B pozwala na jego wykorzystanie w przemyśle samochodowym do wytwarzania wyrobów o skomplikowanych kształtach. Spełnia on ponadto wymagania opisane w normie ASTM B90. Jego skład chemiczny i właściwości fizyczne przedstawiono poniżej (tab. 1, 2).

$$\sigma_{rzecz} = \sigma \cdot (1 + \varepsilon) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\log} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2)$$

*Most of the tested materials exhibited a lack of a clear yield point, regardless of temperature and strain rate. Therefore, an offset yield point was determined. The slope of the stress-strain curve was determined for every specimen within the range from 10 MPa to approx. 60–70% of the upper limit of the interval within which the curve was linear (visual assessment). The value of 60–70% was selected to minimize underestimation of Young's modulus if a range that was too broad was selected (containing an area in which stresses begin to increase more slowly). Next, the intersection of the parallel curve passing through point  $\varepsilon=0.002$  and the specimen's strain curve was determined. The value determined in this way was accepted to be the offset yield point. This same algorithm was used to determine the value of Young's modulus for each specimen. Maximum offset stress and elongation values, upon breaking of the specimen, were read directly from the chart. Next, the average values of analyzed specimens properties were calculated.*

#### 4. STUDIED MATERIAL

*AZ31B alloy is characterized by elevated strength achieved thanks to quenching with partial annealing. This material has increased deformability, is corrosion-resistant and has good weldability. It can be formed by removal machining. It is non-magnetic, with good thermal and electrical conductivity, which enables its applications in manufacturing braided screens and magnetic screens used in electronics. Hot forming of AZ31B alloy allows for its application in the motorization industry, for manufacturing products with complicated shapes. Moreover, it meets the requirements described in standard ASTM B90. Its chemical composition and physical properties are presented below (Tab. 1, 2).*

Tab. 1. Skład chemiczny stopu AZ31B  
 Tab. 1. Chemical composition of AZ31B alloy

Al [%]	Zn [%]	Mn [%]	Mg [%]
2,5–3,5	0,7–1,3	0,2–1,0	reszta / remainder

Tab. 2. Właściwości fizyczne stopu AZ31B  
 Tab. 2. Physical properties of AZ31B alloy

Właściwość / Property	Wartość / Value	Jednostka / Unit
Ciężar właściwy / Specific gravity	1,78	[-]
Współczynnik rozszerzalności cieplnej / Thermal expansion coefficient	26,8·10 <sup>-6</sup>	[K <sup>-1</sup> ]
Ciepło właściwe / Specific heat	1040	[Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
Przewodność cieplna / Thermal conductivity	76,9	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
Oporność / Resistance	92	[nΩm]
Moduł Younga / Young's Modulus	45·109	[Pa]
Ułamek Poissona / Poisson's ratio	0,35	[-]
Temperatura topnienia / Melting point	566–632	[°C]

Właściwości materiałowe deklarowane przez producenta przedstawiono w tab. 3.

Material properties declared by the manufacturer are presented in Tab. 3.

Tab. 3. Właściwości mechaniczne stopu AZ31B  
 Tab. 3. Mechanical properties of AZ31B alloy

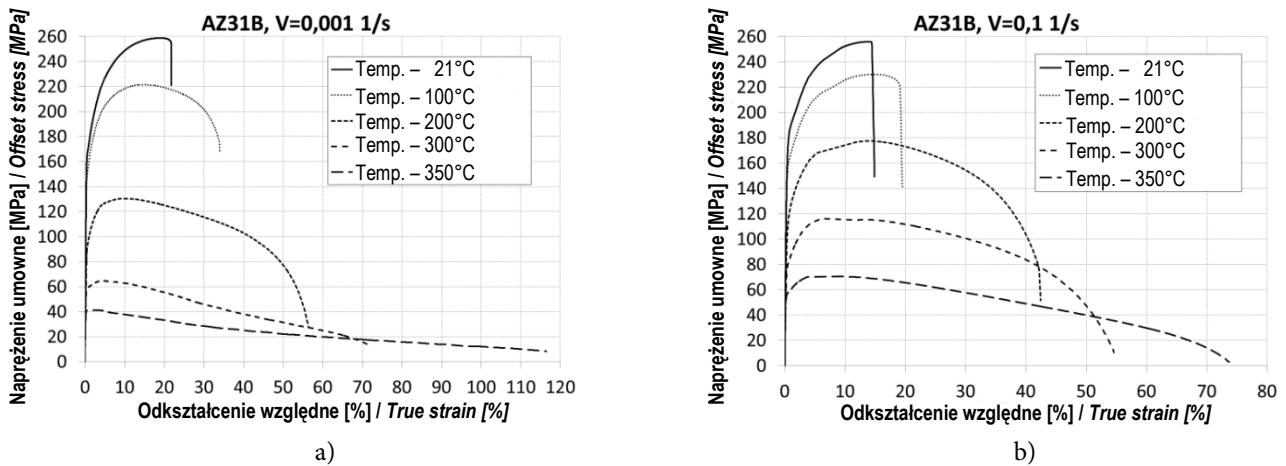
Właściwość / Property	Wartość / Value	Jednostka / Unit
Re0,2	220	[MPa]
Wytrzymałość na rozciąganie / Tensile strength	290	[MPa]
Wytrzymałość na ścinanie / Shear strength	200	[MPa]
Wydłużenie / Elongation	13	[%]

## 5. WYNIKI BADAŃ

Wybrane krzywe rozciągania badanych próbek, wyciętych zgodnie z kierunkiem walcowania blachy, przedstawione zostały na rys. 3. Widać na nim, że niezależnie od prędkości odkształcania, ze wzrostem temperatury badania maleją poziomy naprężeń uplastyczniających oraz wzrasta wydłużenie całkowite przed zerwaniem. Można również zauważyć, że blacha nie wykazuje wyraźnej granicy plastyczności.

## 5. TEST RESULTS

Selected tensile stress-strain curves of the tested specimens, cut out according to the sheet rolling direction, are presented in Fig. 3. It shows that, regardless of strain rate, flow stress levels decrease and total elongation before breaking increases as the test temperature increases. One can also observe that the sheet does not exhibit a clear yield point.



Rys. 3. Krzywe rozciągania blachy ze stopu magnezu AZ31B wyznaczone w różnych temperaturach, przy różnych prędkościach odkształcania: a) 0,001 1/s, b) 0,1 1/s

Fig. 3. Tensile stress-strain curves of AZ31B alloy sheet, determined at different temperatures and different strain rates: a) 0.001 1/s, b) 0.1 1/s

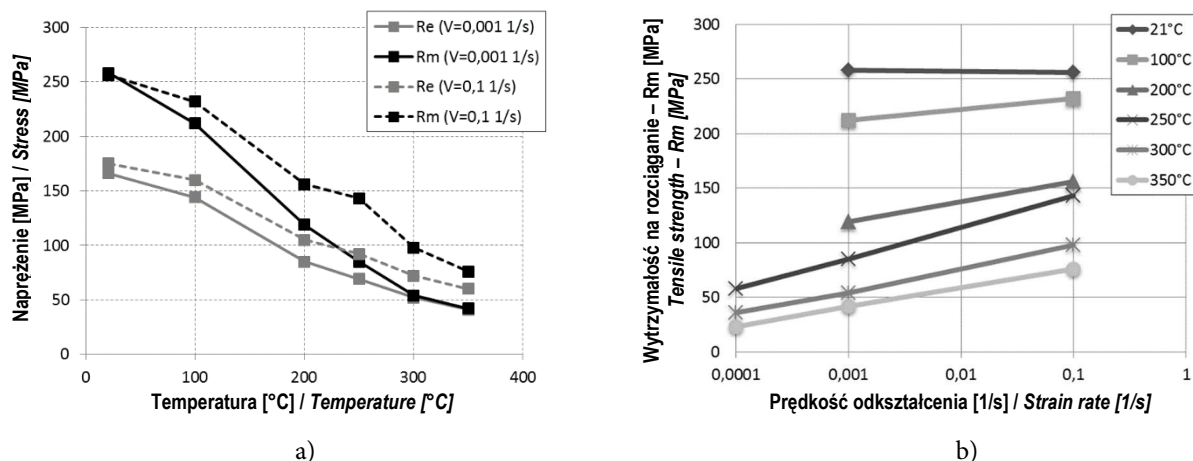
Podczas prób jednoosiowego rozciągania wyznaczono właściwości mechaniczne badanej blachy. Średnia umowna granica plastyczności, moduł Younga, naprężenie maksymalne i wydłużenie w momencie zerwania dla próbek wyciętych zgodnie z kierunkiem walcowania blachy przedstawione zostały w tab. 4.

The mechanical properties of the tested sheet were determined during uniaxial tensile tests. The average offset yield point, Young's modulus, maximum stress and elongation at the instant of breaking are presented in Tab. 4 for specimens cut out according to the sheet rolling direction.

Tab. 4. Właściwości mechaniczne stopu AZ31B – kierunek 0°

Tab. 4. Mechanical properties of AZ31B alloy – 0° direction

Temperatura [°C] / Temperature [°C]	v [1/s]	Re [MPa]	E [GPa]	Rm [MPa]	A [%]
21°C	0,0001	—	—	—	—
	0,001	166	44,4	258	22
	0,1	175	47,6	256	16
100°C	0,0001	—	—	—	—
	0,001	144	44,8	212	36
	0,1	160	44,9	232	21
200°C	0,0001	—	—	—	—
	0,001	85	25,2	119	54
	0,1	105	36,4	156	46
300°C	0,0001	36	14,5	36	—
	0,001	52	23,3	54	76
	0,1	72	28,5	98	56
350°C	0,0001	23	8,0	23	105
	0,001	41	19,1	42	108
	0,1	60	26,5	76	71



Rys. 4. Wykresy zależności: a) naprężenia od temperatury, b) wytrzymałości na rozciąganie od prędkości odkształcania  
 Fig. 4. Charts of dependencies: a) stress as a function of temperature, b) tensile strength as a function of strain rate

Badania wykazały, że wraz ze wzrostem temperatury zmniejsza się granica plastyczności oraz wytrzymałość na rozciąganie (rys. 3a). Wartości Rm oraz Re blachy ze stopu magnezu AZ31B podgrzanej do temperatury 350°C maleją 3–4-krotnie, w odniesieniu badań w temperaturze otoczenia. Materiał staje się bardziej plastyczny i zmniejszają się siły potrzebne do jego kształtowania, przez co nie ma konieczności stosowania bardzo wytrzymałych materiałów na narzędzia do tłoczenia.

Rys. 3b przedstawia czułość na prędkość odkształcania, w postaci zależności wytrzymałości na rozciąganie – Rm od prędkości odkształcania. Na wykresie tym można zauważyć, że ze wzrostem temperatury rośnie czułość na prędkość deformacji.

## 6. WNIOSKI

Analiza wykresów rozciągania próbek ze stopów magnezu pozwala wyciągnąć następujące wnioski:

- blacha ze stopu magnezu AZ31B nie wykazuje wyraźnej granicy plastyczności niezależnie od temperatury i zastosowanej prędkości odkształcania;
- ze wzrostem temperatury rośnie odkształcenie próbek w chwili zerwania; wydłużenie próbek odkształcanych w temperaturze pokojowej z prędkością 0,001 1/s wynosiło 0,13–0,25, a w temperaturze 350°C – w przedziale 0,6–1,2;

Tests showed that yield point and tensile strength decrease as temperature increases (Fig. 3a). Rm and Re values of AZ31B magnesium alloy sheet heated to 350°C decrease 3–4-fold compared to tests performed at ambient temperature. The material becomes more plastic and the forces required to form it decrease, thanks to which it is not necessary to apply very strong materials for press forming tools.

Fig. 3b presents the sensitivity to strain rate in the form of the dependency between tensile strength – Rm and strain rate. This chart shows that sensitivity to strain rate increases along with temperature.

## 6. CONCLUSIONS

The following conclusions can be drawn on the basis of analysis of specimens tensile stress-strain charts:

- AZ31B magnesium alloy sheet does not exhibit a clear yield point regardless of temperature and applied strain rate;
- specimens strain at the instant of breaking increases as temperature increases; the elongation of specimens deformed at room temperature at a rate of 0.001 1/s amounted to 0.13–0.25, and at a temperature of 350°C – within the range of 0.6–1.2;



- ze wzrostem temperatury maleje poziom naprężeń uplastyczniających (podczas odkształcania próbek z prędkością 0,001 1/s w temperaturze pokojowej naprężenia uplastyczniające wynosiły około 260 MPa, a w temperaturze 350°C – 45 MPa; zwiększenie temperatury do 350°C spowodowało około 6-krotne obniżenie właściwości wytrzymałościowych);
  - ze wzrostem temperatury rośnie czułość materiału na prędkość odkształcania, przy prędkości odkształcania 0,001 1/s zmiana temperatury z 21°C na 100°C (zmiana o 79°C) spowodowała redukcję naprężeń uplastyczniających z wartości 258 MPa do 212 MPa (zmiana o 18%); zmiana temperatury z 300°C na 350°C przy tej samej prędkości odkształcania (zmiana o 50°C) spowodowała redukcję naprężeń uplastyczniających z wartości 54 MPa do wartości 42 MPa (zmiana o 22 %);
  - analogiczną sytuację można zaobserwować, analizując odkształcalność próbek, przy tej prędkości odkształcania: zmiana temperatury z 21°C na 100°C (zmiana o 79°C) spowodowała wzrost odkształcenia w chwili zerwania o 14% (z wartości 22% do 36%); zmiana temperatury z 300°C na 350°C (zmiana o 50°C) spowodowała wzrost odkształcenia w chwili zerwania o 32% (z wartości 76% do wartości 108%).
- the level of flow stresses decreases as temperature increases (during deformation of specimens at a rate of 0.001 1/s at room temperature, flow stresses amounted to approx. 260 MPa, and at a temperature of 350°C – 45 MPa. Raising the temperature to 350°C caused an approx. 6-fold reduction of strength properties;
  - as temperature increases, the material's sensitivity to strain rate increases, and at a strain rate of 0.001 1/s, a temperature change from 21°C to 100°C (change of 79°C) caused flow stresses to decrease from 258 MPa to 212 MPa (18% change); a temperature change from 300°C to 350°C at the same strain rate (change of 50°C) caused flow stresses to decrease from 54 MPa to 42 MPa (22% change),
  - an analogous situation was observed during analysis of specimens deformability at this strain rate: a temperature change from 21°C to 100°C (change of 79°C) caused a 14% increase of strain at the instant of breaking (from 22% to 36%); a temperature change from 300°C to 350°C (change of 50°C) caused a 32% increase of strain at the instant of breaking (from 76% to 108%).

## PODZIĘKOWANIA

Badania sfinansowano z projektu NCBiR PBS1/A5/29/2013.

## LITERATURA

- [1] Kawalla R., M. Ullman. 2006. „Produkcja blach magnezowych – stan obecny i perspektywy”. *Obróbka Plastyczna Metali* 17 (4): 21–26.
- [2] Hadasik E., D. Kuc. 2013. „Obróbka plastyczna stopów magnezu”. *Obróbka Plastyczna Metali* 24 (2): 131–146.
- [3] Friedrich H.E., B.L. Mordike. 2006. *Magnesium Technology*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1–28.
- [4] Niechajowicz A. 2012. „Modyfikacja właściwości i struktury blach ze stopów magnezu poprzez zmianę drogi i temperatury odkształcania dla udoskonalenia

## ACKNOWLEDGEMENTS

Tests were financed under project NCBiR PBS1/A5/29/2013.

## REFERENCES

- [1] Kawalla R., M. Ullman. 2006. “Magnesium sheet production – state and perspectives”. *Obróbka Plastyczna Metali* 17 (4): 21–26.
- [2] Hadasik E., D. Kuc. 2013. “Plastic forming of magnesium alloys”. *Obróbka Plastyczna Metali* 24 (2): 131–146.
- [3] Friedrich H.E., B.L. Mordike. 2006. *Magnesium Technology*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1–28.
- [4] Niechajowicz A. 2012. “Modyfikacja właściwości i struktury blach ze stopów magnezu poprzez zmianę drogi i temperatury odkształcania dla udoskonalenia

procesów kształtowania. Raporty Inst. Technol. Masz. Autom. PWroc. nr 3.

- [5] Dziubińska A., A. Gontarz, K. Horzelska, P. Pieško. 2015. „The Microstructure and Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy Aircraft Brackets Produced by a New Forging Technology”. *Procedia Manufacturing 2*: 337–341.
- [6] Barati F. 2015. „A numerical approach for determination of flow curve and evaluation of frictional behavior of AZ61 magnesium alloy under elevated temperature forming conditions”. *Measurement 74*: 1–10.

procesów kształtowania. Raporty Inst. Technol. Masz. Autom. PWroc. nr 3.

- [5] Dziubińska A., A. Gontarz, K. Horzelska, P. Pieško. 2015. “The Microstructure and Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy Aircraft Brackets Produced by a New Forging Technology”. *Procedia Manufacturing 2*: 337–341.
- [6] Barati F. 2015. “A numerical approach for determination of flow curve and evaluation of frictional behavior of AZ61 magnesium alloy under elevated temperature forming conditions”. *Measurement 74*: 1–10.