

Bartłomiej PŁONKA  
Piotr KORCZAK  
Krzysztof REMSAK  
Marek RAJDA

## NOWOCZESNE, ZAAWANSOWANE TECHNOLOGIE WYTWARZANIA WYROBÓW ZE STOPÓW MAGNEZU METODAMI PRZERÓBKII PLASTYCZNEJ

**Streszczenie.** W artykule opisano badania i uzyskane wyniki procesu współbieżnego i przeciwbieżnego wyciskania prętów, kształtowników, rur itp., które były prowadzone dla stopów magnezu MgAlZn. Jest to grupa stopów podlegająca obróbce cieplnej, dla której można osiągnąć jedne z najwyższych wartości wytrzymałości. Materiały te zostały wytworzone w IMN OML Skawina w postaci wlewków o średnicy 100 mm. Proces wyciskania prowadzono w zakresie temperatur od 320°C do 430°C i prędkości wyciskania od 0,5 do 5 mm/s. Badano również wpływ obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne stopów magnezu. Dla badanych stopów magnezu uzyskano wyższe właściwości mechaniczne dla stanu T5 niż dla stanu T6. We wnioskach odniesiono się do możliwości wykorzystania uzyskanych wyników.

**Słowa kluczowe:** stopy Mg, wyciskanie, obróbka cieplna, właściwości mechaniczne, gięcie.

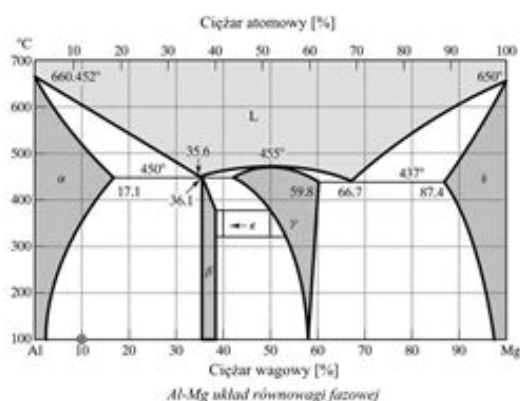
### 1. WPROWADZENIE

Magnez, jako pierwiastek charakteryzujący się bardzo małą gęstością  $1,74\text{g/cm}^3$ , jest najlżejszym metalem stosowanym do celów konstrukcyjnych. Ze względu jednak na niskie właściwości mechaniczne czystego magnezu w powszechnym użyciu znajdują się wyłącznie jego stopy odlewnicze i przeznaczone do przeróbki plastycznej. Stopy magnezu dzięki swoim właściwościom, takimi jak niska gęstość (ok.  $1,8\text{ g/cm}^3$ ), bardzo wysoki wskaźnik wytrzymałości właściwej (stosunek wytrzymałości do gęstości właściwej) oraz relatywnie dobra przewodność elektryczna oraz cieplna i skrawalność, stale poprawiają swoją pozycję na rynku, dając możliwość tworzenia bardzo lekkich konstrukcji o wysokiej sztywności[1]. Obecnie większość elementów wytwarzanych ze stopów magnezu, zwłaszcza w Polsce, produkowanych jest metodami odlewniczymi: grawitacyjnie do form metalowych i piaskowych lub ciśnieniowo. W przypadku, jeżeli wyroby ze stopów magnezu miałyby być zastosowane w elementach bardziej obciążonych np. w motoryzacji lub lotnictwie, to wymagane od nich byłyby wyższe właściwości mechaniczne. Wyroby spełniające te kryteria można uzyskać po przeróbce plastycznej i obróbce cieplnej.

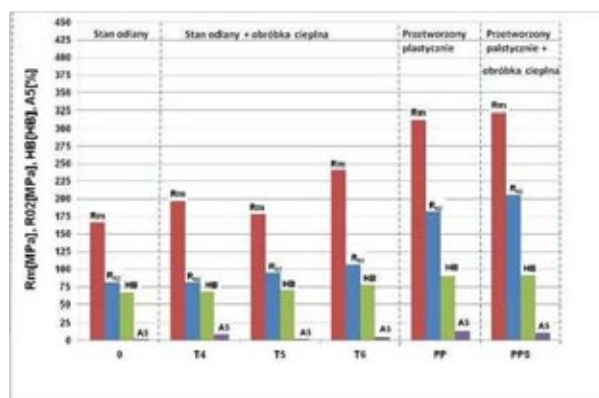
Najpopularniejszymi obecnie stopami magnezu są stopy z aluminium, cynkiem i manganem[1,2]. Aluminium korzystnie wpływa na poprawę wytrzymałości na rozciąganie i twardość. Cynk w stopach magnezu stosuje się, aby podnieść wytrzymałość stopu w temperaturze pokojowej, natomiast mangan dla zwiększenia odporności stopu na korozję. Strukturalnie stopy Mg-Al składają się z roztworu stałego oraz eutektyki. Z wykresu równowagi stopu Mg-Al (rys. 1) wynika zmienna zwiększająca się rozpuszczalność aluminium w magnezie do maksymalnej zawartości 12,7% w stanie stałym do temperatury eutektycznej 437°C. Dlatego też stopy te poddaje się obróbce cieplnej w celu podniesienia właściwości mechanicznych na drodze umocnienia wydzieleniowego (stan T5, T6) [3,4].

Stopy magnezu są przerabiane plastycznie głównie w podwyższonych temperaturach. Wynika to z budowy krystalicznej magnezu, który krystalizuje w układzie heksagonalnym. W tym systemie dostępne są tylko trzy systemy poślizgu, co jest niewystarczające, aby magnez i jego stopy mogły być wystarczająco plastyczne w temperaturze otoczenia [1]. Dopiero w podwyższonych temperaturach uruchamiają się dodatkowe dwa systemy poślizgu, co pozwala na kształtowanie plastyczne. W trakcie wysokotemperaturowego odkształcania metali zachodzą takie procesy jak: umocnienie, dynamiczne zdrowienie i dynamiczna rekrytalizacja. Procesy te zachodzą równolegle w odkształcanym metalu. Stopy magnezu posiadają niską energię błędu ułożenia, toteż dynamiczna rekrytalizacja jest procesem wiodącym w trakcie wysokotemperaturowej przeróbki plastycznej [5]. Powoduje ona usuwanie skutków umocnienia odkształceniowego, podnosi plastyczność i zmniejsza opory płynięcia.

Znaczna część światowej produkcji magnezu wykorzystywana jest jako dodatek stopowy do aluminium. Jedynie około 34% wykorzystywane jest do produkcji elementów magnezowych, z czego większość na komponenty odlewane, a tylko około 1% na przerabiane plastycznie. Elementy odlewane charakteryzują się niższymi własnościami mechanicznymi (tj wytrzymałość, wydłużenie) w stosunku do elementów kształtowanych przez procesy przeróbki plastycznej a następnie obrabianych cieplnie [6]. Różnice te bardzo dokładnie obrazuje wykres na rysunku 2.



Rys.1. Układ fazowy Al-Mg [4]



Rys. 2. Graficzne przedstawienie własności mechanicznych stopu AZ91 w zależności od rodzaju przetworzenia [6]

Mimo to własności mechaniczne stopów magnezu są niższe niż wielu stopów aluminium. Podejmuje się zatem działania polegające na takim doborze rodzaju i parametrów kształtowania plastycznego stopów magnezu, które pozwoli na zwiększenie wytrzymałości. Najlepszym do tego celu procesem wydaje się być wyciskanie, w którym wytwarzany stan naprężeń ściskających zapewnia najlepsze warunki do przeróbki plastycznej.

## 2. CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁU I METODYKA BADAŃ

W ramach prezentowanych prac badania były prowadzone dla stopów magnezu MgAlZn (AZ80A, AZ61, AZ31). Składy chemiczne tych stopów przedstawiono w tabelicy 1. Stopy te do badań zaawansowanych procesów przeróbki plastycznej były odlewane w postaci wlewków

okrągłych o średnicy 100 mm w Instytucie Metali Nieżelaznych, Oddział Metali Lekkich w Skawinie, który jako jedyny w Polsce i jeden z nielicznych w Europie posiada stanowisko do półciąglego, pionowego odlewania wlewków ze stopów Mg [7].

W pełni wyposażone i zautomatyzowane stanowisko (rys. 3) składa się z pieca topliwno-odlewniczego o pojemności 150kg Mg, studni z krystalizatorami oraz układem mieszania i dystrybucji gazów ochronnych. Stanowi ono doskonałą bazę do przeprowadzania prób wytwarzania materiałów ze stopów Mg do dalszych badań procesów przeróbki plastycznej.

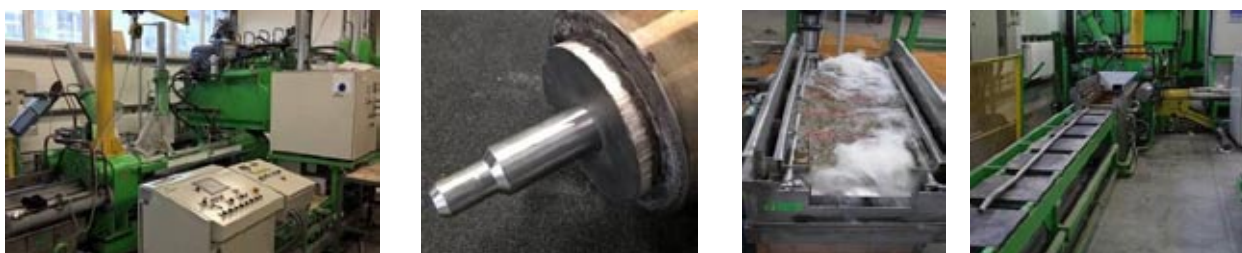
**Tablica 1.** Składy chemiczne stopów magnezu serii MgAlZn

Stop	Zn [%]	Al [%]	Si [%]	Cu [%]	Mn [%]	Suma pozostałych dodatków [%]
AZ80A	0,28	8,1	0,02	0,01	0,18	< 0,3
AZ61	0,62	5,97	0,03	0,003	0,31	< 0,3
AZ31	0,72	3,2	0,02	0,001	0,37	< 0,3



**Rys.3.** Linia do półciąglego odlewania wlewków ze stopów magnezu

Próby współbieżnego i przeciwbieżnego wyciskania prowadzono na poziomej prasie o sile maksimum 5 MN (rys. 4). Prasa wyposażona jest w hydrauliczny przebijak umożliwiający wyciskanie rur bez zgrzewów, nagrzewnicę indukcyjną, pozwalającą na trójstrefowe nagrzewanie wlewków o maksymalnych wymiarach  $\varnothing 100 \times 450$  mm, 12-metrowy wybieg z wózkiem prowadzącym (puller) i systemem chłodzenia prasówki, oraz rozciągarkę o sile 0,2 MN dla prętów długości do 6 m. Prasa ta zapewnia możliwość realizacji prób w skali półtechnicznej [8,9].



**Rys. 4.** Prasa współbieżno-przeciwbieżna 5MN z przebijakiem, „falą wodną” i wybiegiem

Kolejnym etapem było przeprowadzenie prób gięcia. Ze względu na wspomniane wcześniej trudności z odkształcaniem stopów magnezu na zimno opracowano specjalny układ grzania oporowego dający możliwości prowadzenia prób również w podwyższonych temperaturach. Próby gięcia przeprowadzono z zastosowaniem giętarki trzpieniowej GM-38NCB (rys. 5), która wraz z opracowanymi i wykonanymi narzędziami umożliwiała otrzymanie założonych kształtów. Na ich podstawie określono wymagane parametry, jakie musi spełniać przemysłowa giętarka wraz z oprzyrządowaniem (między innymi układem grzewczym) do gięcia rur i profili ze stopów magnezu.



Rys. 5. Giętarka GM-38NCB z oprzyrządowaniem do gięcia rur ze stopów magnezu

### 3. WYNIKI BADAŃ

#### 3.1. Wyciskanie stopów magnezu

Generalnie stopy magnezu przerabiane plastycznie charakteryzują się znacząco wyższymi własnościami w stosunku do tych otrzymywanych w procesach odlewniczych. Wynika to z tego, iż materiały przerobione plastycznie mają bardziej rozdrobione ziarna w wyniku rekrytalizacji dynamicznej. Należy podkreślić wpływ temperatury wyciskania na szybkość procesów zdrowienia i rekrytalizacji, oraz na stopień przesylenia. Pokazują to przykładowe, literaturowe dane [2,4], własności wyrobów po wyciskaniu wysoko i niskotemperaturowym przedstawione w tabelicy 2.

Tablica 2. Wpływ temperatury wyciskania na końcowe własności [2].

Temperatura wyciskania	$R_{p0,2}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	A (%)	Stan po obróbce cieplnej
niska	200 do 285	300 do 340	10 do 16	T5
wysoka	145	280	13	T5

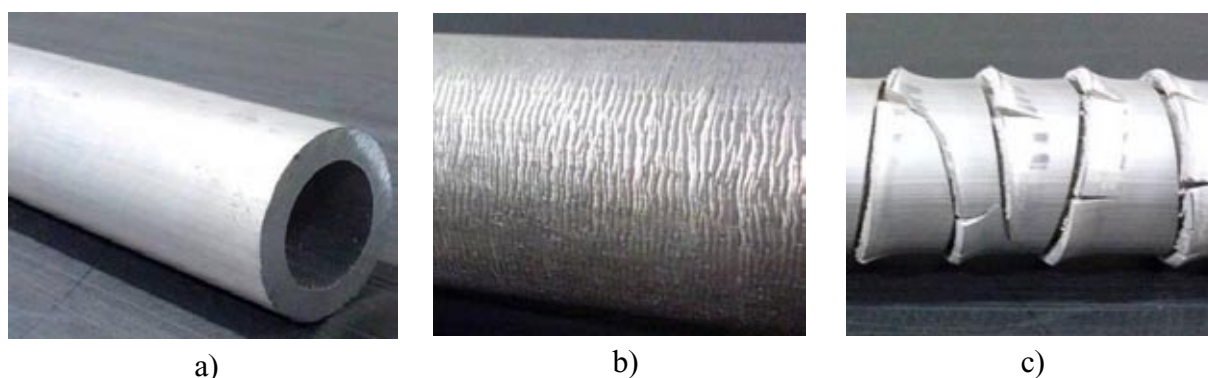
T5 = chłodzenie z temperatury przeróbki plastycznej i starzenie sztuczne 200<sup>0</sup>C /16 godzin.

Przygotowywane wlewki o średnicach 100 mm skórowano na wymiar  $\varnothing$  96 mm, a następnie wyciskano z nich pręty o przekroju okrągłym, kwadratowym lub prostokątnym. Wyciskano również bardziej skomplikowane profile oraz rury (rys. 6).



Rys. 6. Przykładowe elementy wyciskane ze stopów magnezu

Badane stopy magnezu wyciskano wspólnie przy współczynniku wyciskania  $\lambda$  (stosunek powierzchni przekroju poprzecznego wlewka, z którego się wyciska do powierzchni przekroju wyrobu wyciskanego) w zakresie od 8 do 30, stosując różne prędkości tłoka ( $V_t$ ) od 1mm/s do 5mm/s. Materiały nagrzewano od 320°C do 430°C. Ze względu na stosowanie wysokich, jak dla stopów magnezu, temperatur nagrzewania wlewki, które nagrzewano powyżej 400°C zostały uprzednio zabezpieczone powłoką chromianową, aby zminimalizować ich utlenianie się. Jako kryterium do oceny jakości materiału wyciskanego przyjęto stan powierzchni i występowanie ewentualnych pęknięć na gorąco. Przykładowe typy powierzchni materiału wyciskanego, jakie zaobserwowano w zależności od temperatury i prędkości wyciskania zamieszczono na rysunku 7.



**Rys. 7. Przykładowe powierzchnie wyciskanych wyrobów**

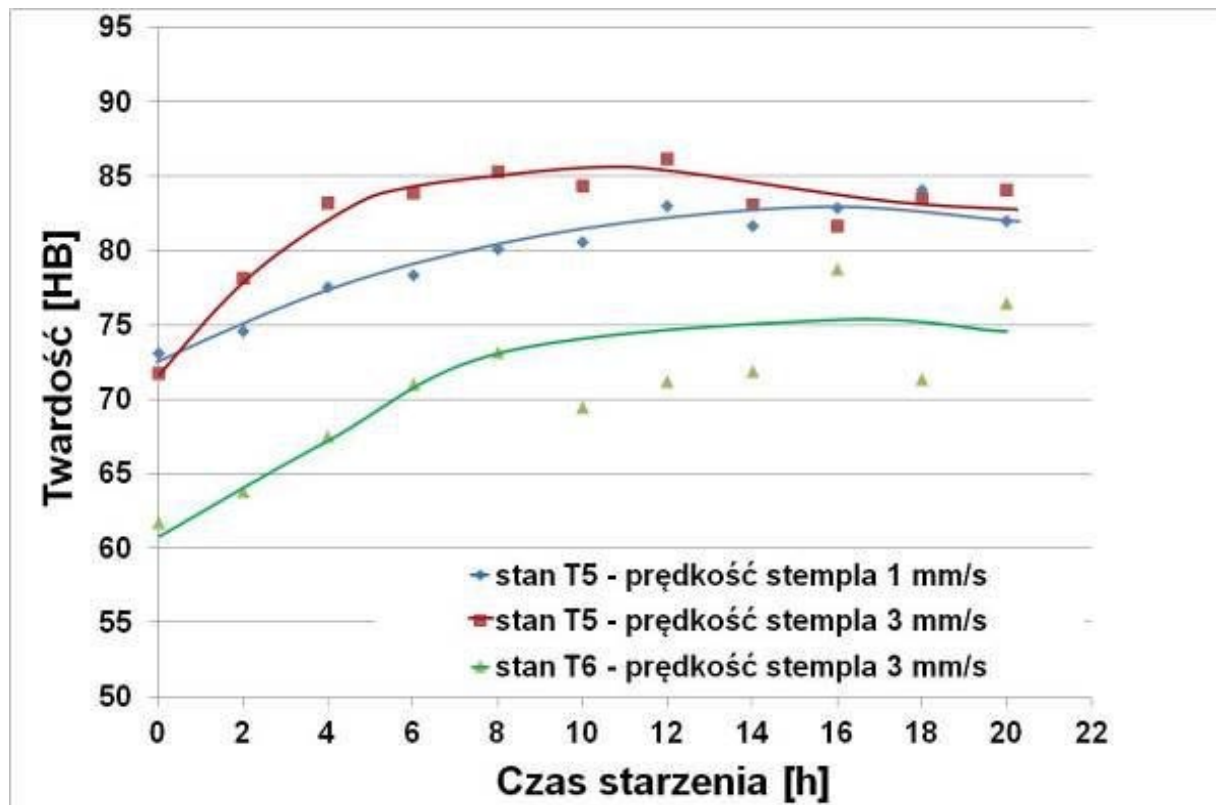
a – powierzchnia prawidłowa  $T_w$ -320°C÷420°C,  $V_t < 3$ mm/s; b - powierzchnia przejściowa  $T_w$ -380°C÷410°C,  $3$ mm/s >  $V_t < 4$ mm/s; c - powierzchnia popękana/zła  $T_w$ -400°C÷430°C,  $4$ mm/s >  $V_t < 5$ mm/s.

Z przeprowadzonych prób wyciskania wynika, iż dla badanych stopów dla prędkości tłoka do 3mm/s można stosować temperaturę materiału wyciskanego z zakresu od 320°C do 400°C. Wyższa temperatura wyciskania jest korzystna z punktu widzenia obniżenia siły procesu oraz jest niezbędna w przypadku przesycania pręta w systemie „on-line” na wybiegu prasy (stan T5). Dla wyższej prędkości tłoka należy obniżyć temperaturę materiału do wyciskania ponieważ w ogóle nie uda się wycisnąć prawidłowego materiału. Przedstawione wyniki oczywiście bardzo uogólniają zależność jakości powierzchni materiału wyciskanego od trzech głównych parametrów procesu wyciskania, czyli temperatury, prędkości wyciskania i współczynnika wyciskania  $\lambda$  dla stopów z grupy MgAlZn. Pokazują one jedynie pewien trend jak można sterować procesem wyciskania stopów magnezu, ponieważ w procesie wyciskania występują jeszcze inne parametry i czynniki, które wpływają na jego wynik.

### 3.2. Obróbka cieplna

Dla stopów magnezu, zarówno stopów odlewniczych, jak i przeznaczonych do przeróbki plastycznej, stosuje się głównie stany T5, T6. Badane wyroby wyciskane ze stopów magnezu poddano obróbce cieplnej do takich właśnie stanów, a dodatkowo jeszcze do stanu T1 i stanu wyżarzonego „O”. Ze względu na niedostateczne informacje literaturowe na temat parametrów przesycania, jak i starzenia zrealizowano serię badań mających na celu dobór odpowiednich parametrów temperaturowo-czasowych. Dla stanu T6 przyjęto z danych literaturowych temperaturę przesycania z zakresu od 420°C do 460°C, natomiast stan T5 uzyskany był poprzez przesycanie na wybiegu prasy z temperatury przeróbki plastycznej. Temperaturę starzenia 175°C dobrano jednakową dla wszystkich stopów.

W celu określenia optymalnego czasu starzenia wykonano krzywe umocnienia wydzieleniowego w wariacie przesycania w piecu oraz z temperatury przeróbki plastycznej. Na rysunku 8 zamieszczono wybrane krzywe starzenia naturalnego i sztucznego. Przykładowe wyniki właściwości mechanicznych dla różnych stopów w różnych stanach zamieszczono w tabelicy 3.



Rys.8. Krzywe starzenia naturalnego i sztucznego w temperaturze 175°C dla stopu magnezu AZ80A

Tablica 3. Właściwości mechaniczne wyciskanych stopów Mg w różnych stanach obróbki cieplnej

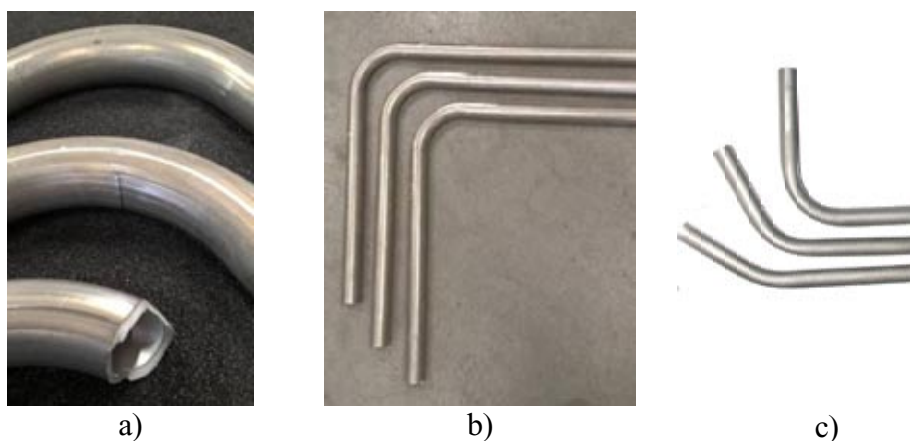
Stop	Stan	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A (%)	HB
AZ80A	F	237	312	10	65
	T1	210	329	13	85
	T5	275	353	9	87
	T6	226	336	10	78
	O	192	310	19	64
AZ61	F	207	316	17	64
	T5	243	338	19	70
	T6	204	311	21	58

	O	164	291	18	61
AZ31	F	249	306	11	61
	T5	265	318	19	64
	T6	165	255	25	55
	O	200	273	14	57

Chcąc uzyskać najlepsze efekty ekonomiczne w połączeniu z najwyższą jakością wyrobów, należy zastosować obróbkę cieplną wyrobów do stanu T5, czyli przesycanie z temperatury przeróbki plastycznej („przesycanie online”). Najbardziej korzystne jest prowadzenie procesu starzenia sztucznego przez czas 10 do 12 godzin. Lepsze efekty obróbki cieplnej uzyskuje się dla stopów o wyższej zawartości dodatków stopowych, czyli dla stopu AZ80A. Stopy o mniejszym dodatku Al w przypadku obróbki cieplnej w piecu po wyciskaniu (stan T6) uzyskują niższe właściwości mechaniczne niż w stanie wyciskanym (F). Jest to efektem intensywnego rozrostu ziarna w trakcie przesycania w piecu, co nie jest kompensowane efektem umocnienia wydzieleniowego. Na właściwości mechaniczne stopów magnezu ma duży wpływ temperatura wyciskania.

### 3.3 Próby gięcia

Próby prowadzone były na dwóch rozmiarach rur  $\varnothing 30 \times 2,5$  mm i  $\varnothing 25 \times 2$  mm. Polegały one na określeniu możliwego do osiągnięcia kąta gięcia, gdzie celem był kąt, co najmniej  $100^\circ$ . Badania prowadzono w dwóch różnych temperaturach – pokojowej około  $20^\circ\text{C}$  oraz podwyższonej około  $200^\circ\text{C}$ . W trakcie badań zrezygnowano z opcji procesu gięcia na gorąco z racji niewielkiego wzrostu podatności na gięcie w temperaturze ok.  $200^\circ\text{C}$ , przy jednoczesnym znacznym skomplikowaniu oprzyrządowania i obsługi procesu. Prawdopodobnie zdecydowanie lepsze efekty można osiągnąć stosując wyższe temperatury od  $300^\circ\text{C}$  do  $350^\circ\text{C}$ , jednak zdaniem autorów skutkowałoby to zbyt dużym skomplikowaniem procesu. Gięciu poddano rury w stanach obróbki cieplnej F, T5, T6 i O. Przykładowe typowe wady, jakie powstawały w trakcie prób gięcia oraz prawidłowo uformowane elementy uzyskane po określeniu optymalnych ustawień maszyny przedstawiono na rysunku 9. Najczęstszym przypadkiem były częściowe pęknięcia na wewnętrznej stronie łuku, a czasami całkowite pęknięcie rury. Zdarzały się również znaczne deformacje kształtu rury na łuku (zapadnięcia, owalizacja). Na rurach w stanach F, T5 i T6 uzyskiwano zazwyczaj tylko kąt od  $45^\circ$  do  $50^\circ$ . Jedynie rury w stanie „O”, czyli wyżarzonym można było zgiąć do zakładanego kąta  $100^\circ$ .



**Rys. 9. Próby gięcia rur**

a – gięcie wadliwe; b c, - prawidłowo zgięte elementy

Badania, których wyniki zawarto w niniejszym artykule prowadzone były w celu opracowania technologii wytwarzania giętych rur magnezowych stanowiących główny element konstrukcji wózka inwalidzkiego. Dotychczasowa technologia jego produkcji opiera się na zastosowaniu stopów aluminium. Dzięki użyciu stopów magnezu w jego konstrukcji potencjalni użytkownicy zyskają około 20% spadek masy ramy wózka oraz lepsze tłumienie drgań.

#### 4. WNIOSKI

1. Stopy magnezu z grupy MgAlZn przy małych prędkościach tłoka do około 3 mm/s można wyciskać w temperaturach z zakresu 350°C do 420°C, natomiast przy prędkości tłoka powyżej 3mm/s należy ograniczać temperaturę tym więcej im większa jest wartości współczynnika wyciskania  $\lambda$ .
2. Korzystniejsze jest prowadzenie procesu wyciskania w wyższej temperaturze, a przy mniejszej prędkości tłoka, ponieważ obniża to siłę wyciskania a równocześnie zapewnia możliwość przesycania bezpośrednio po wyciskaniu. Uzyskuje się wówczas drobnoziarnistą strukturę i wyższe właściwości mechaniczne.
3. Stopy magnezu serii AZ (MgAlZn) w stanie T5 uzyskują wyższe właściwości mechaniczne niż w stanie T6, czyli po ponownym nagrzewaniu i przesycaniu w piecu.
4. Ze wzrostem zawartości aluminium w stopie magnezu serii AZ, uzyskuje się wyższe właściwości mechaniczne po obróbce cieplnej.
5. W celu poprawy podatności do plastycznego kształtowania na zimno, stopy magnezu należy poddawać procesowi wyżarzania.
6. Właściwości mechaniczne stopów magnezu można kształtować przez odpowiednio dobrane parametry procesówprzeróbki plastyczneji obróbki cieplnej.
7. W dobrze dobranych procesach technologicznych można wytwarzać wyroby ze stopów magnezu do zastosowania w wielu gałęziach przemysłu, np. w specjalistycznym sprzęcie wojskowym w celu zmniejszenia jego masy.

#### 5. LITERATURA

- [1] ASM Speciality Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, ASM International Materials Park, OH, 2004 r.
- [2] Metals Handbook Ninth Edition, Properties and SelctionNonferroue Alloys and Pure Metals, Vol. 2, Metals Park, Ohio, 1979, p.707-832.
- [3] S. Kleiner a, O. Beffort a, P.J. Uggowitzer: Microstructure evolution during reheating of an extruded Mg–Al–Zn alloy into the semisolid state, ScriptaMaterialia 51 (2004) 405–410.
- [4] R.Ye. Lapovok, M.R. Bernett, C.H.J. Davies, J Mater Process Tech, 146, 408-414, 2004 r.
- [5] E.F Volkova:Effect of deformation and heat treatment on the structure and properties of magnesium alloys of the Mg- Zn- Zr system, Metal Science and Heat Treatment, p.508-512.
- [6] L. Liu, H. Zhou, Q. Wang, Y. Zhu, W. Ding, Advanced in Technology of Materials and Materials Processing Journal, 6, 158-165, 2004 r.
- [7] B. Płonka, J. Kut, P. Korczak, M. Lech-Grega, M. Rajda, „The influence of extrusion process parameters and heat treatment on the mechanical properties of high-strength magnesium alloy”, Archives of Metallurgy and Materials, Vol 57, s. 619-626.2012 r.



- [8] B. Płonka, M. Lech-Grega, K. Remsak, P. Korczak, A. Kłyszewski, "Die forging of high-strength magnesium alloys – the structure and mechanical properties in different heat treatment conditions, Archives of Metallurgy and Materials, Vol 58, s. 127-132, 2013 r.
- [9] B. Płonka, K. Remsak, P. Korczak, M. Lech-Grega, M. Rajda, „Research on extruded products of MgAlZn alloys – microstructure and mechanical properties“, Archives of Metallurgy and Materials, (JCR) Vol 60, s.2977-2980.2015 r.

*Badania zrealizowano w ramach przedsięwzięcia pilotażowego "Wsparcie badań naukowych i prac rozwojowych w skali demonstracyjnej Demonstrator +" finansowanego przez NCBR, Projekt nr UOD-DEM-1-255/001, pt. „Wykorzystanie innowacyjnych rozwiązań technologiczno-materiałowych w budowie pojazdów inwalidzkich”.*

## **MODERN TECHNOLOGIES OF MANUFACTURING ADVANCED MAGNESIUM ALLOY PRODUCTS USING METHODS OF PLASTIC PROCESSING**

**Abstract.** This paper discusses the process of direct and indirect extrusion of rods, profiles, tubes, etc. for a series of MgAlZn magnesium alloys, which are suitable for heat treatment to obtain the highest strength. These products have been manufactured at the Institute of Non-Ferrous Metals, Light Metals Division (IMN OML) in the form of billets with a 100 mm diameter. The extrusion process was performed in the temperature range between 320°C and 430°C and at the ram speed of 0.5 to 5.0 mm/s. The impact of heat treatment on the mechanical properties of magnesium alloys was also the subject of this study. The tested magnesium alloys had higher mechanical properties for temper T5 than for temper T6. In conclusion, reference is made to the possibilities of practical application of the results obtained.

**Keywords:** Mg alloys, extrusion, heat treatment, mechanical properties, bending.