

**OCENA MOŻLIWOŚCI KSZTAŁTOWANIA WŁAŚCIWOŚCI  
MECHANICZNYCH ODLEWNICZEGO STOPU MAGNEZU AZ91  
PRZEZ ZASTOSOWANIE ODPOWIEDNIEJ OBRÓBKI CIEPLNEJ**

**AN ASSESSMENT OF THE POSSIBILITIES TO SHAPE THE MECHANICAL  
PROPERTIES OF CAST AZ91 MAGNESIUM ALLOY  
THROUGH APPLICATION OF PROPER HEAT TREATMENT**

*Tomasz Reguła\*, Marian Bronicki\*\*, Marzena Lech-Grega\*\*\*, Edward Czekaj\**

*\* Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Polska*

*\*\* Akademia Górniczo-Hutnicza, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska*

*\*\*\* Instytut Metali Nieżelaznych, Oddział Metali Lekkich w Skawinie,  
ul. Piłsudskiego 19, 32-050 Skawina, Polska*

**Streszczenie**

*Celem publikacji jest ocena wpływu różnych sposobów klasycznej obróbki cieplnej na zmiany właściwości mechanicznych – w temperaturze pokojowej – stopu magnezowego typu AZ91, w odniesieniu do analogicznych charakterystyk dla stanu wyjściowego (lane-go). Materiał badawczy odlewano grawitacyjnie do form piaskowych oraz kokil. Odpowiednio przygotowane mechanicznie próbki poddano obróbce cieplnej, podczas której doprowadzone zostały ze stanu wyjściowego (F – ang. as-Fabricated) do stanów: T4, T5 oraz T6. Badanie właściwości mechanicznych obejmowało wyznaczenie  $R_m$ ,  $R_{p02}$  i  $A_5$  w statycznych próbach rozciągania oraz pomiary twardości (HB) metodą Brinella. Wyniki badań wskazują, iż właściwości mechaniczne odlewniczego stopu AZ91 można w istotny sposób kształtować, poprzez zastosowanie odpowiedniej obróbki cieplnej.*

*Słowa kluczowe: stop magnezu AZ91, odlewanie, obróbka cieplna, właściwości mechaniczne*

**Abstract**

*The aim of this publication is to assess the effect of different types of the standard heat treatment on changes in mechanical properties at room temperature of magnesium alloy from AZ91 family referred to the same properties in as-fabricated state. The investigated alloy was gravity cast into sand and metal moulds. The mechanically prepared specimens were subjected to a heat treatment during which they were transformed from the as-fabricated state to conditions: T4, T5 and T6. Testing of mechanical properties included determination of  $R_m$ ,  $R_{p02}$  and  $A_5$  during static tensile test and Brinell hardness measurements (HB). The results of the investigations indicate that the mechanical properties of cast AZ91 alloy can be successfully shaped through the application of proper heat treatment.*

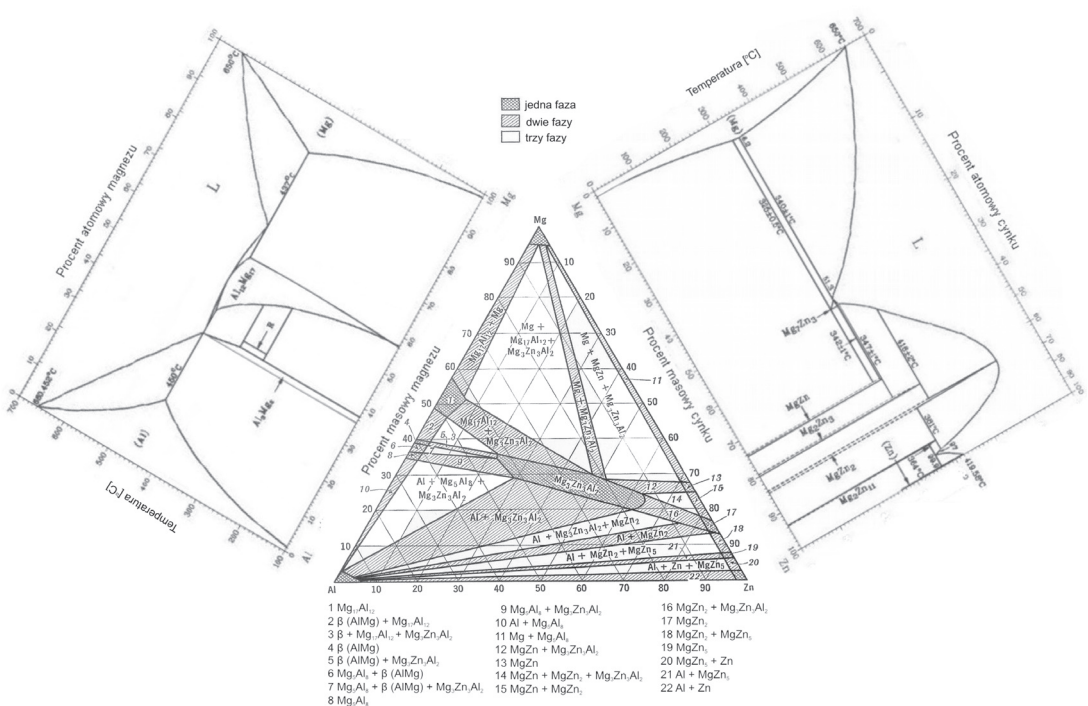
*Key words: AZ91 magnesium alloy, casting, heat treatment, mechanical properties*

## Wprowadzenie

W świetle nowych dyrektyw międzynarodowych, zmuszających projektantów z branży motoryzacyjnej do obniżania emisji gazów cieplarnianych (szczególnie CO<sub>2</sub>) w samochodach napędzanych silnikami spalinowymi, lekkie materiały konstrukcyjne – a wśród nich odlewnicze stopy magnezu – znajdują coraz większe zastosowanie [1].

Najpopularniejszym, obecnie stopem odlewniczym na osnowie magnezu jest AZ91 [2]. Głównymi składnikami stopowymi są w nim: aluminium, cynk i mangan. Aluminium polepsza wytrzymałość na rozciąganie i twardość oraz czyni stop łatwiejszym do odlewania. Cynk stosuje się, aby podnieść wytrzymałość stopu w temperaturze pokojowej, natomiast mangan zwiększa jego odporność na korozję [3]. Stop AZ91 ma dobre właściwości wytrzymałościowe i dobrą lejącość. Duża zawartość aluminium (ok. 9% mas.) skutkuje małą plastycznością w temperaturze pokojowej, co spowodowane jest występowaniem na granicach ziaren, kruchej fazy  $\gamma$  - Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> [1].

Z izotermicznego wykresu równowagi fazowej, w temperaturze 20°C, dla układu Mg-Al-Zn (rys. 1), wynika, że stop AZ91 znajduje się w obszarze dwufazowym ( $\alpha_{Mg}$  +  $\gamma$  - Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>), z kolei na przylegającym wykresie układu Mg-Al, widoczna jest linia solvus, określająca zmienną rozpuszczalność aluminium w magnezie, w funkcji temperatury. Skutkiem tego jest podatność stopu AZ91 na umocnienie wydzieleniowe. Efekt umocnieniowy obróbki cieplnej zależy od właściwości fazy wydzielonej, wielkości wydzielań oraz stopnia ich dyspersyjności [4].



Rys. 1. Zbiornicze zestawienie wykresów równowagi fazowej układów: Mg-Al-Zn oraz Mg-Zn i Al-Mg (opracowano na podstawie: [5, 6])

W stopie AZ91 w czasie starzenia, po wcześniejszym przesycaaniu, następuje wydzielenie fazy  $\gamma$  -  $Mg_{17}Al_{12}$  z przesyconego roztworu  $\alpha_{Mg}$ . Rozróżnia się dwa rodzaje wydzieleni fazy  $\gamma$ : igłowe i masywne płytkowe [7]. Są one produktami odpowiednio wydzielenia: ciągłego i nieciągłego. Wydzielenie ciągłe polega na zarodkowaniu i wzroście indywidualnych cząstek fazy  $\gamma$ , homogenicznie rozlokowanych w całej objętości przesyconej osnowy. Natomiast w wyniku wydzielenia nieciągłego tworzą się płytkowe skupiska fazy  $\gamma$  przy granicach ziaren [8].

## 2. Metodyka badań

Przedmiotem badań był odlewniczy stop na bazie magnezu: AZ91. Jego przetop odbył się w piecu oporowym typu PET60, z tygłem stalowo-aluminiowym, pod atmosferą ochronną, w skład, której wchodziła mieszanka: Ar + 0,2%  $SF_6$ . Metal przegrzewano do temperatury z zakresu: 710÷730°C i grawitacyjnie odlano do wcześniej przygotowanych i pokrytych specjalną warstwą ochronną, form piaskowych i żeliwnych kokil o temperaturze ok. 200°C, na próbki do badań wytrzymałościowych.

Badanie składu chemicznego przeprowadzano na optycznym spektrometrze emisyjnym GDS-850A LECO.

Obróbkę cieplną prowadzono w piecu typu FCF-7 firmy Czylok. Przed eksperymentem dokonano jego uszczelnienia i zbadano charakterystykę. Próbki z doświadczalnego stopu doprowadzono do stanów: T4, T5 oraz T6. Schemat temperaturowo-czasowy obróbki cieplnej przyjęto zgodnie z tabelą 1. Przesykanie odbywało się w atmosferze ochronnej z argonu. Chłodzenie prowadzono pod nadmuchem powietrza.

Tabela 1. Schemat temperaturowo-czasowy obróbki cieplnej stopu AZ91 [9]

Stan	Proces	Temperatura, [°C]	Czas, [h]
T4	przesykanie	416 <sup>1)</sup>	16
T5	starzenie	170	16
T6	przesykanie	416 <sup>1)</sup>	16
	starzenie	170	16

<sup>1)</sup> próbki ładowano do pieca nagrzanego do 260°C i przez 2 h podnoszono temperaturę do wartości docelowej (416°C)

Statyczne próby rozciągania wykonywano na maszynie wytrzymałościowej firmy INSTRON typu 1115. Prędkość rozciągania wynosiła 0,6 mm/min. Wymiary bazy pomiarowej zrywanych próbek o przekroju cylindrycznym były następujące: średnica – 10 mm; długość – 50 mm. Na każdy wariant badawczy przypadają po cztery próbki wytrzymałościowe. Badania twardości przeprowadzano metodą Brinella, wgłębnikiem o średnicy 2,5 mm, pod obciążeniem 625 N; w danym przypadku wykonywano sześć odcisków. Do badań mikrostrukturalnych posłużyły odpowiednio przygotowane próbki, które trawiono 3% roztworem kwasu azotowego w alkoholu etylowym (nital), a następnie poddawano je obserwacjom mikrostrukturalnym w jasnym polu, na mikroskopie optycznym NEOPHOT 32.

### 3. Wyniki badań i ich dyskusja

#### 3.1. Badanie składu chemicznego

Wyniki analizy składu chemicznego badanego stopu oraz norma dotycząca AZ91 podane są w tabeli 2.

Tabela 2. Procentowy skład chemiczny stopu AZ91 [9]

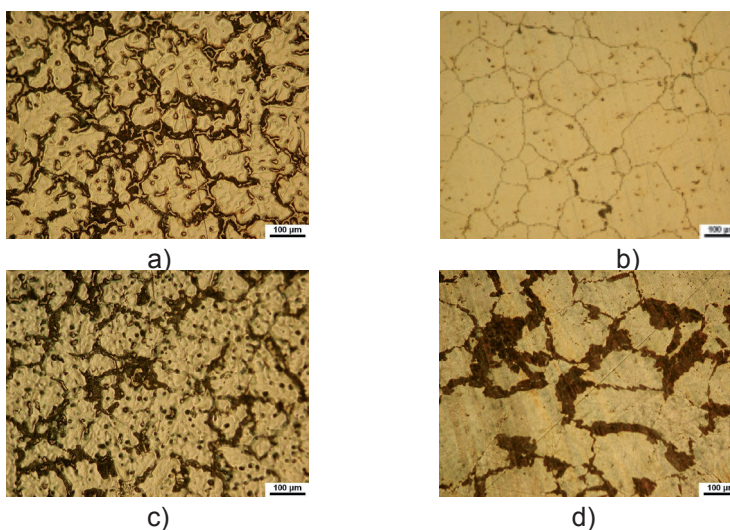
Stop	Skład	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Ti
AZ91	eksperymentalny	8,5	0,75	0,13	0,02	0,02	0,01	0,002	0,025
AZ91 <sup>1)</sup>	normatywny	8,5-9,5	0,45-0,9	0,15-0,4	0,08	0,004	0,025	0,001	-

<sup>1)</sup> zgodny z normą ASTM B93/B93M

Stężenie procentowe głównych pierwiastków stopowych jest zgodne z normą. Wiadac natomiast, że udział żelaza znacznie przekracza wartość normatywną. Wpływać to może niekorzystnie na odporność korozyjną oraz na bezwzględne poziomy właściwości mechanicznych badanego stopu [3].

#### 3.2. Badania mikrostruktur

Widoczne na rysunkach 2 a-d mikrostruktury pochodzą z próbek odlanych do kuli. Mikrostruktury próbek odlewanych do form piaskowych były podobne do ww., różniąc się jedynie rozmiarem ziarna.



Rys. 2. Mikrostruktura stopu AZ91: a) w stanie wyjściowym; b) stan T4, c) stan T5, d) stan T6

Na rysunku 2a pokazana została mikrostruktura wyjściowej próbki badanego stopu AZ91, pochodzącego z kokili (OK). Widoczna jest tam typowa struktura układu Mg-Al-Zn w stanie lanym: roztwór stały  $\alpha_{Mg}$  (kolor jasny) oraz ciemna, równowagowa faza  $\gamma$  -  $Mg_{17}Al_{12}$ , usytuowana na granicach oraz wewnątrz ziarn (globularne wydzielienia). Z kolei rysunek 2b przedstawia metastabilną strukturę stopu w stanie przesyconym (T4K). Porównanie tych mikrostruktur obrazuje zmiany, jakie zaszły w rozpatrywanym stopie podczas przesycaenia; widać wyraźny efekt rozpuszczenia fazy  $\gamma$  w roztworze stałym  $\alpha_{Mg}$ . Ponadto zauważyć można wystąpienie efektu rozrostu ziaren spowodowanego wysoką temperaturą oraz długim czasem procesu przesycaenia. Rysunek 2c przedstawia mikrostrukturę badanego stopu odlewane do kokili i starzonego, bez uprzedniego przesycaenia (T5K). W odniesieniu do stanu wyjściowego (rys. 2a) nie są widoczne większe zmiany strukturalne wywołane tym procesem, co oznacza, że stopień przesycaenia, roztworu stałego, przy odlewaniu jest ograniczony, co przekłada się na niewielkie zmiany we właściwościach mechanicznych, analizowanych w dalszej części.

Rysunek 2d pokazuje mikrostrukturę próbki w stanie T6 (T6K). W mikrostrukturze widoczna jest wydzielona w trakcie procesu starzenia ciemna faza  $\gamma$  -  $Mg_{17}Al_{12}$  oraz dalszy rozrost ziaren, w porównaniu z rys. 2b. Wydzielienia fazy  $\gamma$  mają inną postać niż w przypadku próbki wyjściowej (rys. 2a); są przede wszystkim masywniejsze. Ich morfologia oraz usytuowanie na granicach ziaren wskazuje, że powstały na drodze wydzielenia nieciągłego. W tym powiększeniu wydzielienia nie są widoczne wewnątrz ziaren.

### 3.3. Badania właściwości mechanicznych

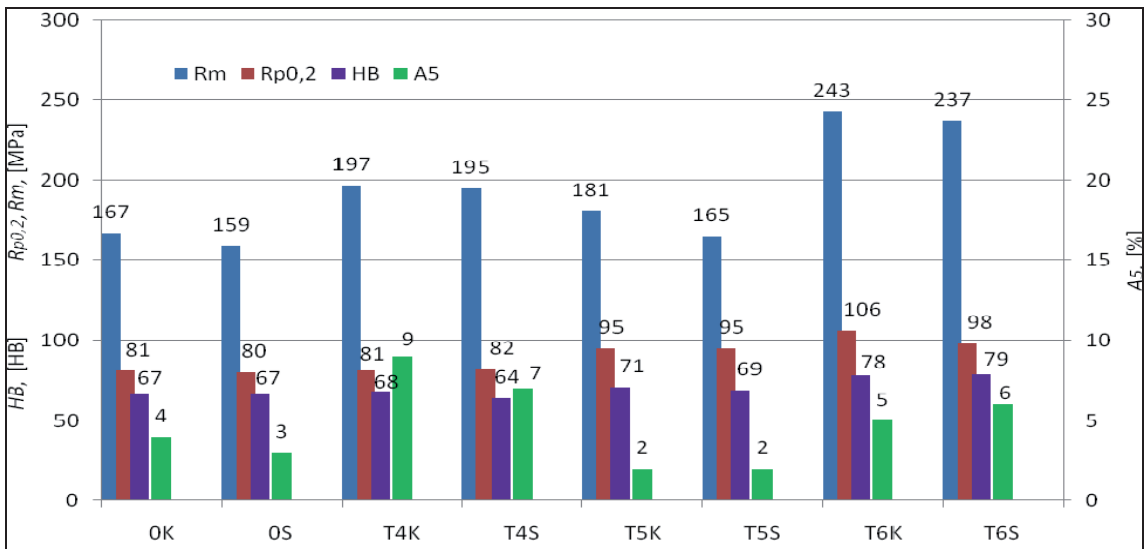
Zestawienie wyników badań właściwości mechanicznych znajduje się w tabeli 3, natomiast ich graficzna prezentacja na rys. 3.

Tabela 3. Średnie wartości właściwości mechanicznych [9]

Oznaczenie próbek	Stan stopu	$R_m$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$A_5$ [%]	HB [HB]
OK	0 (F)	167	81	4	67
OS	0 (F)	159	80	3	67
T4K	T4	197	81	9	68
T4S	T4	195	82	7	65
T5K	T5	180	95	2	71
T5S	T5	165	95	2	69
T6K	T6	241	106	5	78
T6S	T6	236	98	6	79

Uwagi do oznaczenia próbek: 0 (F) – próbka w stanie wyjściowym (lanym); K – próbka odlana w formie metalowej (kokili); S – próbka odlana w formie piaskowej; T4 – po przesycaeniu; T5 – po starzeniu bez uprzedniego przesycaenia; T6 – po umacnieniu wydzieleniowym





Rys. 3. Wykres zmian właściwości mechanicznych w zależności od sposobu odlewania oraz obróbki cieplnej [9]

Generalnie próbki odlane do kokil posiadają nieco wyższe właściwości mechaniczne niż próbki pochodzące z form piaskowych. Spowodowane to jest większym rozmiarem ziarna i nieuniknioną (nawet przy stosowaniu odpowiednich pokryć) kontaminacją metalu przy odlewaniu do form piaskowych. Przesycanie do stanu T4 znacznie zwiększało plastyczność stopu AZ91 (w odniesieniu do stanu wyjściowego), poprzez rozpuszczenie wydzieleni fazy  $\gamma$  w roztworze stałym  $\alpha_{Mg}$ . Zwiększeniu uległa również średnia wartość granicy wytrzymałości na rozciąganie, co spowodowane było umocnieniem roztworowym stopu pierwiastkami rozpuszczonymi z faz międzymetalicznych (głównie Al). Przy tym praktycznie bez zmian pozostała granica plastyczności oraz twardość. W stanie T5 stop charakteryzował się stosunkowo dużym wzrostem średniej wartości umownej granicy plastyczności ( $R_{p0,2}$ ), przy spadku jego plastyczności ( $A_5$ ). Zauważalny był również niewielki przyrost jego  $R_m$  i twardości. Jak zostało to już stwierdzone przy analizie mikrostruktur, badany stop wykazuje niewielką zdolność do przesycania roztworu stałego  $\alpha_{Mg}$ , podczas odlewania. Najwyższymi właściwościami wytrzymałościowymi odznaczały się próbki umocnione wydzieleniowo. Granica wytrzymałości na rozciąganie badanego stopu po obróbce cieplnej do stanu T6 wzrosła o ponad 70 MPa,  $R_{p0,2}$  o około 20 MPa, odnotowano również znaczący przyrost plastyczności (w porównaniu do próbek wyjściowych) oraz twardości.

#### 4. Wnioski końcowe

Wyniki badań przeprowadzonych na odlewniczym stopie AZ91 wskazują, że stop ten można skutecznie poddawać obróbce cieplnej, zmieniając jego właściwości mechaniczne w szerokim zakresie.

Najwyższymi właściwościami wytrzymałościowymi, a przy tym dobrą plastycznością, charakteryzuje się stop w stanie T6.

W stanie przesyconym badany stop odznaczał się wysoką wartością wydłużenia względnego (porównując z innymi popularnie używanymi stopami odlewniczymi na bazie magnezu). Otwiera to możliwość użycia, niestosowanych dotąd w stosunku do stopu AZ91, procesów umocnienia na drodze przeróbki plastycznej np. wyciskania na gorąco.

## Literatura

1. Kainer K. U.: Magnesium Alloys and Technology. Wiley-VCH, Darmstadt, 2003
2. Górny Z., Sobczak J.: Nowoczesne tworzywa odlewnicze na bazie metali nieżelaznych. Wydawnictwo Specjalne Instytutu Odlewnictwa w Krakowie, Kraków, 1997
3. Avedesian M., Baker H.: Magnesium and magnesium Alloys. ASM International, Materials Park, OH, 1999
4. Stephenson A.: Heat treating of magnesium alloys. AMS Handbook Volume 4 Heat Treating, ASM International, Materials Park, OH, 1991, s. 2010-2032
5. Backer H.: Alloys phase diagrams. ASM International, Materials Park, OH, 1992
6. Mondolfo L. F.: Metallography of aluminium alloys. John Wiley and Sons, New York, 1943
7. Adamiec J., Kiełbus A., Paśko J., Cwajna J.: Procedure of quantitative description of Mg-Al alloy structure after heat treatment. Magnesium. Red. K. U. Kainer. Wiley-VCH, Weinheim, 2007, s. 506-511
8. Hutchinson C. R., Nie J. F., Gorsse S.: Modeling the precipitation processes and strengthening mechanisms in a Mg-Al-(Zn) AZ91 alloy. Metallurgical and Materials Transactions, 2005, nr 36A.
9. Reguła T.: Badanie wpływu obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne odlewniczego stopu AZ91, AGH im. Stanisława Staszica, Kraków, 2007

Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Białobrzeski