

dr hab. inż. Dariusz LEŚNIAK, dr inż. Artur RĘKAS, prof. dr hab. inż. Wojciech LIBURA,
prof. dr hab. inż. Józef ZASADZIŃSKI
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Kraków
E-mail: dlesniak@agh.edu.pl

Badania odkształcalności stopów aluminium serii 5xxx o wysokiej zawartości Mg w procesie półprzemysłowego wyciskania

Study of the deformability of 5xxx series aluminum alloys with high Mg content in a semi-industrial extrusion process

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań procesu wyciskania na gorąco stopów AlMg o wysokich zawartościach Mg; analizę odkształcalności materiału i badania własności wytrzymałościowych wyrobu. Próby wyciskania kształtowników ze stopów aluminium w gatunkach PN-EN 5083 i PN-EN 5019 wykonano na półprzemysłowej prasie hydraulicznej poziomej o nacisku 5 MN, z wykorzystaniem matryc płaskich 2-otworowych. Analizowano parametry procesu wyciskania oraz własności mechaniczne kształtowników wyciskanych ze stopów o różnej zawartości Mg. Określono maksymalną, dopuszczalną prędkość wypływu metalu z otworu matrycy i graniczne temperatury solidus i likwidus ww. stopów w zależności od zawartości Mg w stopie.

Abstract

This paper presents the results of studies of the hot extrusion process of AlMg aluminum alloys with high Mg content; analysis of material deformability, and tests of product strength properties. Trial extrusions of sections made of aluminum alloy grades PN-EN 5083 and PN-EN 5019 were conducted on a semi-industrial horizontal hydraulic press with a pressing force of 5 MN using 2-hole flat dies. Extrusion process parameters and mechanical properties of sections extruded from alloys of varying Mg content were analyzed. The maximum acceptable rate of metal extrusion from the die hole and limit solidus and liquidus temperatures of the aforementioned alloys were determined depending on the Mg content in the alloy.

Słowa kluczowe: stopy aluminium serii 5xxx, wyciskanie, homogenizacja

Keywords: 5xxx series aluminum alloy, extrusion, homogenization

1. WPROWADZENIE

Stopy Al-Mg (serii 5xxx) do zawartości 1,4% Mg są roztworem stałym, a powyżej tej zawartości do ok. 14,9% Mg – roztworem stałym granicznym magnezu w aluminium z wtórnymi wydzieleniami fazy międzymetalicznej Al_3Mg_2 . Z tego względu stopy do zawartości 1,4 % Mg są nieobrabiane cieplnie, zaś powyżej tej zawartości można stosować obróbkę cieplną, lecz jej skuteczność jest słaba. Ustalono, że stopy o zawartości do ok. 5 % Mg są stopami przeznaczonymi

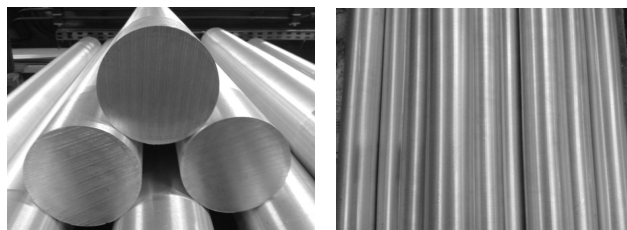
1. INTRODUCTION

Al-Mg alloys (5xxx series) with up to 1.4% Mg content are solid solutions, and above this content, up to approx. 14.9 % Mg – saturated solid solutions of magnesium in aluminum with secondary intermetallic precipitations of the Al_3Mg_2 phase. Because of this, alloys with up to 1.4% Mg content are unsuitable for heat treatment, and at higher contents, heat treatment may be applied, but with poor effectiveness. It has been established that alloys with up to approx. 5 % Mg content are

do przeróbki plastycznej, zaś stopy powyżej tej zawartości, praktycznie do 10% Mg, to stopy odlewnicze [1–2]. Wiemy, że stopy serii 5xxx są najbardziej odporne na korozję, zwłaszcza na działanie wody morskiej, ze wszystkich stopów aluminium oraz wykazują bardzo dobrą podatność do obróbki mechanicznej i spawania [2]. Wykazano, że stopy serii 5xxx są dwa, a nawet trzy razy odporniejsze na korozję od najbardziej rozpowszechnionych stopów serii 6xxx (AlMgSi). Stwierdzono niewielki spadek wytrzymałości na rozciąganie konstrukcji spawanych ze stopów AlMg w stosunku do konstrukcji wykonanych z materiału litego. Badania stopów serii 5xxx badania wykazały, że stopy te są średnio wytrzymałe, a najwyższe własności mechaniczne, zależne od zawartości magnezu, sięgają ok. 300 MPa i są porównywalne do wysoko składnikowych stopów AlMgSi. Ponadto, wzrost zawartości Mg prowadzi do podniesienia własności wytrzymałościowych stopów AlMg kształtowanych plastycznie, umacniania roztworu [3–4]. Wiąże się to z ograniczoną odkształcalnością materiału, niższą podatnością do procesów obróbki plastycznej na gorąco [5].

2. ODLEWANIE I HOMOGENIZACJA WLEWKÓW

Na rys. 1 przedstawiono wlewki do wyciskania ze stopów AlMg o wysokich zawartościach Mg (gatunki 5083 i 5019), które zostały odlane w Instytucie Metali Nieżelaznych – Oddziale Metali Lekkich w Skawinie (IMN OML Skawina). Odlewanie przeprowadzono na linii do odlewania pionowego, z wykorzystaniem 2 krystalizatorów HOT-TOP o średnicy 105 mm, ze smarowaniem ciągłym. Po odlaniu, wlewki poddano powierzchniowej obróbce mechanicznej – skórowaniu. W tablicach 1–2 podano składy chemiczne stopów aluminium gatunków 5083 i 5019, zgodnie z PN-EN 573-3:2010 [6].



Rys. 1. Wlewki ze stopów aluminium 5083 i 5019, odlane i skórowane w IMN OML Skawina

Fig. 1. 5083 and 5019 grade aluminum alloy ingots cast and peeled at IMN OML Skawina

alloys destined for plastic working, and alloys with higher Mg content, practically up to 10% Mg, are casting alloys [1–2]. It is known that 5xxx series alloys are the most resistant to corrosion, particularly to the action of sea water, among all aluminum alloys, and they also exhibit very good susceptibility to mechanical working and welding [2]. It has been shown that 5xxx series alloys are two or even three times more resistant to corrosion than the most widespread 6xxx series alloys (AlMgSi). A small reduction of the tensile strength of structures welded with AlMg alloys was observed in comparison to structures made of bulk material. Tests of 5xxx series alloys have shown that these alloys have medium strength, and the highest mechanical properties, dependent on magnesium content, reach approx. 300 MPa and are comparable to high AlMgSi alloys. Furthermore, an increase in Mg content leads to an increase in the strength properties of AlMg alloys subject to plastic working and hardening of the solution [3–4]. This is linked to limited material deformability and a lower susceptibility to hot plastic working processes [5].

2. INGOT CASTING AND HOMOGENIZATION

Fig. 1 presents ingots for extrusion made of AlMg alloys with high Mg contents (grades 5083 and 5019), which were cast at the Institute of Non-Ferrous Metals – Light Metals Division in Skawina (IMN OML Skawina). Casting was performed on a vertical casting line using 2 HOT-TOP continuous casting molds with a diameter of 105 mm, with continuous lubrication. After casting, ingots were subjected to mechanical surface processing – peeling. The chemical compositions of aluminum alloy grades 5083 and 5019 have been given in tables 1-2 according to PN-EN 573-3:2010 [6].

Tab. 1. Skład chemiczny stopu 5083 według PN-EN 573-3:2010 [6]

Tab. 1. Chemical composition of 5083 grade alloy according to PN-EN 573-3:2010 [6]

5083	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
	0.15-0.25	max 0.4	max 0.1	0.53-0.60	4.40- 4.50	0.05- 0.25	max 0.25	max 0.15	R

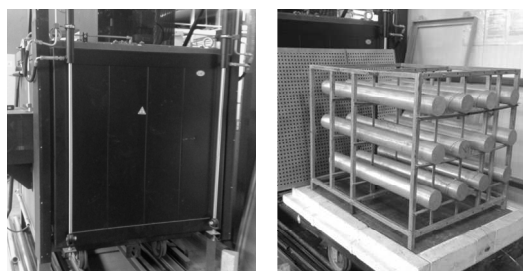
Tab. 2. Skład chemiczny stopu 5019 według PN-EN 573-3:2010 [6]

Tab. 2. Chemical composition of 5019 grade alloy according to PN-EN 573-3:2010 [6]

5019	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
	0.15-0.25	max 0.4	max 0.1	0.53-0.60	5.50- 5.60	max 0.1	max 0.2	max 0.2	R

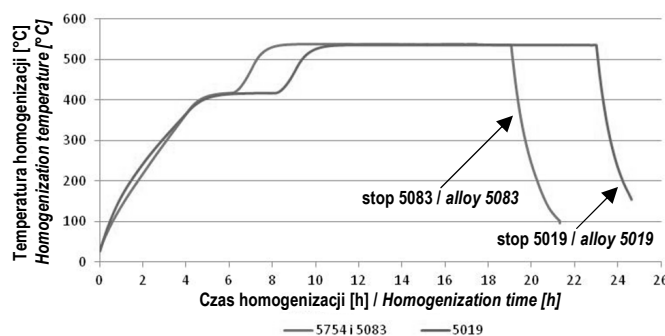
Na rys. 2 zaprezentowano piec do homogenizacji wlewków o wymiarach $\varnothing 96 \times 1000$ mm wraz z wózkiem, na którym wlewki po zakończeniu wygrzewania chłodzono z odpowiednią szybkością. Wlewki ze stopu 5083 homogenizowano według następującej procedury: 20°C – nagrzewanie 4h – wygrzewanie 410°C/2h – nagrzewanie 1h – wygrzewanie 530°C/12h – studzenie na powietrzu. Wlewki ze stopu 5019 homogenizowano według następującej procedury: 20°C – nagrzewanie 4h – wygrzewanie 410°C/4h – nagrzewanie 1h – wygrzewanie 530°C/14h – studzenie na powietrzu. Rys. 3 przedstawia krzywe temperatura-czas homogenizacji wlewków ze stopów 5083 i 5019.

Fig. 2 shows the furnace for ingot homogenization with dimensions $\varnothing 96 \times 1000$ mm along with the cart on which ingots were cooled at the appropriate rate after the conclusion of soaking. 5083 grade ingots were homogenized according to the following procedure: 20°C – heating 4h – soaking 410°C/2h – heating 1h – soaking 530°C/12h – cooling in air. 5019 grade ingots were homogenized according to the following procedure: 20°C – heating 4h – soaking 410°C/4h – heating 1h – soaking 530°C/14h – cooling in air. Fig. 3 presents the temperature-homogenization time curves of 5083 and 5019 grade ingots.



Rys. 2. Piec do nagrzewania i wygrzewania wlewków podczas homogenizacji (po lewej) oraz wózek transportujący wlewki do chłodzenia (po prawej)

Fig. 2. Furnace for heating and soaking of ingots during homogenization (left) and cart transporting ingots for cooling (right)



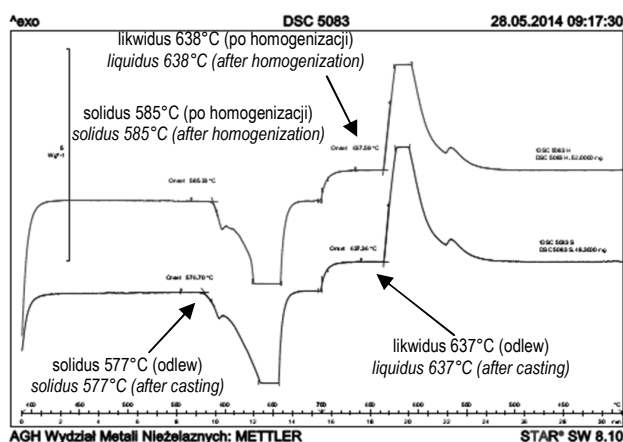
Rys. 3. Krzywe temperatura-czas homogenizacji wlewków ze stopów aluminium gatunków 5083 i 5019

Fig. 3. Temperature-homogenization time curves of 5083 and 5019 grade ingots

3. BADANIA KALORYMETRYCZNE

W celu określenia granicznych temperatur likwidus i solidus przeprowadzono badania kalorymetryczne stopów aluminium: EN AW-5083 i EN AW-5019 w stanie odlewanym i po homogenizacji. Badania zrealizowano z wykorzystaniem skaningowego kalorymetru różnicowego (DSC) typu przepływ ciepła firmy Mettler Toledo. Próbkę w kształcie walca o średnicy około 5 mm i masie 37,7–52 mg umieszczano w tyglu wykonanym z tlenku glinu. Pomiar polegał na badaniu efektów cieplnych podczas nagrzewania od temperatury 390°C do 700°C, a następnie studzeniu do 390°C. Nagrzewanie i studzenie realizowano z szybkością 20°C/min. Badania prowadzono w atmosferze argonu.

Wyniki pomiarów w postaci krzywych kalorymetrycznych, przedstawiono na rys. 4–5. Na krzywych widoczne są endo- i egzotermiczne efekty energetyczne pochodzące od topienia i krzepnięcia badanych stopów. Dla każdego stopu wyznaczono początek topienia (temperatura solidus) oraz początek krzepnięcia (temperatura likwidus). W przypadku stopu 5083 temperatura solidus wyniosła 577°C (odlew) i 585°C (po homogenizacji), a temperatura likwidus 637°C (odlew) i 638°C (po homogenizacji). Dla stopu 5019 temperatura solidus wyniosła 563°C (odlew) i 573°C (po homogenizacji), a temperatura likwidus 631°C (odlew i po homogenizacji).

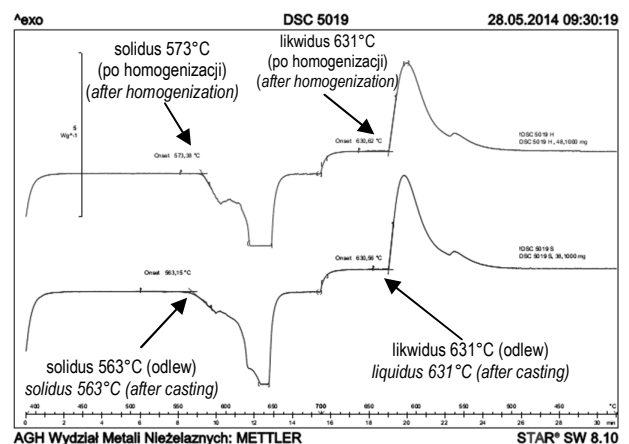


Rys. 4. Krzywe kalorymetryczne stopu EN AW-5083
Fig. 4. Calorimetric curves of the EN AW-5083 alloy

3. CALORIMETRIC TESTING

In order to determine the limit liquidus and solidus temperatures, calorimetric tests of aluminum alloys were conducted: EN AW-5083 and EN AW-5019 in after-casting state and state after homogenization. Tests were conducted using a heat-flow type differential scanning calorimeter (DSC) from the Mettler Toledo company. Cylindrical specimens with a diameter of approx. 5 mm and a weight of 37.7–52 mg were placed in an aluminum oxide crucible. The measurement was based on studying the thermal effects during heating from a temperature of 390°C to 700°C, followed by cooling to 390°C. Heating and cooling were performed at a rate of 20°C/min. Tests were conducted in an argon atmosphere.

The results of measurements are presented in Figs. 4–5 in the form of calorimetric curves. Endo- and exothermic energy effects resulting from melting and solidification of the tested alloys are visible on the curves. The melting point (solidus temperature) and the solidification point (liquidus temperature) were determined for each alloy. In the case of the 5083 grade alloy, the solidus temperature was equal to 577°C (after casting) and 585°C (after homogenization), and the liquidus temperature was equal to 637°C (after casting) and 638°C (after homogenization). In the case of the 5019 grade alloy, the solidus temperature was equal to 563°C (after casting) and 573°C (after homogenization), and the liquidus temperature was equal to 631°C (after casting and after homogenization).



Rys. 5. Krzywe kalorymetryczne stopu EN AW-5019
Fig. 5. Calorimetric curves of the EN AW-5019 alloy

4. WYCISKANIE STOPÓW AlMg

Próby wyciskania kształtowników ze stopów aluminium w gatunkach 5083 i 5019 wykonano na półprzemysłowej prasie hydraulicznej o nacisku 5 MN (rys. 6), wyposażonej w system pomiaru temperatury metalu opuszczającego otwór matrycy-(pirometr) i urządzenie ciągnące wyrób po wybiegu prasy, tzw. „puller”. Wyciskano płaskownik o szerokości 50 mm i grubości ścianki 2.0 mm z wykorzystaniem matryc płaskich 2-otworowych (rys. 7). Parametry procesu wyciskania podano w tab. 3. Analizowano jakość powierzchni płaskowników wyciskanych ze stopów AlMg o wysokiej zawartości Mg w powiązaniu z prędkościowo-temperaturowymi warunkami procesu wyciskania (rys. 8–9). Przy zastosowaniu zbyt dużych prędkości wyciskania i złej temperatury pojawiały się wady powierzchniowe w postaci „pęcherzy” dla stopu 5083 (rys. 8) oraz w postaci „łusek” dla stopu 5019. Oszacowano maksymalną dopuszczalną prędkość wypływu metalu z otworu matrycy: 12.1 m/min (stop 5083) i 2.5 m/min (stop 5019).

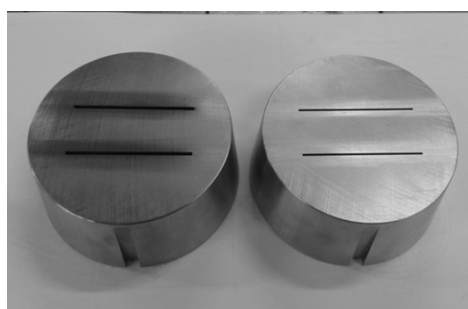
4. EXTRUSION OF AlMg ALLOYS

Trials of extruding sections from 5083 and 5019 grade aluminum alloys were performed on a semi-industrial hydraulic press with a pressing force of 5 MN (Fig. 6) and equipped with a system for measuring the temperature of the metal extruded through the die hole (pyrometer) and a device drawing the product over the coasting – a so-called “puller”. A flat bar with a width of 50 mm and a wall thickness of 2.0 mm was extruded using 2-hole flat dies (Fig. 7). The parameters of the extrusion process are given in Tab. 3. The quality of the surface of flat bars extruded from AlMg alloys with high Mg content was analyzed in relation to the extrusion rate-temperature conditions of the extrusion process (Figs. 8–9). When excessive extrusion rates and/or improper temperatures were applied, surface defects in the form of “bubbles” appeared in the case of the 5083 grade alloy (Fig. 8) and in the form of “scales” in the case of the 5019 grade alloy. The maximum acceptable rate of metal extrusion from the die hole was estimated to be: 12.1 m/min (5083 alloy) and 2.5 m/min (5019 alloy).



Rys. 6. Prasa hydrauliczna pozioma 5 MN (po lewej) oraz urządzenie ciągnące wyciskany wyrób po wybiegu prasy tzw. „puller” (po prawej)

Fig. 6. 5 MN horizontal hydraulic press (left) and device drawing the extruded product along the coasting of the press – so-called “puller” (right)

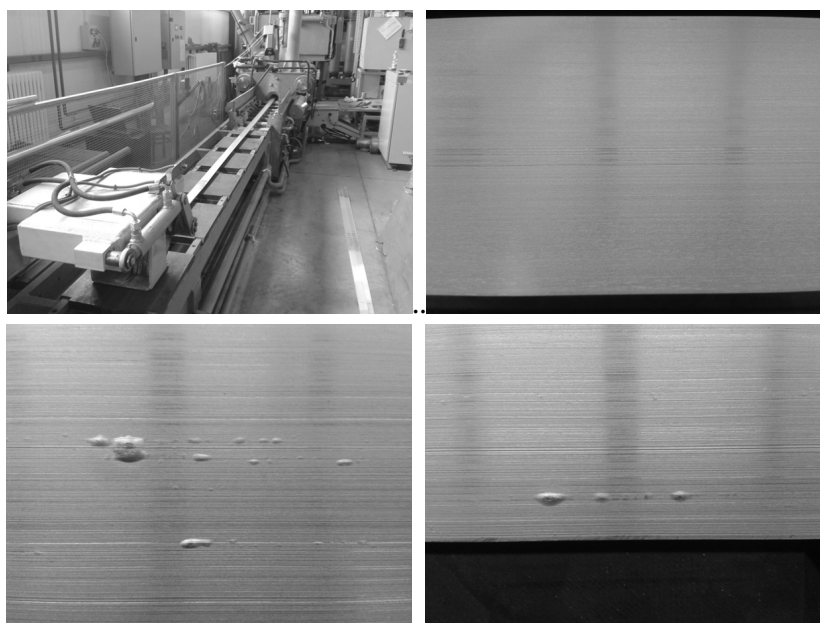


Rys. 7. Matryce płaskie 2-otworowe do wyciskania płaskowników ze stopów AlMg

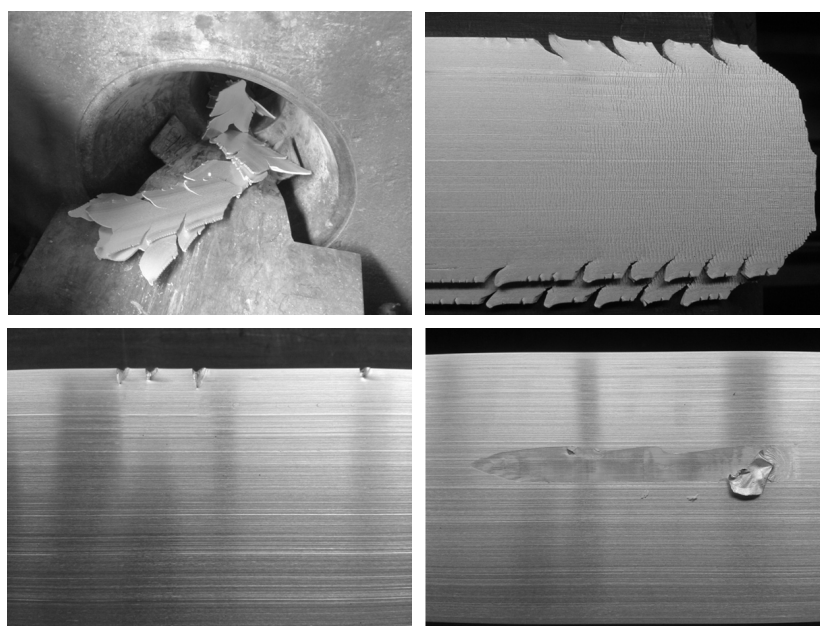
Fig. 7. 2-hole flat dies for extrusion of flat bars from AlMg alloys

Tab. 3. Parametry procesu wyciskania płaskowników ze stopów 5083 i 5019
 Tab. 3. Parameters of the process of flat bar extrusion from 5083 and 5019 grade alloys

Stop / Alloy	5083	5019
Wymiary wlewka, $D_w \times L_0$ [mm] / Ingot dimensions, $D_w \times L_0$ [mm]	Ø96x140 mm	
Średnica pojemnika, D_0 [mm] / Container diameter, D_0 [mm]	100	
Matryca płaska 2-otworowa, [mm] / 2-hole flat die, [mm]	50x2	
Temperatura wlewka, [°C] / Ingot temperature, [°C]	500	490
Współczynnik wydłużenia, λ [-] / Elongation coefficient, λ [-]	39.2	
Prędkość wyciskania, V_0 [mm/s] / Extrusion rate, V_0 [mm/s]	3-6	1-4
Temperatura metalu, T_1 [°C] / Metal temperature, T_1 [°C]	533-557	480-520



Rys. 8. Płaskowniki wyciskane ze stopu 5083 w granicznych warunkach prędkościowo-temperaturowych
 Fig. 8. Flat bars extruded from 5083 grade alloy under limit extrusion rate-temperature conditions



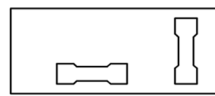
Rys. 9. Płaskowniki wyciskane ze stopu 5019 w granicznych warunkach prędkościowo-temperaturowych
 Fig. 9. Flat bars extruded from 5019 grade alloy under limit extrusion rate-temperature conditions

5. BADANIA WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH

Na rys. 10 zaprezentowano zdjęcie ze statycznej próby rozciągania próbki (po lewej), schemat rozmieszczenia próbek do rozciągania, pobranych z wyciskanych płaskowników (po prawej na górze) oraz wartości wytrzymałości na rozciąganie próbek poprzecznych i wzdłużnych ze stopów 5083 i 5019 (po prawej na dole). Na rys. 11–12 przedstawiono krzywe naprężenie-odkształcenie wyznaczone w statycznej próbie rozciągania dla stopu 5083 (rys. 11) i 5019 (rys. 12).

5. TESTING OF MECHANICAL PROPERTIES

Fig. 10 presents a photograph from a static tensile test of a specimen (left), the scheme of the arrangement of specimens for tensile testing acquired from extruded flat bars (top right), and tensile strength values of cross-section and longitudinal section specimens made of 5083 and 5019 alloys (bottom right). Figs. 11–12 present stress-strain curves determined during the tensile test for the 5083 alloy (Fig. 11) and the 5019 alloy (Fig. 12).

**stop 5083 / 5083 grade alloy**

R_m próbek poprzecznych / R_m of cross-section specimens = 238.1 MPa

R_m próbek wzdłużnych / R_m of longitudinal section specimens = 232.9 MPa

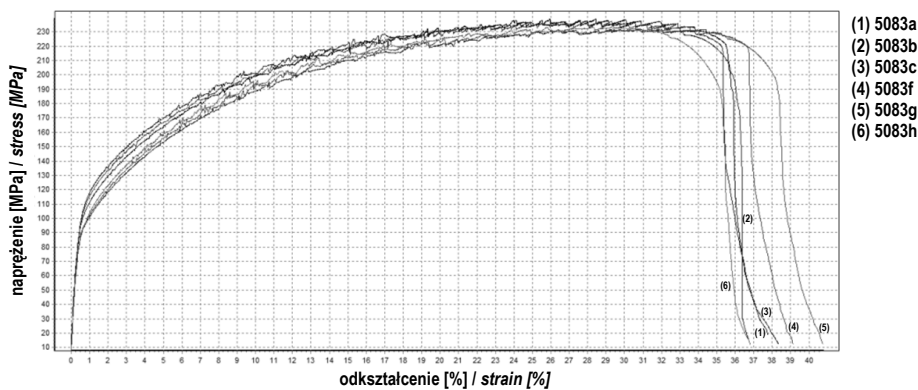
stop 5019 / 5019 grade alloy

R_m próbek poprzecznych / R_m of cross-section specimens = 307.7 MPa

R_m próbek wzdłużnych / R_m of longitudinal section specimens = 302.9 MPa

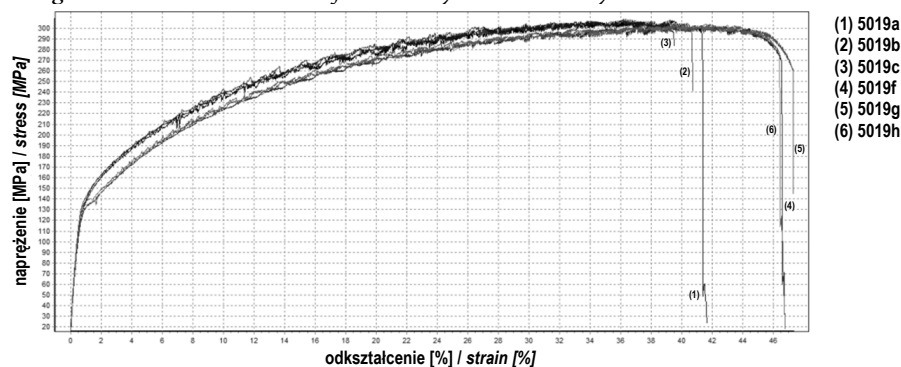
Rys. 10. Badanie wytrzymałości na rozciąganie R_m próbek pobranych z wyciskanych płaskowników ze stopów 5083 i 5019 (poprzecznych i wzdłużnych) w statycznej próbie rozciągania

Fig. 10. Tensile strength R_m testing of specimens acquired from extruded flat bars made of 5083 and 5019 alloys (cross-section and longitudinal section specimens) by means of a static tensile test



Rys. 11. Krzywe naprężenie-odkształcenie stopu 5083 wyznaczone w statycznej próbie rozciągania

Fig. 11. Stress-strain curves of 5083 alloy determined by the static tensile test



Rys. 12. Krzywe naprężenie-odkształcenie dla stopu 5019 wyznaczone w statycznej próbie rozciągania

Fig. 12. Stress-strain curves of 5019 alloy determined by the static tensile test

6. PODSUMOWANIE

Opanowanie technologii wyciskania stopów serii 5XXX o wysokiej zawartości Mg należy do trudnych przedsięwzięć badawczych, wymagających kompleksowej wiedzy, między innymi na temat odkształcalności tego typu stopów w różnych warunkach procesu wyciskania. Przeprowadzone zabiegi obejmujące odlewanie wlewków, homogenizację oraz wyciskanie współbieżne na gorąco, wzbogacone o badania kalorymetryczne i badania własności mechanicznych wyciskanych wyrobów dały podstawy do projektowania technologii wyciskania kształtowników ze stopów serii 5XXX z wysoką zawartością Mg (stopy w gat. 5083 i 5019). Szczególnie ważnymi właściwościami w bilansie cieplnym procesu wyciskania na gorąco, rzutującymi na maksymalną prędkość wypływu metalu z otworu matrycy i jakość wyciskanego wyrobu są temperatury likwidus i solidus wyciskanego stopu o określonym składzie chemicznym [7–8]. W powiązaniu z parametrami homogenizacji oraz parametrami temperaturowo-prędkościowymi procesu wyciskania danego stopu dają one szansę opanowania technologii wyciskania tych trudno odkształcalnych stopów. Oszacowaną w badaniach dla stopu w gat. 5083 prędkość wypływu metalu z otworu matrycy na poziomie ok. 12 m/min należy uznać za przynajmniej zadowalającą, gwarantującą w praktyce dobrą wydajność procesu wyciskania. Nieco gorszą wydajność wyciskania kształtowników przedstawia stop w gat. 5019, dla którego oszacowano prędkość wypływu metalu z otworu matrycy na poziomie ok. 2,5 m/min. Zważywszy jednak, że kształtowniki z tych stopów mają wytrzymałość na rozciąganie na poziomie ponad 300 MPa (bez obróbki cieplnej), możemy uznać że istnieją możliwości praktycznego opanowania technologii ich wyciskania. Profile w postaci taśmy uzyskane podczas wyciskania charakteryzowały się wytrzymałością ok. 240 MPa dla stopu 5083 i ponad 300 MPa dla stopu 5019. Duże znaczenie dla kształtowania stopów AlMg o wysokiej zawartości Mg (wysoki opór plastyczny materiału) ma odpowiednia konstrukcja matrycy, umożliwiająca minimalizację siły wyciskania oraz maksymalizację prędkości wypływu metalu z otworu matrycowego [9–10].

6. SUMMARY

Mastering the technology of extruding 5XXX alloys with high Mg content is a difficult research endeavor that requires broad knowledge, including on the subject of the deformability of alloys of this type under various conditions of the extrusion process. The conducted procedures, including ingot casting, homogenization, and hot co-extrusion enriched by calorimetric tests and tests of mechanical properties of the extruded products, gave grounds for designing the technology for extruding sections from 5XXX series alloys with high Mg content (alloy grades 5083 and 5019). The liquidus and solidus temperatures of an alloy with a specific chemical composition that is being extruded are particularly important properties in the thermal balance of the hot extrusion process, and they have an impact on the maximum rate of metal extrusion from the die hole and on the quality of the extruded product [7–8]. In combination with homogenization parameters and the temperature-extrusion rate parameters of the extrusion process of a given alloy, these properties provide the opportunity to master the technology of extruding these hard-deformable alloys. The rate of metal extrusion from the die hole estimated at approx. 12 m/min in tests of the 5083 grade alloy should at least be acknowledged as satisfactory and guaranteeing a good output of the extrusion process in practice. The 5019 grade alloy presents a somewhat worse section extrusion output, and its rate of extrusion from the die hole was estimated at approx. 2.5 m/min. Considering that sections made from these alloys have a tensile strength at a level of more than 300 MPa (without heat treatment), it can be acknowledged that it is practically possible to master the technology of their extrusion. Sections in the form of tape obtained during extrusion were characterized by a strength of approx. 240 MPa for the 5083 grade alloy and over 300 MPa for the 5019 grade alloy. The appropriate die design, enabling minimization of the extrusion force and maximization of the rate of metal extrusion from the die hole, are of great significance to shaping AlMg alloys with high Mg content (high plastic resistance of material) [9–10].

PODZIĘKOWANIA

Prezentowane badania są finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu DEMONSTRATOR+ (nr projektu WND-DEM-1-335/00).

ACKNOWLEDGEMENTS

The presented studies are financed by the National Centre for Research and Development within the framework of the DEMONSTRATOR+ Program (project no. WND-DEM-1-335/00).

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Totten G.E., MacKenzie D.S.: *Physical metallurgy and processes*, w: *Handbook of Aluminum*, vol. 1, pod red. Totten G.E. i MacKenzie D.S., 2003, s. 385–480.
- [2] *ASM Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys*, ASM International, 1993.
- [3] Laue K., Stenger H.: *Extrusion – Process, Machinery, Tooling*. ASM, Metals Park, Ohio, 1981.
- [4] Saha P.: *Aluminum extrusion technology*. ASM International, Ohio, 2000.
- [5] Shepard T.: *On the relationship between extrusion conditions, mechanical properties and surface acceptability in some hard aluminum alloys*. Proc. 7th International aluminum extrusion technology seminar, Chicago 2000, s. 307–320.
- [6] PN-EN 573-3: 2010: Aluminium and aluminium alloys. Chemical composition and products plastically deformed (Polish and European standard).
- [7] Zasadziński J., Libura W., Richert J.: *Prędkość wypływu trudnoodkształcalnych stopów Al podczas wyciskania w temperaturach bliskich temperatury topnienia*. *Rudy i Metale Nieżelazne* R. 50 nr 12 (2005), s. 686–689.
- [8] Zasadziński J., Richert J., Libura W.: *Temperaturowo-prędkościowe warunki wyciskania trudno odkształcalnych stopów Al*. *Rudy i Metale Nieżelazne* R. 22 nr 9 (1977), s. 456–458.
- [9] Libura W., Leśniak D., Rękas A., Zasadziński J.: *Analiza numeryczna procesu wielootworowego wyciskania kształtowników ze stopu AlMg*. *Rudy i Metale Nieżelazne* R. 55 nr 1 (2010), s. 39–43.
- [10] Rękas A., Baścik A., Leśniak D., Bakalarski P., Dokupil K., Libura W.: *Wpływ geometrii matrycy na jakość wyciskanych kształtowników z trudnoodkształcalnych stopów aluminium*. *Rudy i Metale Nieżelazne* R. 52 nr 9 (2007), s. 555–559.

