



Próby technologiczne gięcia wyciskanych rur ze stopu aluminium AW-6082

Technological bending trials of tubes extruded from AW-6082 aluminum alloy

(1) Jacek Borowski¹, (2) Daniel Andrzejewski*¹, (3) Grzegorz Płaczek¹, (4) Henryk Jurczak²,
(5) Dariusz Leśniak³

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

Zgłoszenie: 13.02.2018

Recenzja: 19.02.2018

Akceptacja: 30.03.2018

Wkład autorów

- (1) Koncepcja i plan badań, analiza norm przedmiotowych, opracowanie i analiza wyników badań
- (2) Próba zginania, próba wyboczenia, technologiczna próba gięcia, opracowanie wyników badań
- (3) Próba zginania, próba rozciągania, technologiczna próba gięcia, opracowanie wyników badań
- (4) Proces wyciskania, wykonanie różnych wariantów chłodzenia profilu, analiza wyników badań
- (5) Koncepcja i konsultacje procesu wyciskania, analiza wyników badań wyciskania

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań wyciskanych cienkościennych (grubość ścianki ok. 1,2 mm) kształtowników zamkniętych ze stopu AW-6082. Kształtowniki wyciskano metodą wyciskania zgrzewającego, za pomocą 6-otworowych matryc. Badaniom poddano profile chłodzone na wybiegu prasy w trojaki sposób: natryskiwanie wodą, chłodzenie wodą, czyli tzw. „fala wodna”, oraz nadmuchem powietrza. Opracowano metodykę badań pozwalającą dokonać oceny zdolności wyciskanych kształtowników do plastycznego kształtowania głównie poprzez gięcie i rozpęczanie. Stop AW-6082 jest stopem trudniejszym do wyciskania od stopów typu 6063 czy 6060, ponieważ wyższa wytrzymałość i mniejsza plastyczność utrudnia uzyskiwanie ścianek o małej grubości jak i dużej prędkości wyciskania. Jak wykazały wcześniejsze badania, profile takie osiągają bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe sięgające $R_m = 340$ MPa, ale charakteryzują się ograniczoną zdolnością do odkształceń plastycznych. W pracy przedstawiono wyniki próby zginania, wyboczenia, rozpęczania oraz gięcia na maszynie trójrolkowej. Stwierdzono, że maksymalna siła ściskająca wyznaczona w próbie wyboczenia odcinka o długości 650 mm, która wskazuje największą wytrzymałość na wyboczenie, odnosi się do profili chłodzonych na wybiegu prasy po wyciskaniu za pomocą tzw. „fali wodnej”. Te profile charakteryzowały się również największą strzałką ugięcia w próbie trójpunktowego zginania. Zwiększona plastyczność i zdolność do odkształceń plastycznych tych profili została potwierdzona w próbie rozciągania stożkiem, gdzie wartości względnego odkształcenia były o 35% większe niż w przypadku profili chłodzonych za pomocą nadmuchu powietrza czy natrysku wodnego. W wyniku badań metalograficznych stwierdzono, że inicjacja pęknięć w próbie rozciągania następuje w miejscach zgrzewów profili i w tych obszarach zauważono zwiększoną wielkość ziarna.

Słowa kluczowe: stop aluminium AW-6082, profile wyciskane, próba zginania, próba rozpęczania

Article info

Received: 13.02.2018

Reviewed: 19.02.2018

Accepted: 30.03.2018

Abstract

This paper presents the results of tests conducted on extruded, thin-walled (wall thickness approx. 1.2 mm) closed shapes made of AW-6082 alloy. Shapes were extruded using the bonding extrusion method, by means of 6-hole dies. Sections cooled in three ways at the exit from the press were tested: water spraying, water cooling with a so-called “water wave” and air blowing. A methodology of testing was developed, allowing for assessment of the plastic formability of extruded shapes, mainly through bending and

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

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

Authors' contribution

- (1) The concept and plan of research, the analysis of subject standards, the development and analysis of research results
- (2) Bending, buckling and technological bending tests, development of research results
- (3) Bending, expanding and technological bending tests, development of research results
- (4) Extrusion test, shape's cooling test, analysis of the results
- (5) Concept, condultation of the extrusion test, analysis of the extrusion results

expanding. AW-6082 alloy is more difficult to extrude than 6063 or 6060 alloys, since its higher strength and lower plasticity make it difficult to obtain walls of low thickness and high extrusion rate. As demonstrated in previous studies, such shapes achieve very good strength properties, reaching up to $R_m = 340$ MPa, but they are characterized by limited plastic formability. This paper presents the results of bending, buckling, expanding and flexion tests on a three-roll machine. It was determined that the maximum compressive force determined in the buckling test of a segment 650 mm in length, indicating the greatest resistance to buckling, corresponds to shapes cooled by means of a so-called "water wave" on the coasting of the press. These shapes were also characterized by the greatest deflection in the three-point bending test. The elevated plasticity and plastic formability of these shapes was confirmed in a cone expansion test, where relative deformation values were 35% greater than in the case of shapes cooled by air blowing or water spraying. Metallographic examinations revealed that crack initiation in the expansion test occurs at welds in shapes, and enlarged grain size was observed in these areas.

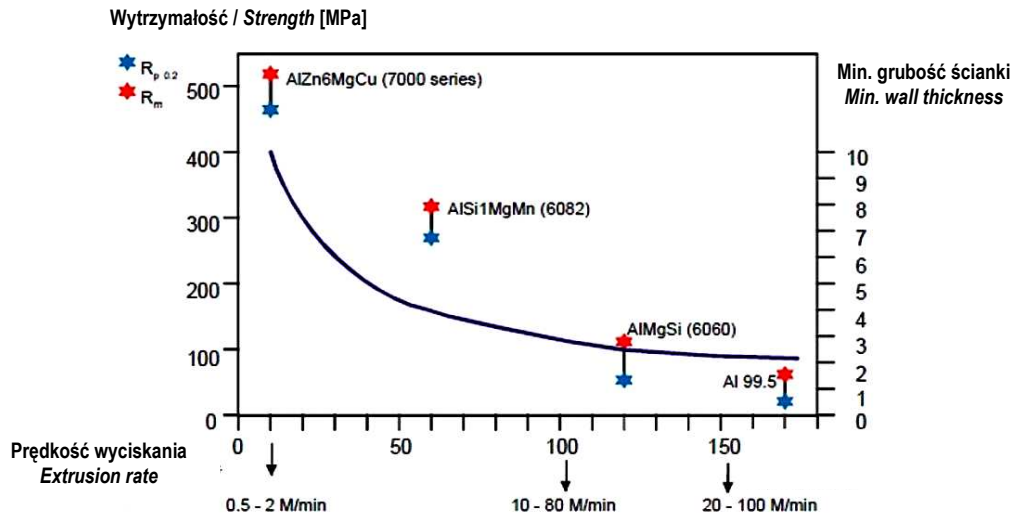
Keywords: AW-6082 aluminum alloy, extruded shapes, bending test, expanding test

1. WPROWADZENIE

Stopy aluminium serii 6xxx zawierają jako główny składnik stopowy, oprócz Mg i Si, dodatek Mn, dzięki czemu cechują się dobrą odpornością na korozję, wytrzymałością, udurowianiem oraz średnią wytrzymałością zmęczeniową. Właściwości te sprawiają, że stopy aluminium serii 6xxx są niekiedy bardziej przydatne niż stopy 7xxx. Stop aluminium AW-6082 jest relatywnie nowym stopem, stosowany jako materiał konstrukcyjny ze względu na bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe, skrawalność, łatwą obróbkę plastyczną, a także spawalność. W przemyśle stop AW-6082 znalazł szerokie zastosowanie w budowie samochodów ciężarowych, autobusów, naczep, a dzięki dobrej odporności na korozję z powodzeniem stosowany jest w przemyśle stoczniowym. Zawartość Mg poprawia odporność korozyjną, zwłaszcza w środowisku wody morskiej. Ze względu na dobrą plastyczność stopy te można wyciskać z większymi prędkościami wyciskania niż stopy 5xxx [1]. Jest jednak trudniejszym do wyciskania od stopów typu 6063 czy 6060, ponieważ wyższa wytrzymałość oraz mniejsza plastyczność utrudnia otrzymanie ścianek o małej grubości zwłaszcza przy dużej prędkości wyciskania (rys. 1).

1. INTRODUCTION

6xxx-series aluminum alloys contain Mn as a main alloying agent besides Mg and Si, thanks to which they are characterized by good corrosion resistance, strength, impact resistance and moderate fatigue strength. These properties sometimes make 6xxx-series aluminum alloys more suitable than 7xxx-series alloys. AW-6082 aluminum alloy is a relatively new alloy used as a structural material due to its excellent strength properties, machinability, good plastic formability as well as weldability. In industry, AW-6082 alloy has found broad applications in the construction of trucks, buses, trailers, and thanks to its good corrosion resistance, it is successfully applied in the shipbuilding industry. Mg content improves corrosion resistance, particularly in a seawater environment. Due to their good plasticity, these alloys can be extruded at higher extrusion rates than 5xxx alloys [1]. However, this alloy is more difficult to extrude than 6063 or 6060 alloys, since its higher strength and lower plasticity make it difficult to obtain walls of low thickness, particularly at high extrusion rates (Fig. 1).



Rys. 1. Zależność wytrzymałości na rozciąganie i grubości ścianki profili od prędkości wyciskania dla stopów aluminium

Fig. 1. Functions of tensile strength and shape wall thickness with respect to extrusion rate for aluminum alloys

Jedną z najbardziej popularnych metod kształtowania wyrobów ze stopów aluminium jest wyciskanie na gorąco profili. Przed przystąpieniem do wyciskania wsad jest zwykle nagrzewany do temperatury około 500°C. Następnie, w wyniku tarcia wewnętrznego, stop podgrzewany jest w obszarze kalibrującym do temperatury od 550 do 620°C [2, 3]. Wsad wyciskane są na prasach poziomych o nacisku od 4 do 100 MN. Profile wyciskane współbieżnie zazwyczaj są półwyrobami, z których na dalszych etapach procesu wytwarzania nadaje się im ostateczny kształt. Przy produkcji profili aluminiowych stosuje się składane matryce mostkowo-komorowe. Podczas pierwszego etapu poprzez przecięcie wlewka na mostkach matrycy tworzą się strugi metalu, które łączą się w kolejnym etapie w komorze zgrzewania [4]. Tak powstały profil posiada różnice w grubości ścianek, zaokrąglenia przekroju poprzecznego, a także dużą chropowatość powierzchni [5].

Na jakość wyrobu wpływa głównie rozkład temperatury we wlewku, prędkość wypływu materiału z matrycy oraz budowa samej matrycy. Przesycanie stopu AW-6082, który zawiera szeregi pierwiastków stopowych (Mg, Mn, Si) wymaga wysokiej temperatury wyciskania, która zapewnia całkowite rozpuszczenie się w roztworze fazy umacniającej oraz określonej szybkości chłodzenia, ponieważ ma to kluczowy wpływ na właściwości mechaniczne i zdolność do kształtowania bez pojawiania się pęknięć. Prze-

One of the most popular methods of forming products made from aluminum alloys is hot extrusion of shapes. Before the start of extrusion, the stock is usually heated to a temperature of approx. 500°C. Next, as a result of internal friction, the alloy is heated within the calibration area to a temperature from 550 to 620°C [2, 3]. Billets are extruded on horizontal presses with pressing force ranging from 4 to 100 MN. Directly extruded shapes are typically semi-products and given their final shape in further stages of the manufacturing process. Composite porthole dies are used to manufacture aluminum shapes. In the first stage, metal streams are formed by cutting the billet on the die's bridges, and these streams are joined in the bonding chamber in the next stage [4]. The shape formed in this manner has differences in wall thickness, rounding of the cross-section, as well as high surface roughness [5].

The product's quality is mainly affected by the temperature distribution in the billet, the rate of the material's flow out of the die, and the design of the die itself. Supersaturation of AW-6082 alloy, which contains a series of alloying agents (Mg, Mn, Si), requires high extrusion temperature, ensuring total dissolution of the hardening phase in the solution, and a specific cooling rate, since this has a critical impact on mechanical properties and formability without crack formation. Supersaturation on the coasting of the

sycanie na wybiegu prasy, a następnie sztuczne starzenie materiału, pozwala znacznie obniżyć koszty wytwarzania, dlatego najczęściej spotykanym wyrobem są profile aluminiowe wyciskane w stanie T5.

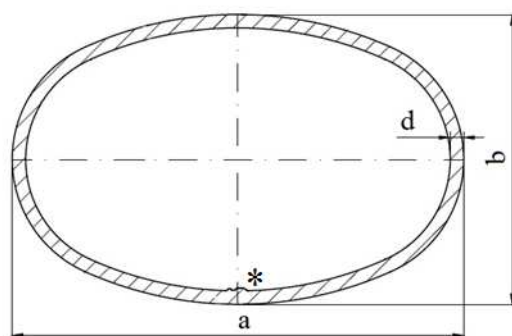
2. MATERIAŁ DO BADAŃ

Materiał do badań stanowiły wyciśnięte kształtowniki o przekroju poprzecznym przedstawionym na rys. 2. Kształtowniki wykonano ze stopu AW-6082, o składzie chemicznym według PN-EN 573-3: 2010 przedstawionym w tab. 1. Profile wyciskano za pomocą 6-otworowej matrycy. Kształtowniki wyciskano, stosując różne warianty chłodzenia na wybiegu prasy: 1. natryskiwanie wodne, 2. „fala wodna”, 3. nadmuch powietrzem.

press followed by artificial aging of the material makes it possible to significantly reduce manufacturing costs, thus aluminum shapes extruded in T5 condition are the most commonly encountered product.

2. RESEARCH MATERIAL

The research material consisted of extruded shapes with a cross-section presented in Fig. 2. Shapes were made from AW-6082 alloy, with a chemical composition according to PN-EN 573-3: 2010, as presented in Tab. 1. Shapes were extruded by means of a 6-hole die. Shapes were extruded using different cooling variants upon exiting the press: 1. water spraying, 2. “water wave”, 3. air blowing.



Rys. 2. Kształt i wymiary przekroju badanych profili ($a = 41,8$ mm; $b = 26,9$ mm; $d = 1,25 \pm 0,15$ mm, * – znacznik)

Fig. 2. Form and cross-section dimensions of the tested shapes ($a = 41.8$ mm; $b = 26.9$ mm; $d = 1.25 \pm 0.15$ mm, * – marker)

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

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

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

3. METODYKA BADAŃ

Celem pracy było wyznaczenie właściwości technologicznych i możliwości kształtowania wyciskanych profili ze stopu aluminium AW-6082 i określenie wpływu sposobu chłodzenia na te

3. RESEARCH METHODOLOGY

The goal of the work was to determine the technological properties and forming capabilities of shapes extruded from AW-6082 aluminum alloy and to determine the influence of the cooling

właściwości. W tym celu wykonano próbę 3-punktowego zginania, próbę wyboczenia ściskanego kształtownika, próbę rozciągania oraz próbę gięcia na giętarce trójrolkowej.

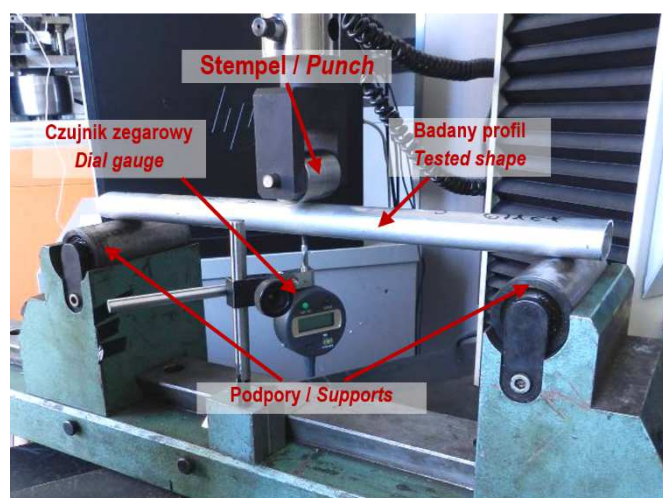
3.1. Próba zginania

Statyczną próbę zginania przeprowadzono za pomocą urządzenia do 3-punktowego zginania z dwoma podporami (rozstaw 400 mm) i trzpieniem o średnicy 40 mm (rys. 3). Z cienkościennych kształtowników pobrano po 3 fragmenty rur o długości 500 mm z każdego wariantu. Następnie układano je na podporach przyrządu do zginania. Próbkę zginano do zadanej siły, odczytując wartość strzałki ugięcia za pomocą czujnika zegarowego. Następnie odciążano próbkę i w przypadku, gdy nie zaobserwowano trwałych odkształceń (czujnik zegarowy wskazywał wartość strzałki ugięcia równą 0), zwiększano siłę przy kolejnym obciążeniu. Badania prowadzono do pojawienia się pierwszych wyraźnych oznak odkształceń plastycznych.

method on these properties. For this purpose, a 3-point bending test, buckling test on a compressed shape, expanding test and flexion test on a three-roll bending machine were performed.

3.1. Bending test

The static bending test was performed by means of a 3-point bending machine with two supports (spacing 400 mm) and mandrel 40 mm in diameter (Fig. 3). 3 pipe fragments 500 mm in length from every variant were collected from every thin-walled shape. Next, they were arranged on the supports of the bending machine. Specimens were bent up to the set force, and the deflection value was read by a dial gauge. Next, the specimen was unloaded, and if no permanent deformations were observed (dial gauge indicated a deflection value equal to 0), the force was increased in the next loading. Tests were performed until the first clear signs of plastic deformation appeared.



Rys. 3. Stanowisko badawcze do próby zginania rur o przekroju eliptycznym
Fig. 3. Testing station for bending tests of pipes with an elliptical cross-section

3.2. Próba wyboczenia

Odcinki rur eliptycznych o długości 650 mm z każdego wariantu mocowano na maszynie wytrzymałościowej pomiędzy kowadłem dolnym, a stemplem maszyny wytrzymałościowej Instron 4483. Prędkość ruchu trawersy wynosiła 5 mm/min. Badanie prowadzono do momentu wyraźnego wyboczenia próbki i spadku

3.2. Buckling test

Segments of elliptical pipes 650 mm in length, from each variant, were fastened between the bottom anvil and punch of an Instron 4483 strength tester. The speed of the cross-beam was 5 mm/min. The test was performed until clear buckling of the specimen occurred and force drop-

siły. Rejestrowano zależność siły od przemieszczenia oraz wyznaczono maksymalną siłę powodującą wyboczenie.

3.3. Próba rozciągania

Próbie rozciągania wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 8493:2005 *Metale – Rury – Próba rozciągania*. Ponieważ norma dotyczy rur o przekroju okrągłym, a testowane kształtowniki miały kształt elipsy, wykonano stożkowy trzpień o kącie 15° i podstawie elipsy ze stali 40HM po ulepszeniu cieplnym. W celu przeprowadzenia badania, pobrano po 3 próbki o długości około 100 mm z każdego wariantu. Próbie przeprowadzono w temperaturze pokojowej z prędkością ruchu trawersy 5 mm/min, za pomocą maszyny wytrzymałościowej Instron 4483 (rys. 4). Przed próbami smarowano trzpień olejem maszynowym. Próbie rozciągania realizowano do momentu pęknięcia profilu i wyraźnego spadku siły. Przed próbą mierzono szerokość zewnętrzną próbki od znacznika do drugiej strony profilu. W tym samym miejscu mierzono próbkę po badaniu, celem wyznaczenia procentowego rozciągania profilu w momencie pęknięcia.

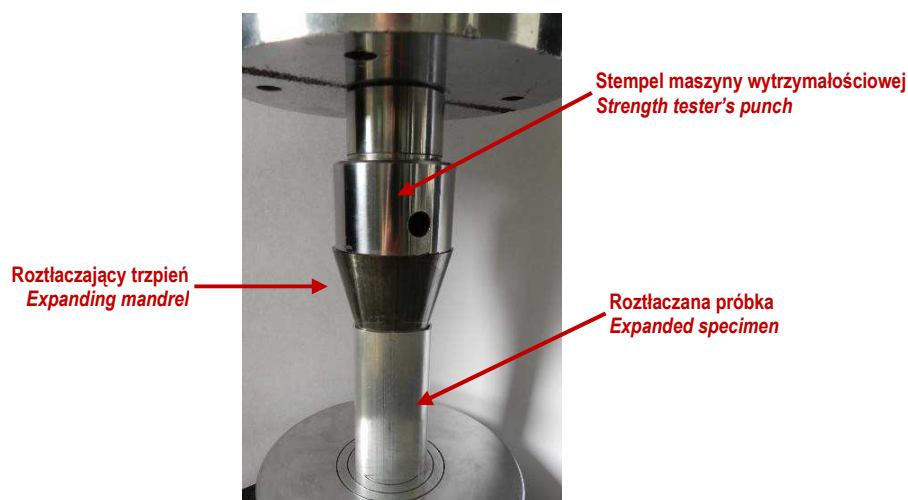
W celu zlokalizowania zgrzewów powstających w komorze zgrzewającej podczas wyciskania przez matryce komorowe wykonano zglądy, które trawiono odczynnikami Poultona (6 części HF, 12 części HCl, 1 część H_2O). Na przekroju poprzecznym zgrzewy ujawniły się jako miejsca o zwiększonej wielkości ziarna.

ped. Force as a function of displacement was registered, and the maximum buckling force was determined.

3.3. Expanding test

The expanding test was performed according to standard PN-EN ISO 8493:2005 Metals – Pipes – Drift – Expanding test. Since the standard pertains to pipes with a round cross-section while the tested shapes were elliptical, a conical mandrel with an angle of 15° and elliptical directrix made of heat-treated 40HM steel was made. In order to perform the test, 3 specimens approx. 100 mm in length were collected from each variant. The test was performed at room temperature with a cross-beam speed of 5 mm/min, by means of an Instron 4483 strength tester (Fig. 4). The mandrel was lubricated with machine oil prior to tests. The expanding test was performed until the shape cracked and a clear drop in force occurred. The specimen's exterior width, from the marker to the other side of the shape, was measured before the test. The specimen was measured at the same point after the test in order to determine the percentage of the shape's expansion at the time of cracking.

In order to locate welds forming in the bonding chamber during extrusion through porthole dies, metallographic specimens etched with Poulton's reagent (6 parts HF, 12 parts HCl, 1 part H_2O) were prepared. Welds were revealed as sites with enlarged grain size on the cross-section.



Rys. 4. Stanowisko badawcze do rozciągania odcinków rur o długości 100 mm

Fig. 4. Testing station for expanding pipe segments with a length of 100 mm

3.4. Technologiczna próba gięcia za pomocą maszyny trójrolkowej

Próbie gięcia przeprowadzono w celu określenia podatności kształtowników do odkształceń plastycznych pod wpływem zginania bez naruszenia ich spójności. Gięcie prowadzono przy użyciu giętarki HRBM50HV za pomocą walców wraz ze specjalnie zaprojektowanymi rolkami z teflonu. Proces gięcia przeprowadzono dla dwóch wariantów obróbki cieplnej: chłodzenie za pomocą natryskiwania wodnego oraz nadmuchem powietrza. Każda próbka była wstępnie obciążana i obracana od jednego końca rury do drugiego po rolkach. Następnie rolka środkowa obniżana była co 2 mm. Wynik próby gięcia do promienia 200 mm uznano za pozytywny, jeśli za pomocą nieuzbrojonego oka nie zauważono pęknięć.

4. WYNIKI BADAŃ

4.1. Próba zginania

Wyniki badań w postaci zależności obciążenia zginającego od wartości strzałki ugięcia pokazano na rys. 5. Wartość strzałki ugięcia profili przy obciążeniu 1 kN w zakresie odkształceń sprężystych (odcinek prostoliniowy) wskazuje, że bardziej odpornymi na zginanie są profile chłodzone nadmuchem powietrzna (1,86 mm) i natryskiem wody (1,88 mm) w porównaniu z profilem wyciskany do „fali wodnej” (2,03 mm).

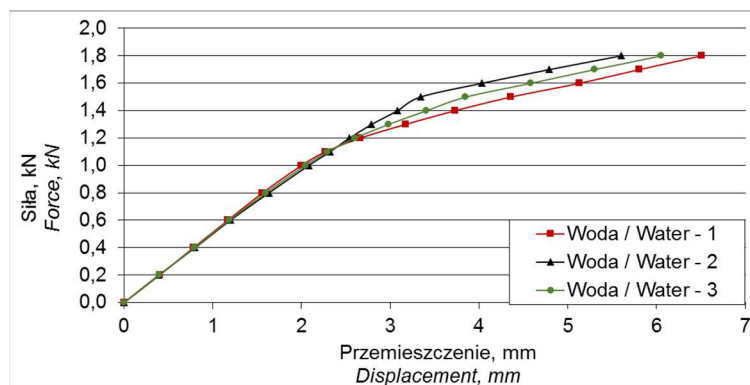
3.4. Technological bending test on three-roll machine

The bending test was performed in order to determine shapes' plastic formability under the influence of bending without loss of cohesion. Bending was performed using an HRBM50HV bending machine with the help of rolls, including specially designed teflon rolls. The bending process was performed for two heat treatment variants: cooling by means of water spraying and air blowing. Each specimen was pre-loaded and rotated from one end of the pipe to the other on rolls. Next, the middle roller was lowered every 2 mm. The results of the bending test up to a radius of 200 mm were acknowledged to be positive if the unaided eye did not observe cracks.

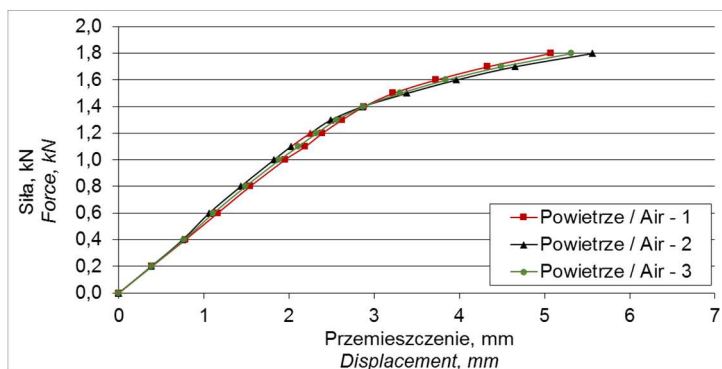
4. TEST RESULTS

4.1. Bending test

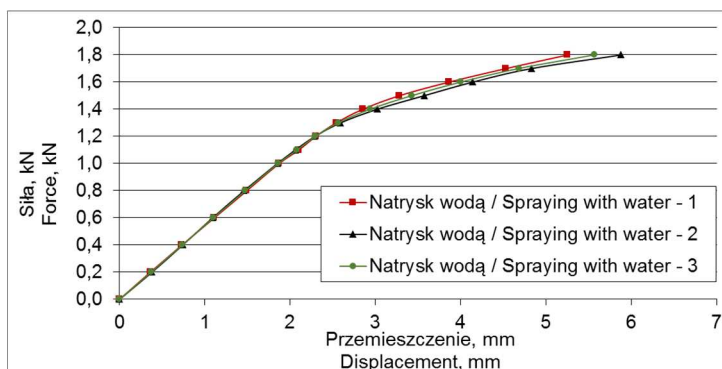
Test results in the form of the function of bending load with respect to the deflection angle are shown in Fig. 5. The deflection value under 1 kN load within the elastic deformation range (straight segment) indicates that shapes cooled by air blowing (1.86 mm) and water spraying (1.88 mm) are more resistant to bending than the shape extruded into a water wave (2.03 mm).



a)



b)



c)

Rys. 5. Zależność siły zginającej od przemieszczenia dla profili chłodzonych na wybiegu prasy: a) w wodzie „fala wodna”; b) nadmuchem powietrza; c) natryskiem wody

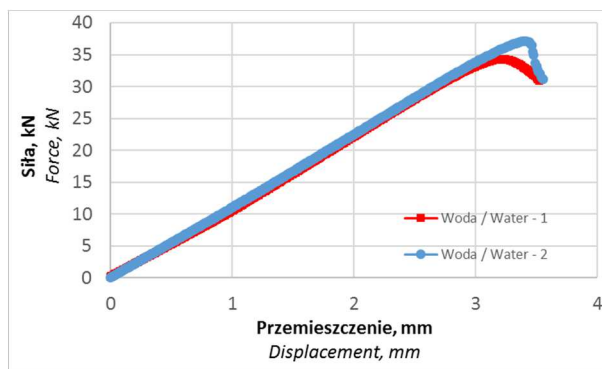
Fig. 5. Bending force as a function of displacement for shapes cooled on the press coasting: a) in “water wave”; b) by air blowing; c) by water spraying

4.2. Próba wyboczenia

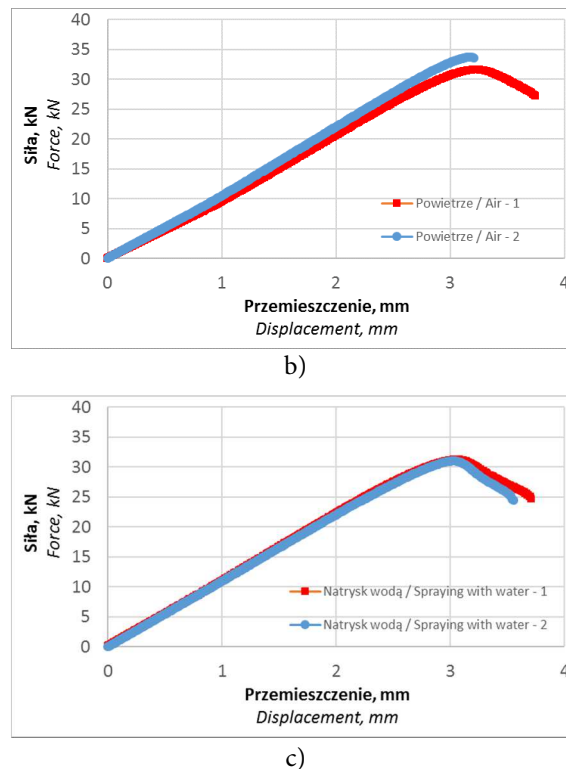
Z otrzymanych zależności siły ściskającej od przemieszczenia (rys. 6) wyznaczono maksymalną siłę ściskającą, która wynosiła dla profili chłodzonych: w „fali wodnej” 34,2–37,1 kN, nadmuchem powietrza 31,6–33,7 kN oraz 31–31,2 kN przy natrysku wodą. Najbardziej odpornymi na wyboczenie okazały się profile, które zostały po wyciskaniu przesycone za pomocą „fali wodnej”.

4.2. Buckling test

Obtained functions of compressive force with respect to displacement (Fig. 6) were used to determine maximum compressive force, which for cooled shaped was equal to: in water wave 34.2–37.1 kN, air blowing 31.6–33.7 kN and 31–31.2 kN in the case of water spraying. Shapes supersaturated by means of the water wave after extrusion proved to be the most resistant to buckling.



a)



Rys. 6. Zależność siły ściskającej od przemieszczenia stempla maszyny wytrzymałościowej wyznaczone w próbie wybočenja profili chłodzonych na wybiegu prasy: a) w wodzie „fala wodna”; b) nadmuchem powietrza; c) natryskiem wody

Fig. 6. Compressive force as a function of displacement of the strength tester's punch, determined in the buckling test of shapes cooled on the press coasting: a) in "water wave"; b) by air blowing; c) by water spraying

4.3. Próba rozciągania

Otrzymane z prób rozciągania wartości maksymalnej siły rozciągania oraz względnego rozciągania aluminiowych profili przedstawiono w tab. 2, a na rys. 7 zaprezentowano przykładowy profil po próbie rozciągania. Stwierdzono, że próbki pękają w miejscach zgrzewu (rys. 8). Próbki chłodzone w wodzie pękały przy największych siłach, około 30% większych w stosunku do pozostałych. Podobnie jak w przypadku względnego rozciągania profilu, próbki chłodzone w „fali wodnej” wykazują największą plastyczność, a względne rozciąganie profilu jest większe o około 35% w stosunku do pozostałych profili.

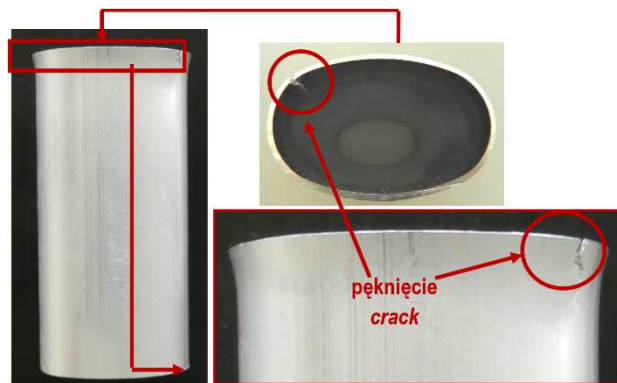
4.3. Expanding test

Maximum values of expanding force and relative expansion of aluminum shapes obtained from expanding tests are presented in Tab. 2, and Fig. 7 shows an example of a shape after the expanding test. It was determined that specimens cracked at bonding points (Fig. 8). Specimens cooled in water cracked at the greatest forces, approx. 30% greater than in other variants. Similarly, in the case of relative expansion, specimens cooled in a water wave exhibit the greatest plasticity, and relative shape expansion is approx. 35% greater than in the case of the other variants.

Tab. 2. Maksymalna siła rozciągania oraz wartość procentowego rozciągania profili aluminiowych

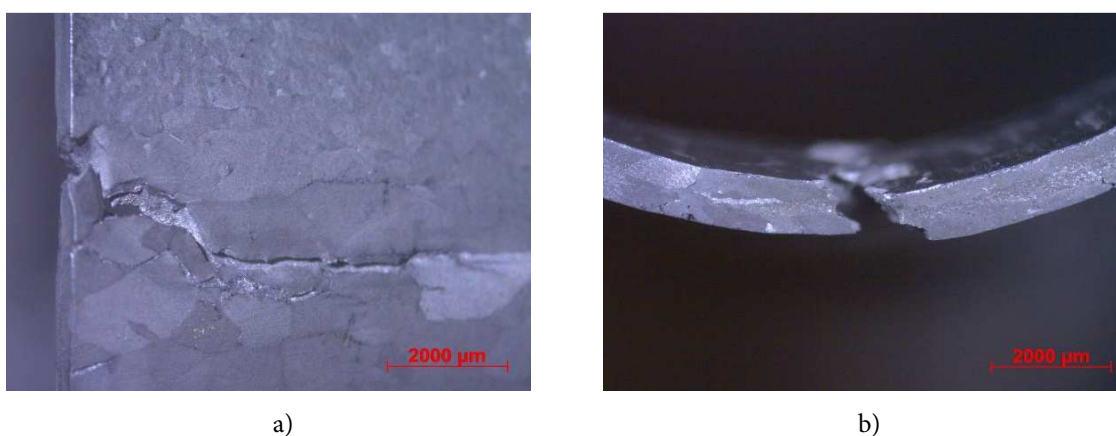
Tab. 2. Maximum expanding force and percentage value of expansion of aluminum shapes

Sposób chłodzenia Cooling method	Śr. maksymalna siła [kN] Avg. maximum force [kN]	Śr. procentowe rozciąganie [%] Avg. expansion as a percentage [%]
„Fala wodna” / „Water wave”	8,08	12,5
Nadmuch powietrza / Air blowing	5,56	7,95
Natryskiwanie wodą / Water spraying	5,53	8,33



Rys. 7. Przykładowy profil po próbie rozciągania wraz z zaznaczonym pęknięciem

Fig. 7. Example of a shape after expanding test with marked crack



Rys. 8. Struktura w obszarze pęknięcia i zgrzewu na przekroju profilu zdjęcia pęknięcia – ścianka boczna (a) na przekroju poprzecznym (b)

Fig. 8. Structure in the area of the crack and bond on the shape's cross-section; photographs of the crack – side wall (a) on cross-section (b)

4.4. Technologiczna próba gięcia za pomocą maszyny trójrolkowej

Na podstawie prób gięcia dwóch rodzajów profili (chłodzonych nadmuchem powietrza i natryskiwanymi wodą) stwierdzić można, że profile chłodzone strumieniem wody posiadają większą podatność do odkształceń plastycznych niż profile chłodzone w powietrzu (rys. 9). Podczas gięcia zaobserwowano wady takie, jak falowanie, spłaszczenie, zapadnięcie materiału. Na skutek tych wad zmienia się w sposób znaczący i niedopuszczalny przekrój poprzeczny profilu. Rury wykonane ze stopu AW-6082 mają ograniczoną zdolność do odkształceń plastycznych nawet podczas gięcia przy dużym promieniu. Stwierdzono, że minimalny promień gięcia, jaki można uzyskać bez wystąpienia wad, wynosi 750 mm.

4.4. Technological bending test on three-roll machine

Based on bending tests of two types of shapes (cooled by air blowing and by water spraying), it can be stated that shapes cooled by a stream of water have a greater capacity for plastic deformation than shapes cooled in air (Fig. 9). During bending, defects such as waviness, flattening and collapse of the material were observed. As a result of these defects, the shape's cross-section undergoes significant, and unacceptable, changes. Pipes made of AW-6082 alloy have limited plastic deformability even during bending with a high radius. It was determined that the minimum bending radius that can be achieved without defects is 750 mm.



Rys. 9. Przykładowe zdjęcie profilu chłodzonego nadmuchem powietrza i poddanego próbie gięcia za pomocą giętarki 3-rolkowej

Fig. 9. Example photograph of a shape cooled by air blowing and subjected to the bending test on a 3-roll bending machine

5. WNIOSKI

Na podstawie badań i prób technologicznych oceniających plastyczność stopu aluminium AW-6082 można stwierdzić, że:

- maksymalna siła ściskająca wyznaczona w próbie wyboczenia odcinka rury o długości 650 mm wskazuje, że największą wytrzymałość na wyboczenie wykazują profile, chłodzone na wybiegu prasy po wyciskaniu za pomocą tzw. „fali wodnej”;
- profile chłodzone za pomocą tzw. „fali wodnej” wykazały największą strzałkę ugięcia w próbie trójpunktowego zginania;
- zwiększona plastyczność i zdolność do odkształceń plastycznych tego wariantu profilu została również potwierdzona w próbie rozciągania stożkiem, gdzie wartości względnego odkształcenia były o 35% większe niż profile chłodzonych za pomocą nadmuchu powietrza czy natrysku wodnego;
- półwyroby, które mają być poddawane obróbce plastycznej powinny być chłodzone „falą wodną”;
- inicjacja pęknięć w próbie rozciągania następuje w miejscach zgrzewów profilu;
- profile wykonane ze stopu aluminium AW-6082 osiągają bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe sięgające nawet $R_m = 340$ MPa [6], ale charakteryzują się ograniczoną odkształcalnością, zwłaszcza w zakresie gięcia profili o małym promieniu gięcia.

5. CONCLUSIONS

Based on tests and technological trials assessing the plasticity of AW-6082 aluminum alloy, it can be determined that:

- the maximum compressive force determined in the buckling test of a pipe segment 650 mm in length, indicating the greatest resistance to buckling, corresponds to shapes cooled by means of a so-called “water wave” on the coasting of the press,
- shapes cooled by means of the so-called “water wave” exhibited the greatest deflection in the three-point bending test,
- the elevated plasticity and plastic formability of shapes in this variant was also confirmed in the cone expansion test, where relative deformation values were 35% greater than in the case of shapes cooled by air blowing or water spraying,
- semi-products to be subjected to plastic forming should be cooled with a “water wave”,
- crack initiation in the expanding test occurs at weld sites on the shape,
- shapes made of AW-6082 aluminum alloy achieve very good strength properties, reaching up to $R_m = 340$ MPa [6], however they are characterized by limited deformability, particularly with regard to bending shapes with small bending radius.

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] Leśniak D., B. Leszczyńska-Madej, A. Wojtyła. 2015. „Charakterystyka mikrostruktury kształtowników płaskich wyciskanych z wysokoskładnikowych stopów AlMg”. *Rudy i Metale Nieżelazne Recykling* 60 (12): 797–804.
- [2] Laurentowska-Tyczka A., J. Borowski, H. Jurczak. 2014. „Trwałość matryc zależna od kształtu wyciskanego profilu i parametrów procesu azotowania”. *Obróbka Plastyczna Metali* 25 (3): 215–228.
- [3] Bjork T., J. Bergstrom, S. Hogmark. 1999 „Tribological simulation of aluminium hot extrusion”. *Wear* (224): 216–225.
- [4] Liang Ch., Z. Guoqun, Y. Junquan, Z. Wendong, W. Tao. 2014. „Analysis 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.
- [5] Romański P., M. Burdek, W. Ciepela, M. Suliga, J.W. Pilarczyk. 2013. „Wpływ prędkości wyciskania na wybrane parametry chropowatości powierzchni wyciskanych profili ze stopu aluminium AlMgSi0,5”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 1: 89–100.
- [6] Borowski J., G. Płaczek, H. Jurczak, D. Leśniak, W. Libura, J. Zasadziński, A. Rękas. 2016. „Analiza właściwości mechanicznych i dokładność wymiarów cienkościennych kształtowników zamkniętych wyciskanych ze stopu AW6082”. *Obróbka Plastyczna Metali* 27 (1): 7–20.

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] Leśniak D., B. Leszczyńska-Madej, A. Wojtyła. 2015. „Microstructure characterization of extruded flat sections from high-component AlMg alloys”. *Rudy i Metale Nieżelazne Recykling* 60 (12): 797–804.
- [2] Laurentowska-Tyczka A., J. Borowski, H. Jurczak. 2014. „Die durability dependent on the shape of the extruded profile and nitriding process parameters”. *Obróbka Plastyczna Metali* 25 (3): 215–228.
- [3] Bjork T., J. Bergstrom, S. Hogmark. 1999 „Tribological simulation of aluminium hot extrusion”. *Wear* (224): 216–225.
- [4] Liang Ch., Z. Guoqun, Y. Junquan, Z. Wendong, W. Tao. 2014. „Analysis 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.
- [5] Romański P., M. Burdek, W. Ciepela, M. Suliga, J.W. Pilarczyk. 2013. „Influence of the extrusion speed on the selected parameters of surface roughness of extruded profiles from the AlMgSi0.5 aluminium alloy”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 1: 89–100.
- [6] Borowski J., G. Płaczek, H. Jurczak, D. Leśniak, W. Libura, J. Zasadziński, A. Rękas. 2016. „Analysis of mechanical properties and dimensional accuracy of hollow thin-walled shapes extruded from AW6082 alloy”. *Obróbka Plastyczna Metali* 27 (1): 7–20.