



Analiza właściwości mechanicznych i dokładność wymiarów cienkościennych kształtowników zamkniętych wyciskanych ze stopu AW6082

Analysis of mechanical properties and dimensional accuracy of hollow thin-walled shapes extruded from A W6082 alloy

(1) Jacek Borowski^{1*}, (2) Grzegorz Płaczek¹, (3) Henryk Jurczak², (4) Dariusz Leśniak³, (5) Wojciech Libura³, (6) Józef Zasadziński³, (7) Artur Rękas³

¹ Instytut Obróbki Plastycznej, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań, Poland

² Albatros Aluminium Sp. z o.o., ul. Czartoria 1, 61-102 Poznań, Poland

³ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Adama Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

Informacje o artykule

Data przyjęcia: 12.01.2016

Data recenzji: 10.02.2016

Data akceptacji: 22.03.2016

Wkład autorów

- (1) Koncepcja, złożenia, metodyka i analiza wyników badań
- (2) Badania wytrzymałościowe oraz metrologiczne, opracowanie wyników i wykresów
- (3) Opracowanie sposobu wyciskania i wykonanie materiałów do badań oraz założeń parametrów wyciskania
- (4) Dobór parametrów przygotowania materiałów i analiza wyników, dobór składu chemicznego koncepcji wyciskania
- (5) (6) (7) Opracowanie parametrów wyciskania i założeń do metodyki wyboru parametrów kształtowania wyrobów

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości wyciskanych cienkościennych (grubość ścianki ok. 1,2 mm) kształtowników zamkniętych ze stopu AW6082 w stanie T5. Kształtowniki wyciskano metodą wyciskania zgrzewającego, za pomocą 6-otworowych matryc mostkowo-komorowych. Optymalizowano parametry wyciskania zmieniając prędkość wyciskania oraz szybkość chłodzenia. Wyznaczono właściwości mechaniczne, twardość, grubość ścianek oraz chropowatość powierzchni kształtowników poddanych wyciskaniu z różną prędkością (9, 10 i 12 m/min), chłodzonych na wybiegu prasy z różną szybkością chłodzenia (natryskiwanie wodne-spray, fala wodna) oraz starzonych sztucznie w temperaturze 180°C w czasie 2 godzin. Na podstawie badań stwierdzono, że przy najwyższej zastosowanej prędkości wyciskania 12 mm/min udało się osiągnąć wysokie właściwości mechaniczne oraz drobnoziarnistą równomierną strukturę. Na podstawie badań grubości profilu stwierdzono, że pomimo otrzymania wyrobu o zadowalającej tolerancji grubości istnieje konieczność korekty matrycy, aby uzyskać bardziej równomierny rozkład. Zmiana grubości ścianki owalnego profilu wynika nie tylko ze szczeliny wypływu ale również z trudnego do przewidzenia na etapie projektowania ugięcia matrycy podczas wyciskania. Prędkość wyciskania wpływa również na jakość powierzchni profilu, która wyrażona poprzez parametr chropowatości R_a jest najgorsza przy wyciskaniu z prędkością 9m/min. W wyniku wzrostu prędkości wyciskania do 10 lub 12 mm/min chropowatość obniża się, co poprawia jakość powierzchni. Zmiana szybkości chłodzenia z chłodzenia powietrzem na natryskiwanie wodne lub za pomocą tzw. fali wodnej spowodowała wzrost wytrzymałości do zakładanej i pożądanej przez odbiorcę końcowego tj. $R_m > 310$ MPa, ale jednocześnie nie wpłynęło to na znaczny spadek wydłużenia względnego A.

Słowa kluczowe: wyciskanie, stop AW6082, wytrzymałość na rozciąganie R_m , chropowatość, dokładność wymiarów

Article info

Received: 12.01.2016

Reviewed: 10.02.2016

Accepted: 22.03.2016

Abstract

This paper presents the results of tests of the properties of hollow thin-walled (wall thickness approx. 1.2 mm) shapes made of AW6082 alloy in T5 state. Shapes were extruded using the bonding extrusion method, by means of 6-hole porthole dies. Extrusion parameters were optimized by changing the rate of extrusion and cooling. Mechanical properties, hardness, wall thickness and surface coarseness of shapes subjected to extrusion at various rates (9, 10

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 61 657 05 55; Fax: +48 61 657 07 21; e-mail: borowski@inop.poznan.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 61 657 05 55; Fax: +48 61 657 07 21; e-mail: borowski@inop.poznan.pl

Authors' contribution

- (1) Conception, submission, methodology and analysis of test results
- (2) Strength testing and metrology, development of results and diagrams
- (3) Development of extrusion method and construction materials testing and assumptions of extrusion parameters
- (4) Parameters selection for materials preparation and analysis of results, selection of the chemical composition of the concept of extruding
- (5) (6) (7) Development of extrusion parameters and assumptions to the methodology of parameters selection of shaping the products

and 12 m/min), cooled on the press coasting at different cooling rates (water spray, water wave), and artificially aged at a temperature of 180°C over 2 hours, were determined. Based on the tests, it was found that high mechanical properties and a uniform, fine-grained structure were successfully achieved at the highest applied extrusion rate of 12 mm/min. Based on the shape thickness measurements, it was determined that, despite achievement of a product of satisfactory thickness tolerance, it is necessary to correct the die to obtain more uniform distribution. The change of the wall thickness of the oval shape results from the complexity of the die orifice and also from the die deflection during extrusion, which is difficult to predict at the designing stage. Extrusion rate also has an impact on the surface quality of the shape, which is expressed by the parameter of coarseness R_a , and this quality was lowest for extrusion at a rate of 9 m/min. As a result of an increase in extrusion rate from 10 to 12 mm/min, coarseness is reduced, improving surface quality. The change in cooling rate from air cooling to water spraying or by means of a so-called water wave caused an increase of strength to the level assumed and desired by the end recipient, i.e. $R_m > 310$ MPa, but at the same time, did not have an impact on the significant reduction of relative elongation A .

Keywords: extrusion, AW6082 alloy, tensile strength R_m , coarseness, dimensional accuracy

1. WSTĘP

Stopy aluminium serii 6xxx są materiałami szeroko stosowanymi w przemyśle samochodowym i lotnictwie. Ich główny dodatek stopowy stanowi magnez oraz krzem, a właściwości stopów tej serii są silnie determinowane przez ich skład chemiczny [1]. Charakteryzują się one dobrą plastycznością, skrawalnością, spawalnością oraz odpornością na korozję. Łatwość poddawania stopów aluminium obróbce plastycznej powoduje, że są one doskonałą grupą materiałów stosowanych do wyciskania na gorąco.

Stop 6082 cechuje się wysoką wytrzymałością mechaniczną, co pozwala na szerokie wykorzystanie tego materiału na elementy nośne w różnego typu środkach transportu m.in. w przemyśle autobusowym, kolejowym, samochodów ciężarowych oraz w przemyśle stoczniowym (okrętowym).

Wyciskanie jest szeroko stosowanym procesem przy wytwarzaniu długich elementów o skomplikowanych przekrojach. Kluczowym narzędziem w procesie wyciskania jest matryca, której budowa silnie wpływa na homogenizację materiału płynącego w jej wnętrzu [2] oraz na parametry siłowe i prędkość wyciskania.

Do wytwarzania profili zamkniętych wykorzystuje się składane matryce mostkowo-komorowe (z ang. *porthole die*), w których w pierwszym etapie, poprzez rozcięcie wlewka

1. INTRODUCTION

6xxx series aluminum alloys are materials that are widely applied in the automotive and aviation industries. Their main alloying elements are magnesium and silicon, and the properties of alloys in this series are strongly determined by their chemical composition [1]. They are characterized by good plasticity, machinability, weldability, and corrosion resistance. The ease of subjecting aluminum alloys to plastic working causes them to be an excellent group of materials for hot extrusion.

6082 alloy is characterized by high mechanical strength, which allows for the broad use of this material for load-bearing elements in various types of means of transportation, including in the bus, railway, truck and shipyard industries.

Extrusion is a widely applied process for manufacturing long elements with complicated cross-sections. A die is a key tool in the extrusion process, and its design has a strong impact on uniformity of the material flow inside it [2] and on force and extrusion rate parameters.

Collapsible porthole dies are used to produce closed shapes, in which metal streams form during the initial stage by cutting of the ingot on the die's bridges, and these streams are joined in

na mostkach matrycy, powstają strugi metalu, łączące się w kolejnym etapie w komorze zgrzewania [3]. Wytworzony profil nie jest wolny od wad, zaliczyć do nich można różnice w grubości ścianek wyrobu, znaczną chropowatość powierzchni [4] oraz zaokrąglenia przekroju poprzecznego. Głównymi czynnikami wpływającymi na jakość profilu jest rozkład temperatury we wlewkę, budowa matrycy oraz prędkość wypływu materiału z matrycy.

Studium właściwości mechanicznych i analizę mikrostruktury zgrzewów wzdłużnych w wyciskanym stopie 6082 przedstawił w swojej pracy Bakker [5]. Wprowadził koncepcję badania jakości zgrzewu opartą na tzw. wskaźniku integralności połączenia, zależnym od sposobu płynięcia metalu w komorze zgrzewania, poziomu naprężeń ściskających działających w płaszczyźnie połączenia oraz ewolucji mikrostruktury zgrzewanego metalu. Wyniki prac nad optymalizacją procesu wyciskania tego stopu oraz wpływu homogenizacji wlewków przedstawiono w pracy [6]. Wyciskane profile aluminiowe często wytwarzane są w stanie T5, czyli są przesycane na wybiegu prasy, a następnie poddawane sztuczemu starzeniu. Takie połączenie zabiegów umożliwia obniżenie kosztów uzyskania gotowego wyrobu. Przesycanie stopu 6082, zawierającego dużo pierwiastków stopowych (Mg, Si), na wybiegu prasy wymaga wysokiej temperatury wyciskania, która umożliwia rozpuszczenie się w roztworze fazy umacniającej [7]. Istotna jest również szybkość chłodzenia detalu, która znacząco wpływa na właściwości wytrzymałościowe. W celu uzyskania najlepszych właściwości finalnych profilu kluczowe jest odpowiednie przygotowanie wlewkę do procesu poprzez wytworzenie w nim jak najdrobniejszej fazy Mg_2Si [8].

2. MATERIAŁ DO BADAŃ

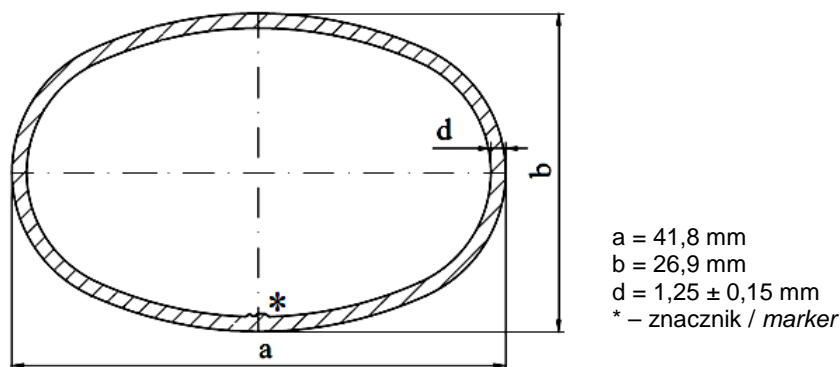
Materiał do badań stanowiły kształtowniki o przekroju poprzecznym przedstawionym na rys. 1. Kształtowniki wykonano ze stopu AW 6082, o składzie chemicznym według PN-EN 573-3: 2010, przedstawionym w tab. 1. Profile wyciskano za pomocą 6-otworowych matryc.

the next stage in the bonding chamber [3]. The manufactured shape is not free from defects, which may include differences in the product's wall thicknesses, significant surface coarseness [4], and rounding of the cross-section. The main factors affecting the quality of a shape are temperature distribution in the ingot, die design, and rate of material flow out of the die.

Bakker [5] presented a study of mechanical properties and microstructure analysis of longitudinal bonds in extruded 6082 alloy. He introduced the concept of bond quality testing based on the so-called bond integrity index, which is dependent on the method of metal flow in the bonding chamber, level of compressive stresses acting in the bonding plane, and the evolution of the bonded metal's microstructure. The results of research on optimization of this alloy's extrusion process and on the impact of ingot homogenization have been presented in paper [6]. The extruded aluminum shapes are often manufactured in T5 state, meaning that they are hyperquenched on the press coasting and then subjected to artificial aging. This combination of treatments makes it possible to reduce the costs of obtaining the final product. Hyperquenching of 6082 alloy, which contains many alloying elements (Mg, Si) on the press coasting requires a high extrusion temperature, which enables dissolution in the solution of the strengthening phase [7]. The rate of cooling of the detail, which has a significant effect on strength properties, is also important. In order to achieve the best final properties of a shape, it is critical to appropriately prepare the ingot for the process by generating the finest possible Mg_2Si phase within it [8].

2. RESEARCH MATERIAL

The research material consisted of shapes with a cross-section presented in fig. 1. Shapes were made from AW6082 alloy, with a chemical composition according to PN-EN 573-3: 2010, as presented in Tab. 1. Shapes were extruded by means of 6-hole dies.



Rys. 1. Kształt i wymiary przekroju badanych profili

Fig. 1. Cross-section shape and dimensions of studied shapes

Tab. 1. Skład chemiczny stopu EN AW 6082 według PN-EN 573-3: 2010

Tab. 1. Chemical composition of EN AW 6082 alloy according to PN-EN 573-3: 2010

Gatunek stopu Alloy grade	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
EN AW 6082	0,7–1,3	0,50	0,10	0,40–1,0	0,6–1,2	0,25	0,2	0,1

Kształtowniki wyciskano, stosując różne parametry procesu oraz różne sposoby chłodzenia na wybiegu prasy. Rozróżniono 4 warianty zastosowanych parametrów technologicznych. W tab. 2 przedstawiono zestawienie parametrów wyciskania profili oraz oznaczenia wariantów.

Shapes were extruded by applying varying process parameters and varying cooling methods on the press run-out table. Four variants of applied process parameters were distinguished. Tab. 2 presents a compilation of shape extrusion parameters and variant designations.

Tab. 2. Zestawienie parametrów wyciskania profili i oznaczenie wariantów

Tab. 2. Compilation of shape extrusion parameters and variant designations

Lp. Item	Oznaczenie wariantu Variant designation	Sposób chłodzenia Cooling method	Prędkość wyciskania Extrusion rate
1.	S10	Natryskiwanie wodne Water spray	10 m/min
2.	S12		12 m/min
3.	W9	Fala wodna Water wave	9 m/min
4.	W12		12 m/min

3. METODYKA BADAŃ

Celem pracy było wyznaczenie właściwości mechanicznych i określenie najbardziej optymalnych parametrów wyciskania, stosując 6 otworową matrycę, jak opisano to w pracy [6]. W tym celu wykonano następujące badania: statyczna próba rozciągania: całych profili, pró-

3. RESEARCH METHODOLOGY

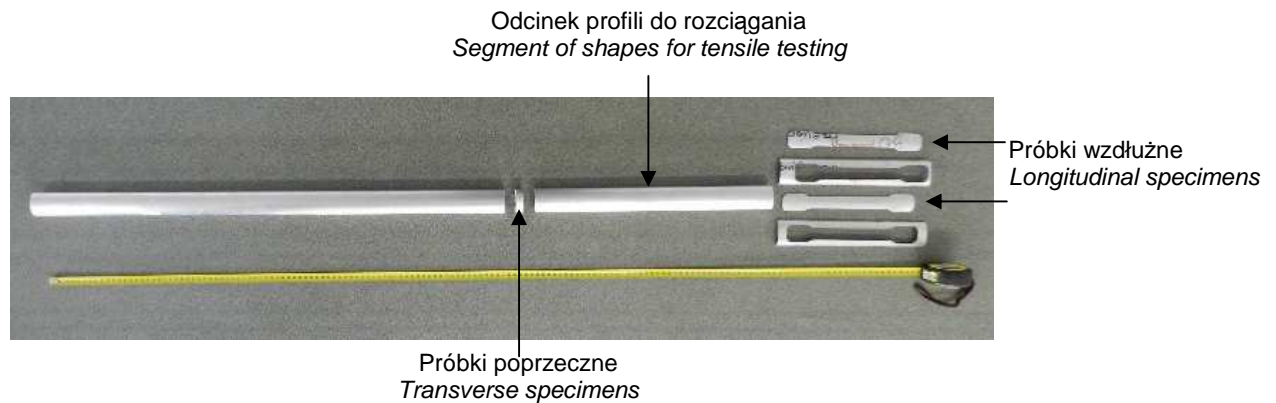
The research objective was to determine the mechanical properties and the most optimal extrusion parameters using a 6-hole die, as described in paper [6]. For this purpose, the following tests were conducted: static tensile test of: entire shapes, specimens cut out in the

bek wyciętych w kierunku wzdłużnym do kierunku wyciskania, próbek wyciętych w kierunku prostopadłym do kierunku wyciskania (rozciąganie pierścieni); pomiar twardości metodą Vickersa (HV 0,5) na przekroju poprzecznym profilu, pomiary grubości ścianek oraz pomiar chropowatości w kierunku poprzecznym do kierunku wyciskania.

Z każdego profilu pobrano 3 rodzaje próbek: całe owalne rury o długości 400–430 mm, próbki wytrzymałościowe, oraz próbki poprzeczne o szerokości około 12 mm – rys. 2.

longitudinal direction relative to the direction of extrusion, specimens cut out in the direction perpendicular to the direction of extrusion (ring tension); Vickers hardness measurement (HV 0.5) on cross-section of shape, measurements of wall thickness and coarseness in the transverse direction relative to the extrusion direction.

Three types of specimens were collected from every shape: entire oval pipes with a length of 400–430 mm, strength specimens, and transverse specimens with a width of approx. 12 mm – Fig. 2.



Rys. 2. Schemat przedstawiający sposób pobierania próbek z profili

Fig. 2. Scheme presenting the method of specimen collection from shapes

3.1. Statyczna próba rozciągania profili

Statyczną próbę rozciągania profili przeprowadzono za pomocą maszyny wytrzymałościowej ZD-30, z prędkością przemieszczenia trawersy równą 12 mm/min stosując ekstensometr o drodze pomiarowa od -5 mm do + 50 mm i nominalnej wartości bazy pomiarowej 50 mm.

3.2. Statyczna próba rozciągania próbek w kierunku wzdłużnym

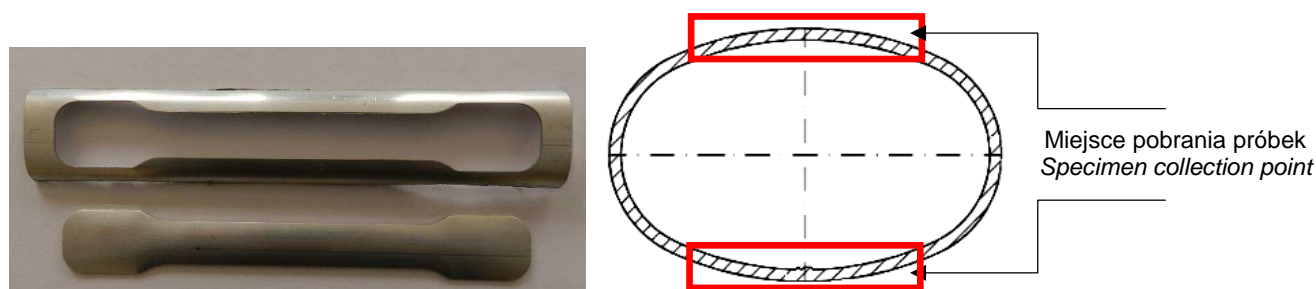
Z profili pobrano odcinki o długości 250 mm, z każdego odcinka wycięto próbki wytrzymałościowe w kierunku wzdłużnym do kierunku wyciskania, z przeciwległych stron profilu (wg schematu zamieszczonego na rys. 3). Próbki wycinano za pomocą wykrojnika zamocowanego na prasie mimośrodowej. Statyczną próbę rozciągania przeprowadzono za pomocą maszyny wytrzymałościowej Instron 4483.

3.1. Static tensile testing of shapes

Static tensile testing of shapes was conducted by means of a ZD-30 strength tester, with a traverse displacement rate of 12 mm/min, using an extensometer with a measuring path from -5 mm to + 50 mm and a nominal measurement base value of 50 mm.

3.2. Static tensile testing of specimens in the longitudinal direction

Segments with a length of 250 mm were collected from shapes, and strength specimens were cut out from every segment in the longitudinal direction relative to the direction of extrusion from opposite sides of the shape (according to the scheme shown in Fig. 3). Specimens were cut out by means of a blanking die mounted on an eccentric press. The static tensile test was conducted by means of an Instron 4483 strength tester.



Rys. 3. Miejsce pobrania próbek i wycięta próbka

Fig. 3. Specimen collection point and cut specimen

3.3. Statyczna próba rozciągania próbki w kierunku poprzecznym

W celu przeprowadzenia badań wytrzymałościowych w kierunku poprzecznym, pobrano z profili eliptyczne pierścienie o szerokości 12 mm. Pobrano po 3 próbki z każdego wariantu wyciskania. Rozciąganie przeprowadzono za pomocą specjalnych uchwytów, za pomocą maszyny wytrzymałościowej Instron 4483. Badanie wykonano z prędkością przemieszczenia trawersy 2,5 mm/min.

3.3. Static tensile testing of specimens in the transverse direction

Elliptic rings with a width of 12 mm were collected from shapes for the purpose of conducting strength tests in the transverse direction. 3 specimens each were collected for every extrusion variant. Tensile testing was conducted by means of special fixtures using an Instron 4483 strength tester. The test was performed with a traverse displacement rate of 2.5 mm/min.

3.4. Pomiary twardości

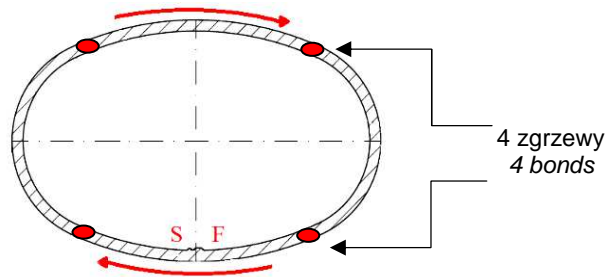
Pomiary twardości Vickersa HV 0,5 wykonano zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 6507-1:2007 *Metale - Pomiar twardości sposobem Vickersa - Część 1: Metoda badań.*

Próbki posiadały taki sam kształt jak próbki zastosowane w próbie rozciągania w kierunku poprzecznym. Pomiary twardości przeprowadzono za pomocą twardościomierza Vickersa FM-800 (FUTURE-TECH) na przygotowanych zglądach metalograficznych. Schemat przedstawiający kierunek badania twardości przedstawia rys. 4.

3.4. Hardness measurements

Vickers HV 0.5 hardness measurements were performed according to the requirements of standard PN-EN ISO 6507-1:2007 Metallic materials -- Vickers hardness test -- Part 1: Test method.

Specimens had the same shape as the specimens used in the transverse tensile test. Hardness measurements were conducted by means of an FM-800 Vickers hardness tester (FUTURE-TECH) on prepared metallographic specimens. Fig. 4 presents a diagram illustrating the direction of hardness testing.



Rys. 4. Schemat kierunku pomiaru twardości HV oraz grubości ścianki na mikroskopie optycznym wraz z zaznaczonym kierunkiem wykonywania pomiarów. S – początek i F – koniec pomiarów twardości/grubości ścianki

Fig. 4. Diagram of the direction of HV hardness testing and wall thickness under optical microscope along with marked direction of measurement performance. S – beginning and F – end of hardness/wall thickness measurements

3.5. Pomiary grubości ścianek

W celu dokładnej weryfikacji wymiarów grubości profili, wykonano pomiary za pomocą mikroskopu optycznego Nikon Eclipse L150. Pomiary realizowano na próbkach, na których wykonano również badania twardości. Na każdej próbce, wykonano 20 pomiarów zgodnie ze schematem zamieszczonym na rys. 4.

3.6. Pomiar chropowatości R_a

Parametr chropowatości R_a wyznaczono na podstawie normy DIN EN ISO 4287. Badania wykonano za pomocą profilometru Hommel Tester T8000 z końcówką pomiarową TKU300. Do pomiaru przyjęto odcinek odwzorowania $L_t=4,8$ mm.

4. WYNIKI BADAŃ

W statycznej próbie rozciągania profili wyznaczono właściwości mechaniczne, których parametry zamieszczono w tab. 3 oraz w formie wykresu na rys. 5.

3.5. Wall thickness measurements

To precisely verify the dimensions of shape thicknesses, measurements were carried out by means of a Nikon Eclipse L150 optical microscope. Measurements were conducted on specimens whose hardness was also tested. 20 measurements were taken on every specimen according to the diagram presented in Fig. 4.

3.6. Measurement of coarseness R_a

The parameter of coarseness, R_a , was determined based on standard DIN EN ISO 4287. Tests were conducted by means of a Hommel Tester T8000 profilometer with TKU300 measuring tip. A representation segment $L_t=4.8$ mm was accepted for measurement.

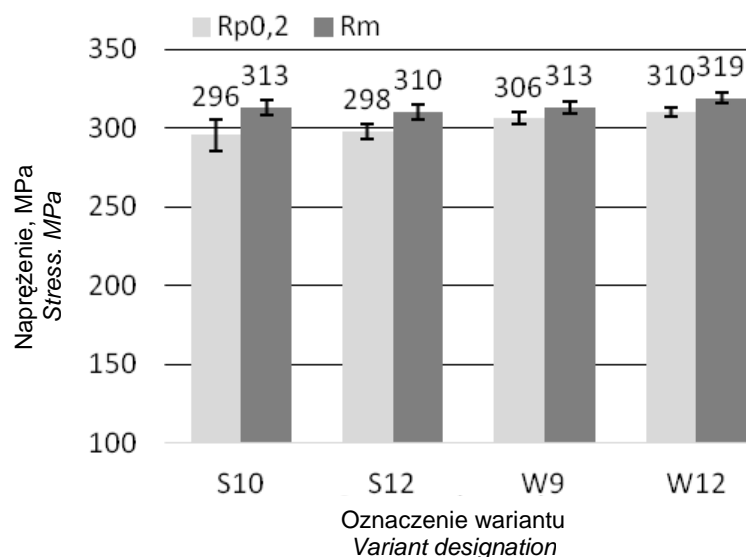
4. RESEARCH RESULTS

Mechanical properties were determined in the static tensile test of shapes, the parameters of which are presented in Tab. 3 and in the form of a graph in Fig. 5.

Tab. 3. Zestawienie średnich wartości parametrów mechanicznych profili

Tab. 3. Compilation of average values of shapes' mechanical parameters

Chłodzenie Cooling	Prędkość wyciskania Extrusion rate	$R_{p0,2}$	R_m	A_{200}
		MPa	MPa	%
Spray Spray	10 m/min	296	313	8,35
	12 m/min	298	310	8,34
Fala wodna Water wave	9 m/min	306	313	5,23
	12 m/min	310	319	8,08



Rys. 5. Zestawienie średnich wartości parametrów wytrzymałościowych profili

Fig. 5. Compilation of average values of shapes' strength parameters

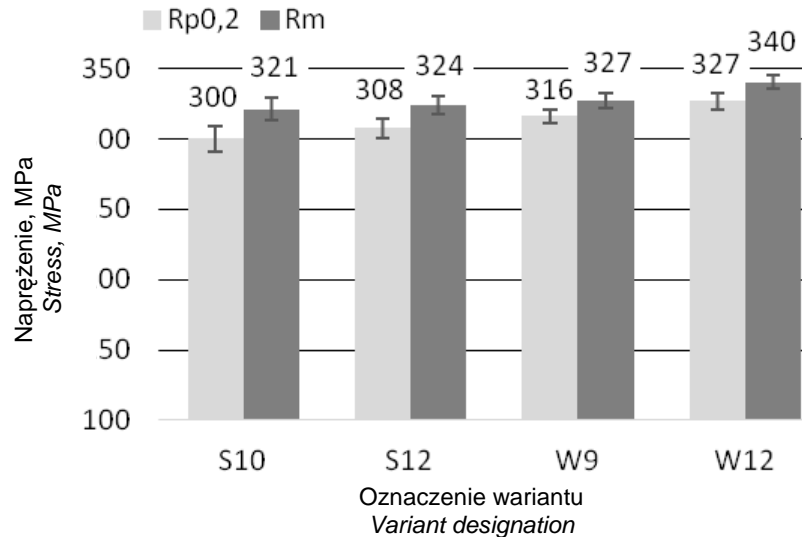
W tab. 4 i na rys. 6 przedstawiono zestawienie właściwości próbek wzdłużnych, wyznaczone w statycznej próbie rozciągania. W statycznej próbie rozciągania próbek wyciętych w kierunku wzdłużnym uzyskano wyższe właściwości. Próbki te nie obejmowały 4 zgrzewów, które znajdują się równomiernie rozłożone na obwodzie owalnego przekroju profilu. W przypadku profili chłodzonych w fali wodnej, potwierdziła się niższa wytrzymałość i plastyczność profili wyciskanych z prędkością 9 m/min niż wyciskanych z prędkością 12 m/min.

Tab. 4 and Fig. 6 present a compilation of the properties of longitudinal specimens determined in the static tensile test. Higher properties were obtained in the static tensile test for specimens cut out in the longitudinal direction. These specimens did not encompass the 4 bonds that are evenly distributed over the circumference of the oval shape cross-section. In the case of shapes cooled by a water wave, lower strength and plasticity of shapes extruded at a rate of 9 m/min was confirmed compared to those extruded at a rate of 12 m/min.

Tab. 4. Zestawienie średnich wartości parametrów mechanicznych próbek wzdłużnych

Tab. 4. Compilation of average values of longitudinal specimens' mechanical parameters

Chłodzenie Cooling	Prędkość wyciskania Extrusion rate	R _{p0,2}	R _m	A ₂₀₀
		MPa	MPa	%
Spray Spray	10 m/min	300	321	8.55
	12 m/min	308	324	8.07
Fala wodna Water wave	9 m/min	316	327	6.77
	12 m/min	327	340	8.80

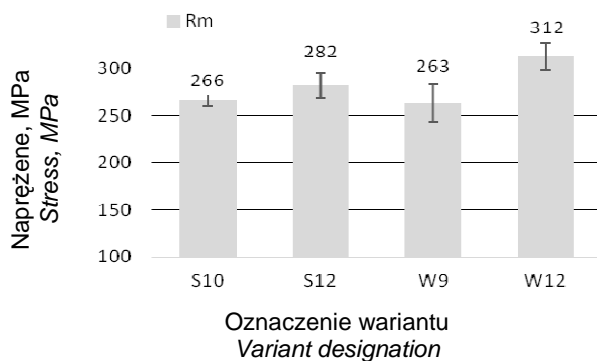


Rys. 6. Zestawienie średnich wartości parametrów wytrzymałościowych próbek wyciętych wzdłużnie

Fig. 6. Compilation of average values of longitudinal specimens' strength parameters

Statyczna próba rozciągania próbki w kierunku poprzecznym wykazała o ok. 10% niższą wytrzymałość na rozciąganie, ale może to być wynikiem specyficznego rozciągania próbek nie ujętego w normach dotyczących metodyki badań. Celem było też sprawdzenie miejsca (zgrzew lub poza nim) pęknięcia próbek. Wszystkie badane próbki pękały w miejscu zgrzewu – rys. 7.

The static tensile test of a specimen in the transverse direction demonstrated lower tensile strength by approx. 10%, however this may be the result of specific specimen tensioning that is not covered in standards concerning test methodology. The objective was to check the location of specimen cracking (on bond or outside of bond). All tested specimens cracked on a bond – Fig. 7.



Rys. 7. Zestawienie maksymalnego naprężenia R_m w próbkach poprzecznych oraz przykładowe pęknięte pierścienie po rozciąganiu

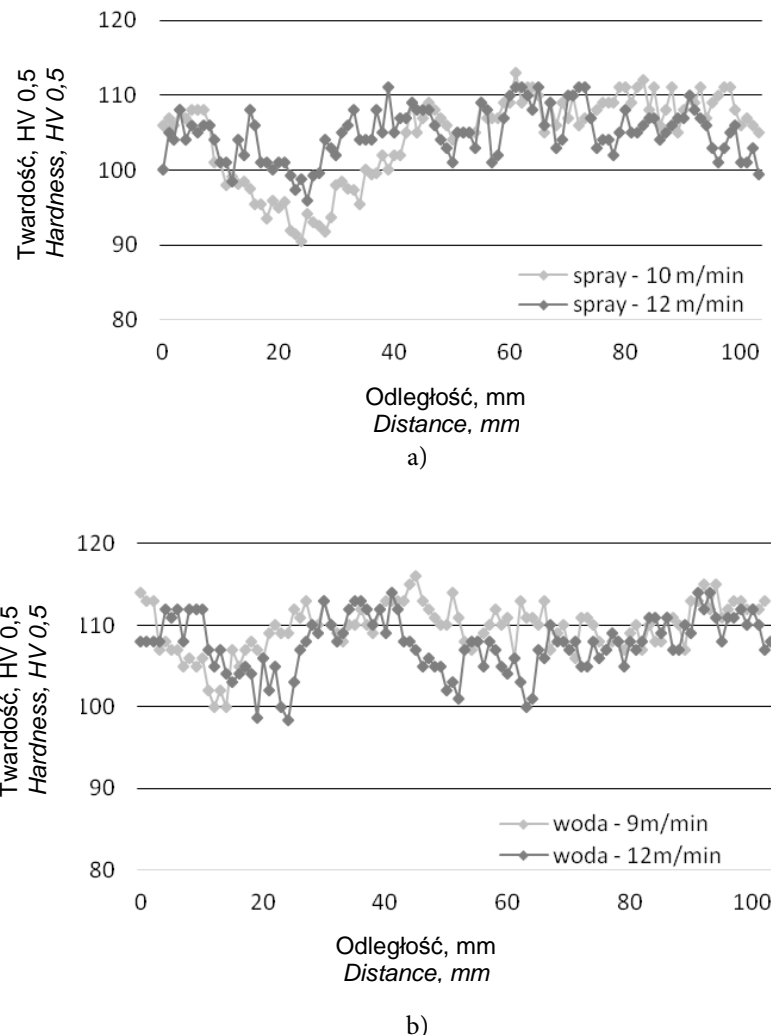
Fig. 7. Compilation of maximum stress R_m in transverse specimens, and examples of cracked rings after tensile testing

Rozkład twardości widoczny na rys. 8, wykonano zgodnie ze schematem na rys. 4. Twardość profili chłodzonych w wodzie mieści się w całym przekroju od 100 do 115 HV, natomiast w profilach chłodzonych pod natryskiem wodnym widoczne jest obniżenie twardości z jednej

The hardness distribution is presented in Fig. 8, and was obtained according to the diagram in Fig. 4. The hardness of shapes cooled in water falls within the range from 100 to 115 HV throughout the entire cross-section, and a reduction in hardness on one side of the shape is

strony profilu i może wynikać to z nierównomiernego chłodzenia. Niższa szybkość chłodzenia uniemożliwiła przesylenie, co wyklucza utwardzenie dyspersyjne w wyniku starzenia.

visible in shapes cooled under water spray, which may be the result of non-uniform cooling. A lower cooling rate made hyperquenching impossible, which rules out dispersion hardening as a result of aging.



Rys. 8. Profile rozkładu twardości HV 0,5 wyznaczone na próbkach zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 4; a) dla próbek chłodzonych w sprayu i wyciskanych z prędkością 10 m/min oraz 12 m/min; b) dla próbek chłodzonych w fali wodnej wyciskanych z prędkością 9 m/min oraz 12 m/min

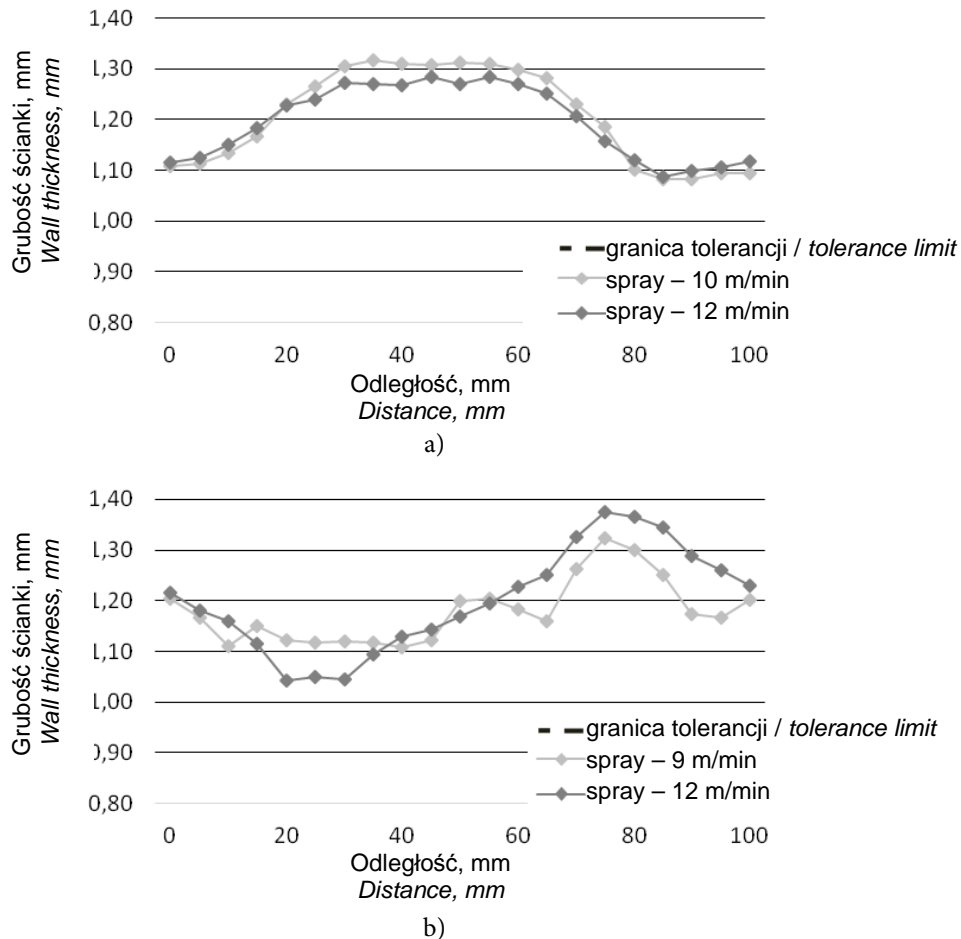
Fig. 8. HV 0.5 hardness distribution profiles determined on specimens according to the diagram shown in Fig. 4; a) for specimens cooled with spray and extruded at rate of 10 m/min and 12 m/min; b) for specimens cooled in water wave and extruded at rate of 9 m/min and 12 m/min

Wyniki pomiaru grubości ścianki zgodnie z schematem umieszczonym na rys. 4, wykonanego za pomocą mikroskopu optycznego, ich wyniki w postaci wykresów wraz z zamieszczonymi granicami tolerancji grubości ścianki profili umieszczono na rys. 9. Różnice w grubości ścianki wynikają ze szczeliny matrycy i paska kalibrującego oraz ugięcia matrycy podczas wyciskania, co powoduje otwarcie lub

The results of wall thickness measurement are according to the diagram presented in Fig. 4, made by means of an optical microscope, and their results are presented in Fig. 9 in the form of graphs along with marked tolerance limits of shape wall thicknesses. Differences in wall thickness result from the die slot and calibration strip as well as from die sagging during extrusion, which causes opening or closing of

zamknięcie się szczeliny z jednej strony. Nie mniej ani szybkość wyciskania ani prędkość chłodzenia nie ma wpływu na grubość ścianki podczas wyciskania profilu o kształcie owalnym.

the slot from one side. Nevertheless, neither extrusion rate nor cooling rate has an effect on wall thickness during extrusion of an oval shape.

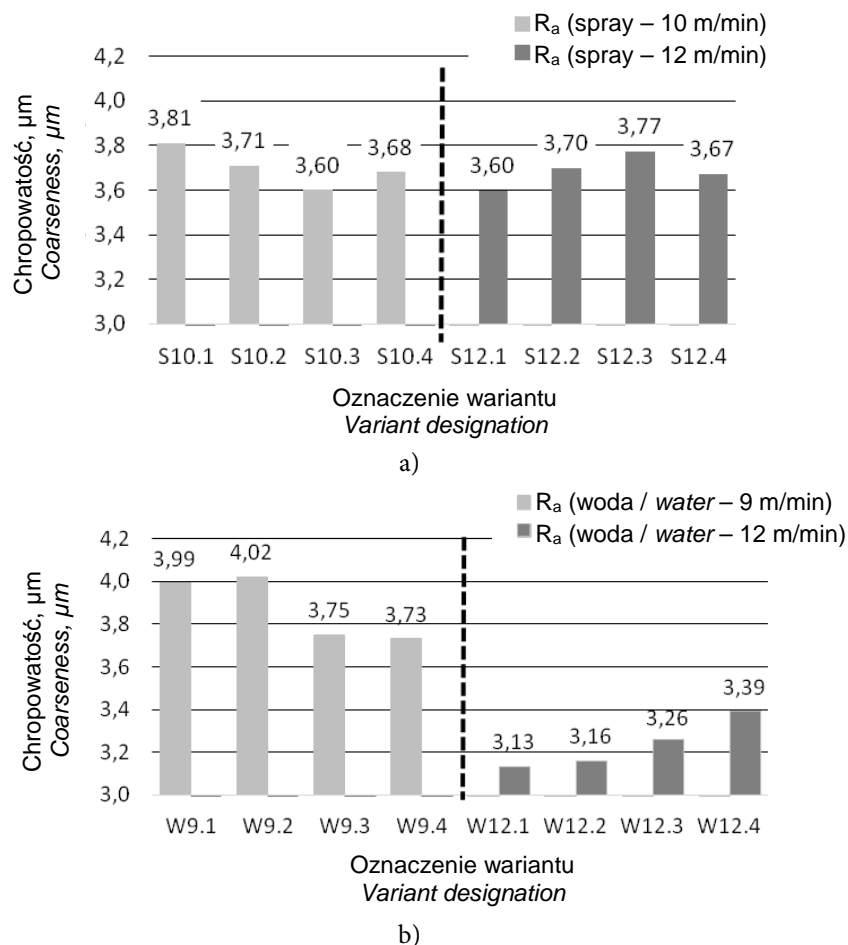


Rys. 9. Profile rozkładu grubości ścianki wyznaczone na próbkach zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 4;
a) dla próbek chłodzonych w sprayu i wyciskanych z prędkością 10 m/min oraz 12 m/min;
b) dla próbek chłodzonych w fali wodnej wyciskanych z prędkością 9 m/min oraz 12 m/min

Fig. 9. Wall thickness distribution profiles determined on specimens according to the diagram shown in Fig. 4;
a) for specimens cooled with spray and extruded at rate of 10 m/min and 12 m/min;
b) for specimens cooled in water wave and extruded at rate of 9 m/min and 12 m/min

Prędkość wyciskania wpływa również na jakość powierzchni profilu. Jakość powierzchni wyrażona poprzez parametr chropowatości R_a jest najgorsza przy wyciskaniu 9 m/min. Wzrost prędkości wyciskania do 10 lub 12 mm/min spowodował obniżenie parametru chropowatości R_a – rys. 10.

The extrusion rate also has an effect on the shape's surface quality. Surface quality, expressed by the parameter of coarseness, R_a , is worst for extrusion at a rate of 9 m/min. An increase of the extrusion rate to 10 or 12 mm/min caused reduction of coarseness parameter R_a – Fig. 10.



Rys. 10. Chropowatość R_a wyznaczona na wyciśniętych profilach:
 a) dla próbek chłodzonych w sprayu i wyciskanych z prędkością 10 m/min oraz 12 m/min;
 b) dla próbek chłodzonych w fali wodnej wyciskanych z prędkością 9 m/min oraz 12 m/min

Fig. 10. Coarseness R_a determined on extruded shapes:
 a) for specimens cooled with spray and extruded at rate of 10 m/min and 12 m/min;
 b) for specimens cooled in water wave and extruded at rate of 9 m/min and 12 m/min

5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań profili wyciskanych przez 6 otworową matrycę można stwierdzić, że:

1. metodą wyciskania na gorąco można otrzymać cienkościennie profile o kształcie owalnym ze stopu AW6082 a – stosując obróbkę cieplną T5 – uzyskać wytrzymałość na rozciąganie R_m nawet powyżej 320 MPa.
2. Parametry wytrzymałości na rozciąganie $R_{p0,2}$ i R_m wyznaczone na próbkach wyciętych wzdłuż kierunku wyciskania są o ok. 10 % wyższe niż wyznaczone przy rozciąganiu odcinka kształtownika, który uwzględnia udział 4 zgrzewów.

5. CONCLUSIONS

Based on conducted tests of shapes extruded through a 6-hole die, it can be stated that:

1. The hot extrusion method can be used to obtain thin-walled oval shapes from AW6082 alloy, and by applying T5 heat treatment, a tensile strength R_m of more than 320 MPa can be achieved.
2. Tensile strength parameters $R_{p0,2}$ and R_m , determined on specimens cut out along with direction of extrusion are approx. 10% greater than the same parameters determined during tension of a shape segment that accounts for the presence of 4 bonds.

3. Kształtowniki wyciśnięte z prędkością 9 m/min i chłodzone w wodzie osiągają mniejsze wydłużenie i wytrzymałość niż profile wyciskane z prędkością 10 i 12 m/min.
 4. Najwyższe parametry wytrzymałościowe uzyskano w kształtownikach wyciskanych z prędkością 12 m/min, które następnie chłodzono w fali wodnej i starzono w temperaturze 180°C przez 2 godziny.
 5. Prędkość wyciskania wpływa również na jakość powierzchni profilu: wzrost prędkości wyciskania do 10 lub 12 mm/min obniża chropowatość R_a .
3. Shapes extruded at a rate of 9 m/min and cooled with water reach a lower elongation and strength than shapes extruded at a rate of 10 and 12 m/min.
 4. The greatest strength parameters were obtained in shapes extruded at a rate of 12 m/min, which were then cooled in a water wave and aged at a temperature of 180°C for 2 hours.
 5. Extrusion rate also affects the shape's surface quality: an increase of extrusion rate to 10 or 12 mm/min reduces coarseness R_a .

PODZIĘKOWANIA

Przedstawione w pracy badania zostały sfinansowane ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, w ramach Projektu Nr PBS2/B5/26/2013 pod tytułem "Nowe rozwiązania materiałowe i technologiczne procesu wytwarzania wysokowytrzymałych cienkościennych kształtowników zamkniętych ze stopów aluminium".

LITERATURA

- [1] Mrówka-Nowotnik G., Sieniawski J. 2005. „Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminium alloys”. *Journal of Materials Processing Technology* 162-163: 367–372.
- [2] Borowski J., Wendland J., Laurentowska A., Jurczak H. 2013. „Struktura przypowierzchniowa matryc do wyciskania profili aluminiowych”. *Obróbka Plastyczna Metali XXIV* (1): 5–14.
- [3] Liang Ch., Guoqun Z., Junquan Y., Wendong Z., Tao W. 2014. „Analysys and porthole die design for multi-hole extrusion process of a hollow thin-walled aluminium profile”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 74: 383–392.
- [4] Romański P., Burdek M., Ciepela W., Suliga M., Pilarczyk J.W. 2013. „Wpływ prędkości wyciskania na wybrane parametry chropowatości powierzchni wyciskanych profili ze stopu aluminium AlMgSi0,5”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 1: 89–100.
- [5] Bakker A.J., W. H. Sillekens, E. Meijers. 2007. „Experimental study of longitudinal weld seams in hollow EN-AW 6060 and EN-AW 6082 aluminium alloys extrusions”. In Proc. 6th World Congress and Exhibition Aluminium'2000.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research presented in this paper has been financed with funds from the National Centre for Research and Development within the framework of Project No. PBS2/B5/26/2013 titled "New materials and technological solutions for the process of manufacturing high-strength closed thin-walled shapes from aluminum alloys".

REFERENCES

- [1] Mrówka-Nowotnik G., Sieniawski J. 2005. „Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminium alloys”. *Journal of Materials Processing Technology* 162-163: 367–372.
- [2] Borowski J., Wendland J., Laurentowska A., Jurczak H. 2013. „Struktura przypowierzchniowa matryc do wyciskania profili aluminiowych”. *Obróbka Plastyczna Metali XXIV* (1): 5–14.
- [3] Liang Ch., Guoqun Z., Junquan Y., Wendong Z., Tao W. 2014. „Analysys and porthole die design for multi-hole extrusion process of a hollow thin-walled aluminium profile”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 74: 383–392.
- [4] Romański P., Burdek M., Ciepela W., Suliga M., Pilarczyk J.W. 2013. „Wpływ prędkości wyciskania na wybrane parametry chropowatości powierzchni wyciskanych profili ze stopu aluminium AlMgSi0,5”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 1: 89–100.
- [5] Bakker A.J., W. H. Sillekens, E. Meijers. 2007. „Experimental study of longitudinal weld seams in hollow EN-AW 6060 and EN-AW 6082 aluminium alloys extrusions”. In Proc. 6th World Congress and Exhibition Aluminium'2000.

- [6] Leśniak D., Wojtyna A., Leszczyńska-Madej B., Libura W., Zasadziński J., Rękas A., Borowski J., Jurczak H. 2015. „Wyciskanie cienkościennych kształtowników ze stopu 6082 w stanie T5 przez matryce mostkowo-komorowe”. *Rudy i Metale Nieżelazne* 60 (10): 521–530.
- [7] Zhang Hui, Li Luoxing, Yuan Deng, Peng Dashu. 2007. „Hot deformation behavior of the new Al-Mg-Si-Cu aluminum alloy during compression at elevated temperatures”. *Materials Characterization* 58: 168–173.
- [8] Woźnicki A., Richert J. 2004. „Optymalna szybkość chłodzenia po homogenizacji wlewków AlMgSi przeznaczonych do wyciskania w stanie T5”. *Rudy i metale nieżelazne* 49(5): 242–246.
- [6] Leśniak D., Wojtyna A., Leszczyńska-Madej B., Libura W., Zasadziński J., Rękas A., Borowski J., Jurczak H. 2015. „Wyciskanie cienkościennych kształtowników ze stopu 6082 w stanie T5 przez matryce mostkowo-komorowe”. *Rudy i Metale Nieżelazne* 60 (10): 521–530.
- [7] Zhang Hui, Li Luoxing, Yuan Deng, Peng Dashu. 2007. „Hot deformation behavior of the new Al-Mg-Si-Cu aluminum alloy during compression at elevated temperatures”. *Materials Characterization* 58: 168–173.
- [8] Woźnicki A., Richert J. 2004. „Optymalna szybkość chłodzenia po homogenizacji wlewków AlMgSi przeznaczonych do wyciskania w stanie T5”. *Rudy i metale nieżelazne* 49(5): 242–246.