



Badania gięcia profili aluminiowych stosowanych w przemyśle transportowym

Bending tests of aluminium profiles used in the transport industry

(1) Tomasz Gądek^{*1}, (2) Łukasz Nowacki¹, (3) Marcin Majewski¹, (4) Henryk Jurczak²

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

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 26.04.2018

Recenzja: 26.06.2018

Akceptacja: 28.09.2018

Wkład autorów

- (1) Metodyka badań, udział w badaniach, analiza wyników
- (2) Udział w badaniach, obsługa maszyny, przygotowanie próbek
- (3) Udział w badaniach, obsługa maszyny, przygotowanie próbek
- (4) Analiza wyników, przygotowanie profili do badań gięcia, udział w badaniach

Streszczenie

W artykule przedstawiono kształtowanie poprzez gięcie wyciskanych wyrobów w postaci profili aluminiowych poprzedzone badaniami przy użyciu metod numerycznych. Badania prowadzono w celu uzyskania symetrycznego wygięcia profilu aluminiowego z gatunku 6xxx na wysokość 40 ± 10 mm. Przedstawiono wyniki badań prowadzonych w programie Simufact Forming. Przeprowadzono badania symulacji MES profilu metodą gięcia trójrolkowego, jak również metodą obciążania profili. Głównymi cechami wytrzymałościowymi wyciskanego wyrobu wpływającego na realizację jego gięcia i efekt końcowy są twardość i plastyczność materiału. Na podstawie otrzymanych wyników symulacji MES wybrano najbardziej korzystną z analizowanych różnych wariantów metodę gięcia oraz zaprojektowano narzędzia do badań laboratoryjnych. Symulacje pozwoliły na opracowanie procesu technologicznego gięcia trójrolkowego oraz na określenie wielkości sprężynowania giętego profilu aluminiowego. W celu weryfikacji wyników badań numerycznych w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu w warunkach laboratoryjnych przeprowadzono badania gięcia trójrolkowego na giętarce do rur i profili z dociskiem hydraulicznym firmy CORMAK HRBM 50HV. Do badań zaprojektowano rolki, których kształt określono na podstawie analiz numerycznych. W celu określenia wpływu procesu gięcia na zmiany właściwości mechanicznych profili, przeprowadzono próby rozciągania próbek aluminiowych przed i po procesie gięcia. Przeprowadzenie analizy kształtu przekroju poprzecznego giętych profili, za pomocą skanera optycznego firmy GOM ATOS COMPACT 5M, pozwoliło na określenie wpływu procesu gięcia na zmiany geometryczne profilu. W tym celu zeskanowano przekrój profilu zarówno przed gięciem, jak i po gięciu. Wyniki badań pozwoliły na określenie wielkości skręcania się profilu podczas prób kształtowania. Otrzymane wyniki badań numerycznych i eksperymentalnych wykorzystano w trakcie wykonywania serii prototypowej w zakładzie produkcyjnym.

Słowa kluczowe: profile aluminiowe, profile wyciskane, próba zginania, MES

Article info

Received: 26.04.2018

Reviewed: 26.06.2018

Accepted: 28.09.2018

Abstract

The article presents forming with the use of bending extruded products in the form of aluminium profiles preceded with studies by using numerical methods. The tests were carried out in order to obtain symmetrical bending of the aluminium profile of the 6xxx grade to a height of 40 ± 10 mm. The results of the tests conducted in the software Simufact Forming are presented. Profile FEM simulation tests were carried out using three-roll bending method and the profile stretch forming method were carried out. The main

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

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

Authors' contribution

- (1) Methodology, participation in research, analysis of the results
- (2) Participation in research, operation of machine, preparation of samples
- (3) Participation in research, operation of machine, preparation of samples
- (4) Analysis of the results, preparation of profiles for bending tests, participation in research

strength characteristics of the extruded product, which affects the bending process and the final effect, are the hardness and ductility of the material. On the basis of the obtained FEM results, the most favorable bending method was selected and the tools for laboratory tests were designed. The simulations made it possible to develop a three-roller bending process and determine the spring action value of the bent aluminium profile. In order to verify the results of numerical tests in the Metal Forming Institute in Poznań in laboratory conditions, three-roll bending tests were carried out with the use of a bending machine for pipes and profiles with hydraulic pressure CORMAK HRBM 50HV. Rollers were designed for research, the shape of which was determined on the basis of numerical analyses. In order to determine the influence of the bending process on the changes in mechanical properties of profiles, tensile tests were carried out of aluminium samples before and after the bending process. The analysis of the cross-sectional shape of the bent profiles, carried out with the use of an optical scanner GOM ATOS COMPACT 5M, allowed to determine the influence of the bending process on the geometric changes of the profile. For this purpose, the cross-section of the profile was scanned before and after bending. The test results allowed to determine the size of the profile bending during forming tests. The obtained results of numerical and experimental tests were used during in the fabrication of a prototype series in the manufacturing plant.

Keywords: aluminium profiles, extruded shapes, bending test, FEM

1. WPROWADZENIE

Zapotrzebowanie na kształtowanie wyciskanych profili aluminiowych wzrasta. Główną rolę w tym wzroście odgrywa przemysł transportowy (profile nośne naczep ciągników siodłowych). Aby spełnić wymagania producentów, gięcie wykonuje się obecnie w różnych procesach. Autorzy artykułu [1] dokonują analizy poszczególnych technologii pod względem ich dokładności i kompleksowości. Zwracają uwagę, że wybór technologii zależy nie tylko od tego, jaki produkt ma być wytworzony, ale także od możliwości zakładu. Wśród metod gięcia wyróżnione zostały: gięcie na prasie, na trzpieniu, na rolkach oraz obciąganie zwykłe i rotacyjne. Prasy używane są w przypadku produkcji wielkoseryjnej lub gdy profil ma grube ścianki, jednak tolerancje uzyskiwane w tym procesie nie są duże. W procesie gięcia na trzpieniu występują duże naprężenia ścinające oraz brak rozciągania, co powoduje małą dokładność wykonywanego gięcia. Obciąganie profili na matrycy to proces używany głównie w przemyśle motoryzacyjnym, gdzie produkuje się duże serie jednakowych elementów. Z badań [2] wynika, że siła rozciągająca, występująca podczas kształtowania obciąganiem, ma kluczowe znaczenie w odniesieniu do tworzenia się zniekształcenia w przekroju giętego profilu. W celu zminimali-

1. INTRODUCTION

The demand for forming extruded aluminium profiles is increasing. The transport industry plays a major role in this growth (load bearing profiles for semi-trailers). In order to meet the requirements of manufacturers, bending is now carried out in various processes. Authors of the article [1] analyze particular technologies in terms of their accuracy and comprehensiveness. They point out that the choice of technology depends not only on the product to be manufactured, but also on the capabilities of the manufacturing plant. The following were distinguished out of the bending methods: press bending, mandrel bending, roll bending, stretch forming and rotary extrusion. Presses are used in bulk production or when the profile has thick walls, but the tolerances obtained in this process are not high. The mandrel bending process is characterized by high shear stresses and lack of stretching, which causes low bending accuracy. Profile die forming is a process used mainly in the automotive industry, where large series of identical parts are produced. Research [2] shows that the tensile force that occurs during press forming is crucial for the formation of deformation in the cross-section of the bent profile. To minimize undesirable effects, internal mandrels are used. In addition, competition for-

zowania niepożądanych efektów stosuje się wewnętrzne trzpienie. Ponadto konkurencja wymusza szukanie nowych rozwiązań gięcia. Proces obciążania rotacyjnego jest hybrydą kilku innych technologii stworzoną specjalnie do poprawy dokładności obróbki. Metodą tą można formować profile o małych promieniach. Nowe metody takie, jak gięcie TSS (*Torque Superposed Spatial Bending*) [3] oraz gięcie podczas procesu wyciskania [4] wymagają dalszych badań.

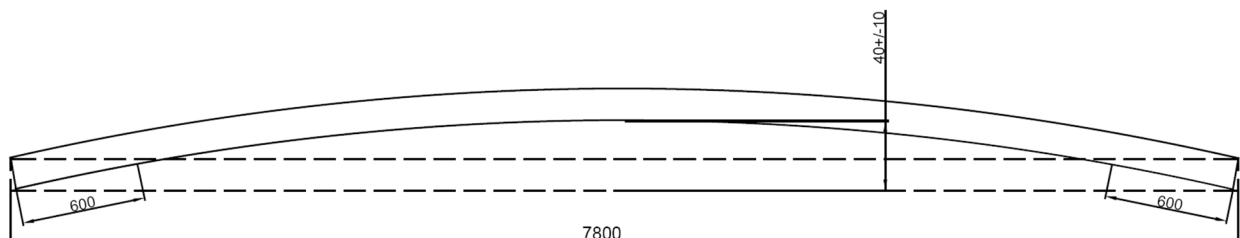
Gięte profile o skomplikowanym kształcie przekroju są wykonywane zazwyczaj za pomocą gięcia na rolkach w temperaturze otoczenia. Proces ten zmienia rozkład naprężeń szczytkowych, co może wpływać na sprężysto-plastyczne wyobcowanie się elementu. Autorzy artykułu [5] przedstawiają metodę tworzenia modelu służącego do numerycznego obliczenia naprężeń szczytkowych w produkowanym profilu. Metoda ta uwzględnia materiałową oraz geometryczną nieliniowość oraz symulację kontaktów pomiędzy poszczególnymi elementami. Wyniki obliczeń MES porównano z wynikami badań modeli rzeczywistych. Autorzy stwierdzili dobre odwzorowanie rzeczywistości i przydatność metody elementów skończonych do szacowania naprężeń szczytkowych w profilach giętych na rolkach. Natomiast w artykule [6] autorzy przedstawiają wyniki badań nad zachowaniem się profili o przekroju prostokątnym poddanym zginaniu na rolkach.

W artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w celu doboru technologii gięcia profilu ze stopu aluminium w serii 6xxx. Przeanalizowano dwie metody kształtowania profili, a następnie wybrano jedną, dla której opracowano proces technologiczny gięcia profilu wg rys. 1.

ces the search for new bending solutions. The rotary extrusion process is a hybrid of several other technologies developed specifically to improve machining accuracy. This method can be used to form profiles of small radii. New methods such as TSS (Torque Superposed Spatial Bending) [3] and extrusion bending [4] require further research.

Bent profiles with complicated section shapes are usually made by roll bending at ambient temperature. This process changes the distribution of residual stress, which may affect the elastic-plastic buckling of the element. The authors of article [5] present the method of developing a model for numerical calculation of residual stress in the produced profile. This method includes material and geometric non-linearity and simulation of contacts between individual elements. The results of the calculations were compared with the results of real life models. The authors found a good representation of reality and the usefulness of the finite element method for estimating residual stress in roll bent profiles. In article [6] the authors present the results of research on the behavior of profiles with rectangular cross-section subjected to roll bending.

The article presents the results of research carried out in order to select the bending technology of aluminium alloy profile in the 6xxx grade series. Two methods of profile forming were analyzed and one method was selected for which the process of profile bending was developed in accordance with Fig. 1.



Rys. 1. Schemat ugięcia profilu

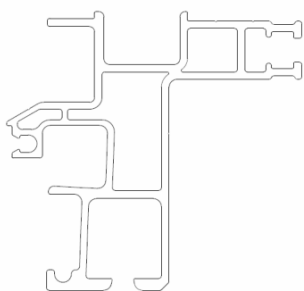
Fig. 1. Profile deflection diagram

2. BADANIA NUMERYCZNE

Celem przeprowadzanych symulacji było określenie odpowiedniego procesu technologicznego do gięcia aluminiowych profili. Do analiz numerycznych wytypowano dwa procesy kształtowania: obciąganie profilu na matrycy i gięcie na trzech rolkach.

2.1. Założenia symulacji

Do badań numerycznych przyjęto kształt profilu aluminiowego, przedstawionego na rys. 2. Ze względu na skomplikowany kształt profilu oraz czas obliczeniowy, do symulacji użyto uproszczonego modelu profilu (rys. 3). W uproszczeniu zastąpiono promienie ostrymi krawędziami oraz skrócono profil z 7800 mm do 1000 mm. Geometryczny model użyty w symulacjach obliczeń numerycznych przedstawia rys. 4, na model nałożono siatkę składającą się z 32 324 tetraedralnych elementów.



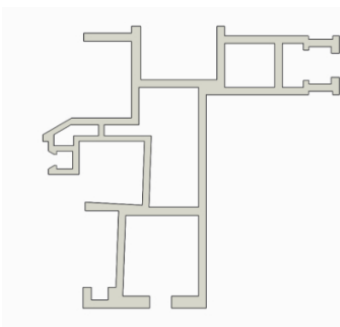
Rys. 2. Oryginalny kształt profilu
Fig. 2. Original profile shape

2. NUMERICAL TESTS

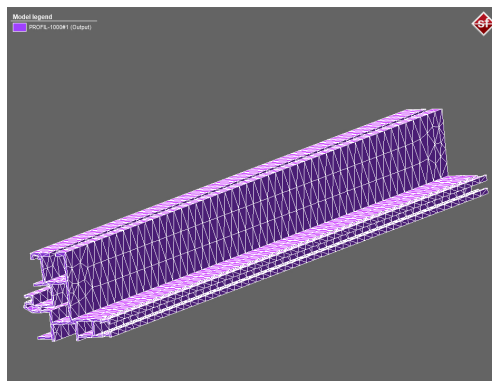
The purpose of the simulations was to determine the appropriate process for bending aluminium profiles. Two forming processes were selected for numerical analyses: profile die forming and three-roll bending.

2.1. Assumptions of the simulation

The shape of the aluminium profile shown in Fig. 2, was selected for numerical tests. Due to the complicated profile shape and the calculation time, a simplified profile model was used for the simulation (Fig. 3). In the simplification the radii were replaced by sharp edges and the profile was shortened from 7,800 mm to 1,000 mm. The geometric model used in the numerical calculation simulations is shown in Fig. 4, with a grid of 32,324 tetrahedral elements superimposed on the model.



Rys. 3 Uproszczony kształt profilu
Fig. 3. Simplified profile shape



Rys. 4. Siatka elementów skończonych na modelu użytym w symulacjach
Fig. 4. Finite element grid on the model used in the simulations

Do symulacji przyjęto dane materiałowe dla stopu 6063A. Podstawowe parametry charakteryzujące materiał zestawiono w tab. 1.

Material data for alloy 6063A were used for the simulation. The basic parameters characterizing the material are presented in Tab. 1.

Tab. 1. Zestawienie współczynników bazy materiałowej Simufact Material 2016

Tab. 1. List of coefficients of the Simufact Material 2016 database of materials

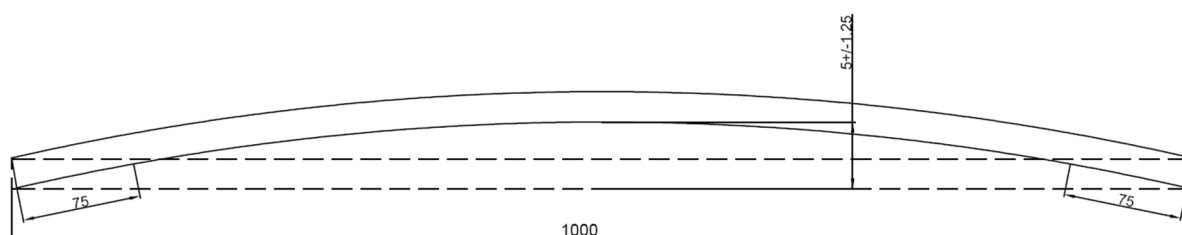
Oznaczenie AISI AISI designation	Zastępcze odkształcenie plastyczne Equivalent plastic strain [-]	Prędkość odkształcenia Strain rate [1/s]	Liczba Poissona Poisson's ratio [-]	Granica plastyczności Compressive yield strength [MPa]	Odształcenie plastyczne Plastic strain [-]	Napężenie płynięcia Stress of plastic flow [MPa]
6063A	0,05–0,8	0,01–10	0,25	106	0,05–0,8	105–175

2.1.1. Obciążanie profilu na matrycy

Według założeń profil o długości 7,8 m powinien być wygięty symetrycznie na wysokość 40+/-10 mm (co odpowiada promieniowi gięcia w zakresie 150–250 m). Dla skrócenia czasu obliczeń przyjęto długość profilu równą 1 m i proporcjonalnie wysokość gięcia 5+/-1,25 mm (rys. 5). W tym celu przygotowano jedną matrycę odpowiadającą promieniowi gięcia 18 m oraz drugą odpowiadającą promieniowi 25 m. Przeprowadzenie analiz numerycznych dla obu matryc pozwoliło określić wpływ wielkości promienia na sprężynowanie. Badania prowadzono dla prędkości posuwu 1 mm/s. Ugięcie określone zostało jako różnica między maksymalną a minimalną wartością przemieszczenia profilu względem osi Z (rys. 6a i 6b).

2.1.1. Stretch forming

According to the assumptions, a profile with a length of 7.8 m should be bent symmetrically to a height of 40+/-10 mm (which corresponds to a bending radius in the range of 150–250 m). To reduce the calculation time, the profile length was assumed to be 1 m and the proportional bending height 5+/-1.25 mm (Fig. 5). To this end, there is one matrix corresponding to the radius of the bending 18 m and the second corresponding to the radius of 25 m. Carrying out numerical analysis for both matrices helped determine the impact of the size of the RADIUS on the springback. The tests were carried out at a feed rate of 1 mm/s. The deflection was determined as the difference between the maximum and minimum displacement of the profile along axis Z (Fig. 6a and 6b).



Rys. 5. Schemat ugięcia profilu na potrzeby symulacji numerycznych

Fig. 5. Diagram of profile deflection for numerical simulations

Na rys. 6a i 6b widać, że podczas symulacji uzyskano dobre odwzorowanie matrycy oraz niewielkie sprężynowanie profilu wynoszące ok. 2,2 mm. Uzyskano wyrób o wysokości ok. 3,5 mm.

Fig. 6a and 6b show that during the simulation a good representation of the die was obtained and a slight spring action of the profile of approx. 2.2 mm. A product with a height of approx. 3.5 mm was obtained.

W próbie drugiej użyto modelu matrycy o promieniu równym 18 m, w celu uzyskania zakładanych 5 mm ugięcia. Jak widać na rys. 7a i 7b zestawionych w tab. 3, uzyskano wynik zgodny z zakładanym. Sprężynowanie podczas drugiej próby wynosiło ok. 2,4 mm.

In the second test, a die model with a radius of 18 m was used to achieve the assumed deflection of 5 mm. As can be seen in the Fig. 7a and 7b in Tab. 3, the result was consistent with the assumed one. The spring action during the second trial was approx. 2.4 mm.

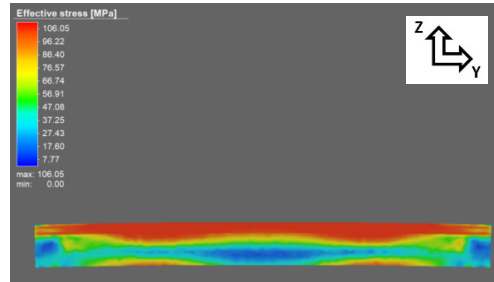
Profil w końcowej fazie gięcia, detal pod obciążeniem / Profile in the final stage of bending, detail under load

Przemieszczenie w osi Z / Displacement on axis Z



a) pod obciążeniem / under load

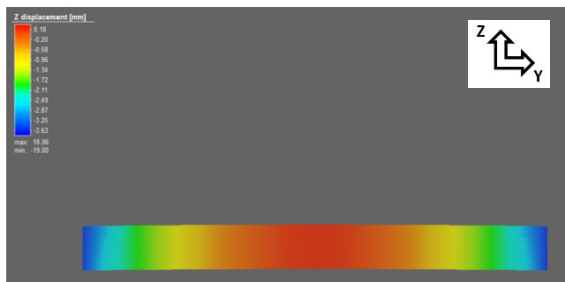
Naprężenia zredukowane / Reduced stress



b) pod obciążeniem / under load

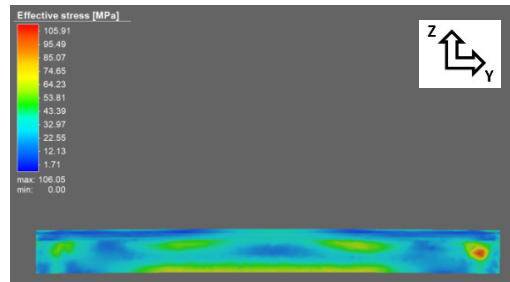
Profil w końcowej fazie gięcia, po odciążeniu / Profile in the final stage of bending, after unloading

Przemieszczenie w osi Z / Displacement on axis Z



c) po odciążeniu / after unloading

Naprężenia zredukowane / Reduced stress



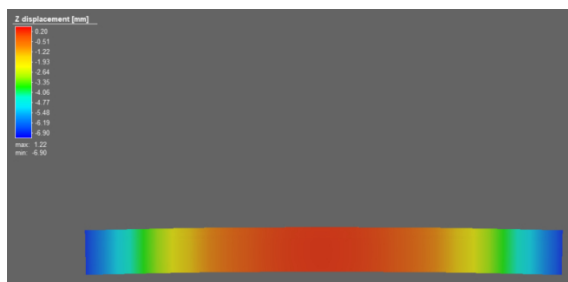
d) po odciążeniu / after unloading

Rys. 6. Obciążanie na matrycy o promieniu 25 m

Fig. 6. Profile die forming, die radius 25 m

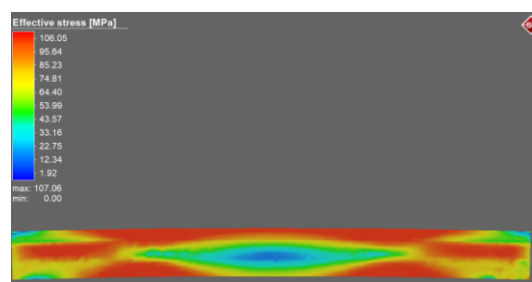
Profil w końcowej fazie gięcia, detal pod obciążeniem / Profile in the final stage of bending, detail under load

Przemieszczenie w osi Z / Displacement on axis Z



a) pod obciążeniem / under load

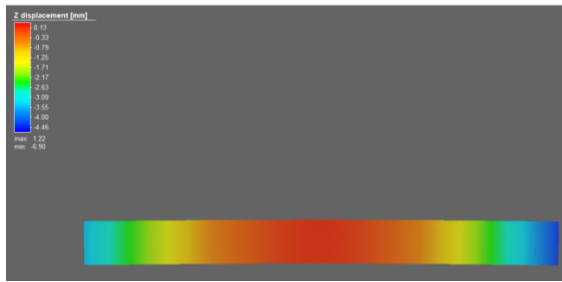
Naprężenia zredukowane / Reduced stress



b) pod obciążeniem / under load

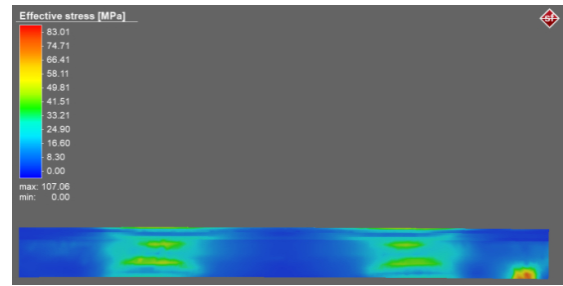
Profil w końcowej fazie gięcia, po odciążeniu / Profile in the final stage of bending, after unloading

Przemieszczenie w osi Z / Displacement on axis Z



c) po odciążeniu / after unloading

Naprężenia zredukowane / Reduced stress



d) po odciążeniu / after unloading

Rys. 7. Obciążanie na matrycy o promieniu 18 m

Fig. 7. Profile die forming, die radius 18 m

W efekcie końcowym uzyskano wyrób wygięty na wysokość ok. 4,5 mm. W obu przypadkach naprężenia zredukowane wyniosły ok. 107 MPa.

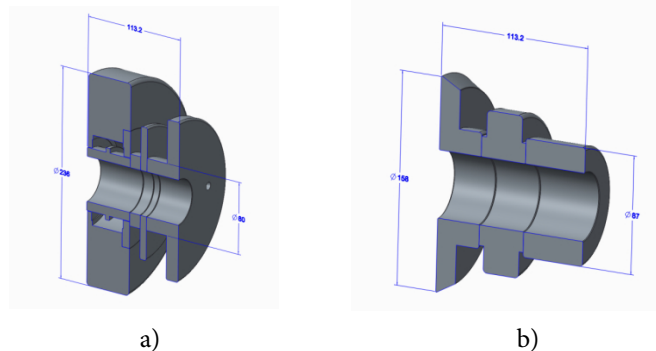
The final result was a product curved to a height of approx. 4.5 mm. In both cases, the reduced stress was approx. 107 MPa.

2.1.2. Gięcie na trzech rolkach

Badania gięcia na rolkach prowadzono dla warunków profilowania/kształtowania/gięcia przedstawionych w pkt. 2.1.1. Na podstawie kształtu profilu opracowano kształt rolek do badań gięcia (rys. 8).

2.1.2. Three-roll bending

Three-roll bending was carried out for roll forming/forming/bending conditions presented in 2.1.1. Based on the shape of the profile, the shape of rolls for bending tests was developed (Fig. 8).



Rys. 8. Narzędzia do badań gięcia: a) rolka górna; b) rolka dolna

Fig. 8. Tools for bending tests: a) top roll; b) bottom roll

Zastosowano rolki składane z modułów odwzorowujących poszczególne kształty profilu z zachowaniem odpowiednich luzów pomiędzy powierzchniami bocznymi. Zespół rolki górnej wykonuje ruch wzdłuż osi Z, zagłębiając się w materiał. Instytut Obróbki Plastycznej dysponuje trójrolkową giętarką, której prędkość obrotowa walców jest stała i wynosi 10 obr/min i taką wartość prędkości obrotowej przyjęto do

Folding rolls were used with modules mapping individual profile shapes while maintaining appropriate clearances between side surfaces. The top roll assembly moves along the Z axis, sinking into the material. The Metal Forming Institute has a three-roll bending machine which rotational speed of 10 rpm is constant and this value of rotational speed was adopted for

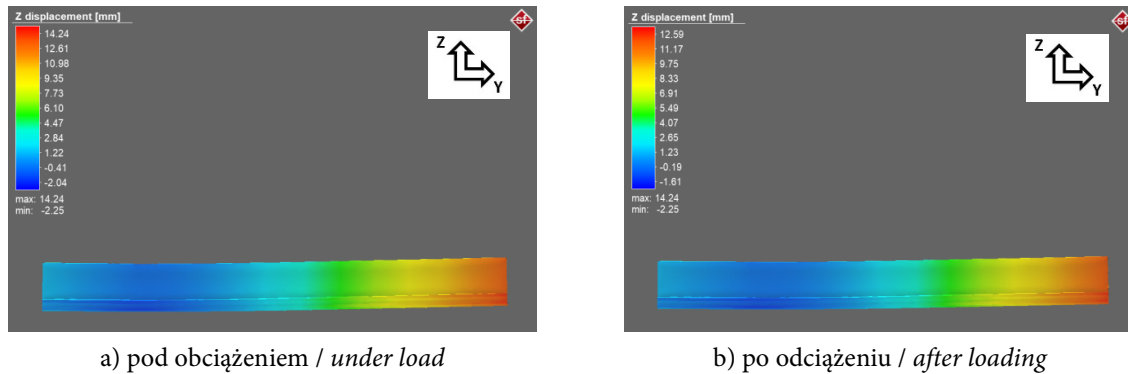
analiz numerycznych. Współczynnik tarcia dobrano na podstawie literatury [7].

Na rys. 9–11 przedstawiono ugięcie profilu w osi Z pod obciążeniem (po lewej) oraz po odciążeniu (po prawej). Pozwala to na bezpośrednie porównanie wielkości sprężynowania. Próby zostały przeprowadzone kilkakrotnie dla każdej z wartości skoku. Otrzymano podobne rezultaty.

numerical analyses. Coefficient of friction were selected on the basis of literature [7].

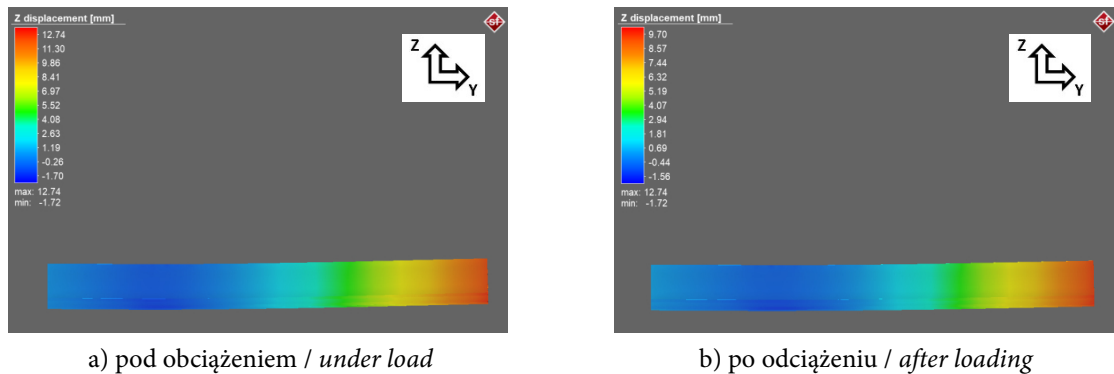
Fig. 9–11 show the deflection of profile on the Z-axis under load (on the left) and after unloading (on the right). This allows a direct comparison of the size of the spring action. Trials were carried out several times for each of the stroke values. Similar results were obtained.

Profil w końcowej fazie gięcia / Profile in the final stage of bending



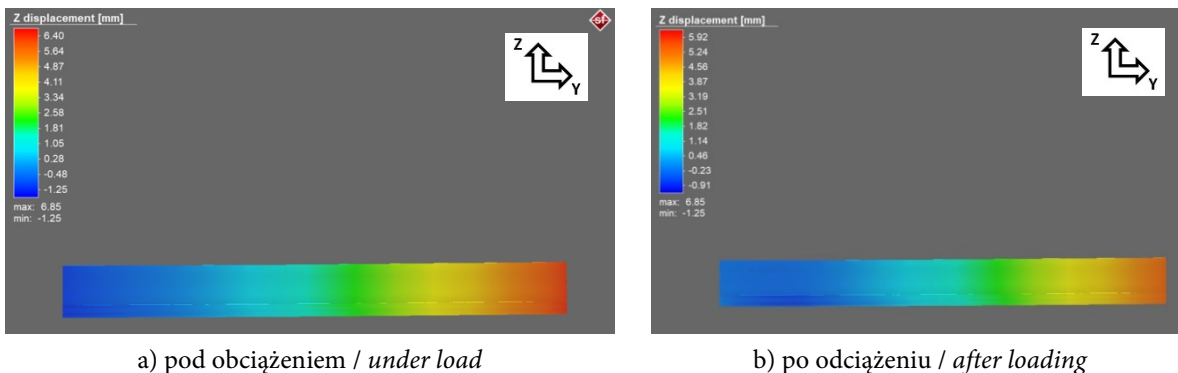
Rys. 9. Gięcie dla rolki o skoku 2,5 mm

Fig. 9. Bending for roll stroke of 2.5 mm



Rys. 10. Gięcie dla rolki o skoku 2 mm

Fig. 10. Bending for roll stroke of 2 mm

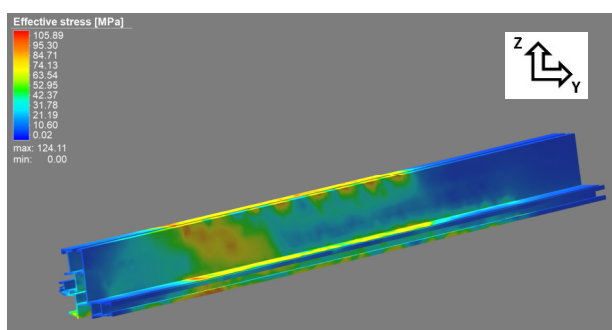


Rys. 11. Gięcie dla rolki o skoku 1,1 mm

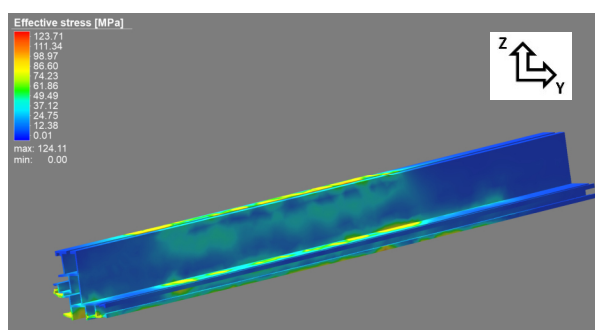
Fig. 11. Bending for roll stroke of 1.1 mm

Na rys. 12 pokazano naprężenia zredukowane dla profilu przy skoku rolki 1,1 mm.

Fig. 12 shows the stress reduced for the profile with 1.1 mm roll stroke.



a) profil w końcowej fazie gięcia – pod obciążeniem
a) profile in the final phase of bending – under load



b) profil w końcowej fazie gięcia – po odciążeniu
b) profile in the final stage of bending – after unloading

Rys. 12. Naprężenia zredukowane dla profilu o skoku rolki 1,1 mm

Fig. 12. Reduced stress for a profile of roll stroke of 1.1 mm

2.2. Podsumowanie badań numerycznych

Badania miały na celu określenie odpowiedniej technologii gięcia profili aluminiowych. Wykazano, że proces ten może odbywać się zarówno za pomocą obciągania, jak i trójrolkowego gięcia. Zauważono, że w przypadku obciągania znaczny wpływ na ostateczny kształt profilu ma sprężynowanie powrotne materiału po kształtowaniu. Różnica pomiędzy ugięciem przed i po odciążeniu wynosiła ponad 30% (tab. 2).

2.2. Summary of numerical tests

The objective of tests was to determine the appropriate bending technology of aluminium profiles. It was shown that this process can take place both by means of stretch forming and three-roll bending. It was noted that in the case of stretch forming, the final shape of the profile is significantly influenced by the return spring action of the material after forming. The difference between the deflection before and after loading was more than 30% (Tab. 2).

Tab. 2. Zestawienie wyników symulacji dla procesów obciągania i gięcia trójrolkowego
Tab. 2. Comparison of simulation results for stretch forming and three-roll bending processes

Proces Process	Parametry Parameters	Sprężynowanie materiału [mm] Material spring action [mm]	Ugięcie po sprężynowaniu [mm] Deflection after spring action [mm]
Obciąganie Forming	Promień 25 m Radius 25 m	2,36 mm	3,81
	Promień 18 m Radius 18 m	2,51 mm	4,59
Gięcie trójrolkowe Three-roll bending	Skok rolki 2,5 mm Roll stroke 2.5 mm	2,08 mm	14,20
	Skok rolki 2 mm Roll stroke 2 mm	2,16 mm	11,26
	Skok rolki 1,1 mm Roll stroke 1.1 mm	2,18 mm	5,47

Podczas badań nie zaobserwowano wpływu metody gięcia na zmiany kształtu przekroju profilu. Na korzyść gięcia trójrolkowego należy zaliczyć mniejsze naprężenia zredukowane w pro-

During the tests no influence of the bending method on shape changes in the profile cross-section was observed. The reduced stress in the profile after processing should be noted in the case

filu po obróbce. Gięcie za pomocą rolek jest efektywniejsze, co widać po stosunku skoku rolki do uzyskanego ugięcia. Metoda ta jest bardziej elastyczna, a przez to efektywniejsza w porównaniu do obciągania. Na jednym zestawie rolek można giąć profile o różnych długościach, co pozwala na zmniejszenie kosztów procesu zarówno przez mniejszą ilość narzędzi, jak i przez brak konieczności przezbajania maszyny. W przypadku obciągania konieczne jest wykonanie matrycy w zależności od długości giętego elementu. Dodatkowo obciągarka jest znacznie bardziej rozbudowaną mechanicznie maszyną od giętarki, a przez to wymaga więcej miejsca do prób technologicznych. Koszt wykonania maszyny i odpad giętego produktu są większe w porównaniu do giętarki trójrolkowej. Podczas obciągania konieczne jest przytrzymanie giętego profilu, co powoduje powstawanie wad powierzchniowych w miejscu trzymania, dlatego też materiał uszkodzony należy po procesie kształtowania odciąć i potraktować jako odpad.

3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

3.1. Określenie własności mechanicznych stopu 6063

Na podstawie uzyskanych wyników z symulacji gięcia trójrolkowego zaprojektowano narzędzia do gięcia i przeprowadzono próby gięcia w warunkach laboratoryjnych. Do badań gięcia przygotowano profile wyciskane ze stopu aluminium 6063 w stanie dostawy T4 oraz T6. Z każdego rodzaju profili przygotowano przed badaniami gięcia, próbki do badań rozciągania oraz twardości.

Przeprowadzono statyczne próby rozciągania z wyznaczeniem umownej granicy plastyczności $R_{p0,2}$, wytrzymałości na rozciąganie R_m , wydłużenia A_{80} oraz krzywych zależności naprężenia od przemieszczenia. Wyniki badań zamieszczono w tab. 3. Badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2010 B.

of three-roll bending. Bending by means of rolls is more efficient, as can be seen from the ratio of the roll stroke to the obtained deflection. This method is more flexible and therefore more effective compared to stretch forming. On one set of rolls profiles of different lengths can be bent, which makes it possible to reduce process costs both due to fewer tools necessary, but also thanks to no need to change over the machine. In the case of stretch forming, it is necessary to make a die depending on the length of the bent element. In addition, a stretch-forming machine is mechanically a much more complex machine than a bending machine, and thus requires more space for production trials. The cost of making the machine and the waste of the bent product are higher than those of a three-roller bender. During stretch forming, it is necessary to hold the bent profile, which causes surface defects in the holding area, therefore the damaged material should be cut off after the shaping process and treated as waste.

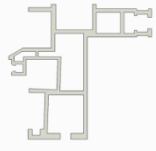
3. EXPERIMENTAL TESTS

3.1. Determination of mechanical properties of alloy 6063

Based on the results obtained from the simulation of three-roller bending, bending tools were designed and bending tests were carried out in laboratory conditions. For bending tests, extruded profiles made of 6063 aluminium alloy were prepared in T4 and T6 delivery condition. All types of profiles were used to prepare samples for bending, tensile and hardness testing.

Static tensile tests were performed with determination of offset yield stress $R_{p0,2}$, tensile strength R_m , elongation A_{80} and curves of dependence of stress on displacement. Test results are provided in Tab. 3. HAZOP tests were carried out in accordance with PN-EN ISO 6892-1:2010 B.

Tab. 3. Wyniki badań rozciągania próbek aluminiowych
 Tab. 3. Results of tests of aluminium sample stretching

Nr próbki Sample no.	Stan dostawy Delivery condition	Rodzaj profilu Profile type	S_0 [mm ²]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	śr. R_m [MPa] avg. R_m [MPa]	A [%]	śr. A [%] avg. A [%]
1	T4		55,86	98	193	193	25,8	26
2			56,04	98	192			
3			55,95	98	193			
4	T6		55,67	254	271	271	6,7	7
5			55,67	252	270			
6			55,69	254	272			

W tab. 4 przedstawiono wyniki pomiaru twardości przebadanych próbek. Różnica w pomiarach twardości pomiędzy poszczególnymi stanami dostawy wynosi ok. 25%.

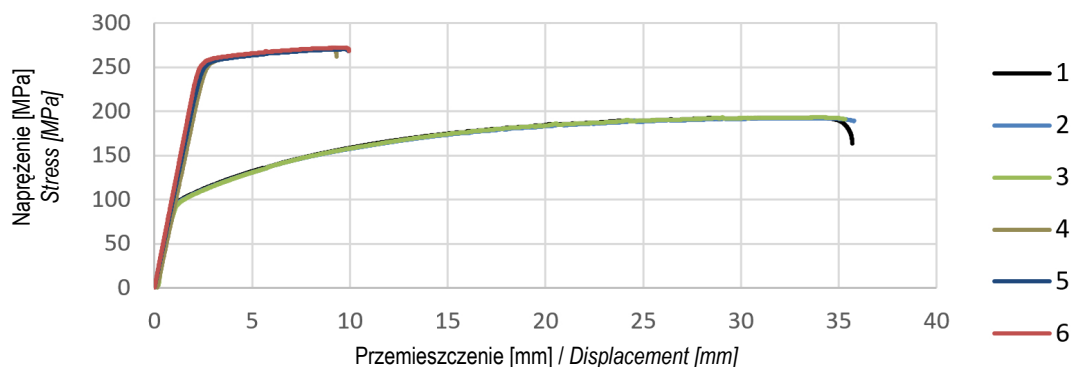
Tab. 4 shows the results of hardness measurements of the tested samples. The difference in hardness measurements between individual delivery conditions is approx. 25%.

Tab. 4. Wyniki badań twardości
 Tab. 4. Hardness test results

Nr próbki Sample no.	Stan dostawy Delivery condition	Twardość HV 0,5 Hardness HV 0.5	Odchylenie standardowe Standard deviation
1	T4	65	1,52
2	T6	82	2,04

Na rys. 13 zestawiono zależności naprężenia od przemieszczenia profili w stanie dostawy T4 i T6.

Fig. 13 shows the relationship between stress and displacement of profiles in T4 and T6 delivery condition.



Rys. 13. Zestawienie wykresów zależności naprężenia od przemieszczenia profili aluminiowych w stanie dostawy T4 (1, 2, 3) oraz T6 (4, 5, 6)

Fig. 13. Summary of stress vs. displacement dependence diagrams for aluminium profiles in T4 (1, 2, 3) and T6 (4, 5, 6) delivery conditions

3.2. Badania gięcia profili w warunkach laboratoryjnych

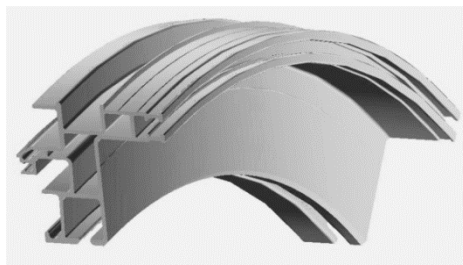
Po przeprowadzeniu badań numerycznych i wykonaniu narzędzi, przeprowadzono badania kształtowania profili aluminiowych w warun-

3.2. Testing of profile bending under laboratory conditions

After numerical tests and tool making, tests were carried out on the shaping of aluminium profiles in laboratory conditions on a three-roller

kach laboratoryjnych na trójrolkowej giętarcie. Badania prowadzono dla profili o długości 2 m, dlatego też wysokość wygiętego profilu powinna mieścić się w zakresie 10 mm +/- 2,25 mm. Model fizyczny badanego profilu pokazano na rys. 14. Do badań przygotowano 16 profili.

bender. The tests were carried out on profiles with a length of 2 m, therefore the height of a curved profile should be within the range of 10 mm +/- 2.25 mm. The physical model of the tested profile is shown in Fig. 14. Sixteen profiles were prepared for testing.



Rys. 14. Model profilu giętego

Fig. 14. A bent profile model

Giętarkę laboratoryjną oraz przekrój kształtowanego profilu pokazano na rys. 15.

The laboratory bender and the cross-section of the formed profile are shown in Fig. 15.



Rys. 15. Gięcie profilu na giętarcie laboratoryjnej

Fig. 15. Profile bending on a laboratory bender

3.2.1. Wyniki badań gięcia

Do badań użyto 8 profili aluminiowych: 4 profile były w stanie dostawy T4 i 4 w stanie dostawy T6. Wyniki gięcia trójrolkowego zestawiono w tab.5.

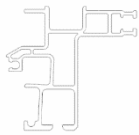
3.2.1. Bending test results

8 aluminium profiles were used for testing: 4 profiles were in the T4 delivery condition and 4 in the T6 delivery condition. The results of three-roll bending are shown in Tab. 5.

Tab. 5. Wyniki badań gięcia profili aluminiowych

Tab. 5. Test results of aluminium profile bending

Nr profilu <i>Profile no.</i>	Kształt profilu <i>Profile shape</i>	Stan dostawy <i>Delivery condition</i>	Przemieszczenie rolki [mm] <i>Roll displacement [mm]</i>	Wysokość ugięcia [mm] <i>Deflection height [mm]</i>
			<i>rzeczywiste / actual</i>	
1		T4	4,01	19,54
2			3,23	6,77
3			3,68	11,91
4			3,95	20,01

Nr profilu Profile no.	Kształt profilu Profile shape	Stan dostawy Delivery condition	Przemieszczenie rolki [mm] Roll displacement [mm]	Wysokość ugięcia [mm] Deflection height [mm]
			rzeczywiste / actual	
5		T6	4,00	1,58
6			4,00	1,92

Wygięcie profilu w stanie dostawy T6 okazało się niemożliwe w warunkach laboratoryjnych. Problemem była niewystarczająca moc giętarki.

Dla 2 profili w stanie dostawy T6 maksymalna wartość ugięcia, jaką uzyskano wyniosła poniżej 2 mm. Siła niezbędna do uzyskania wymaganego ugięcia profilu była poza maksymalnym zakresem pracy giętarki.

Porównano wartości skoku rolki z badań laboratoryjnych z wartościami, które uzyskano podczas prób symulacji numerycznych. W celu osiągnięcia wyniku zgodnego z założeniami w przypadku symulacji numerycznych wielkość przemieszczenia rolki została ustalona na 1,1 mm. Natomiast w badaniach laboratoryjnych, kształtując profil w stanie dostawy T4, z powodzeniem uzyskano żadaną wielkość ugięcia przy przemieszczeniu rolki o wartość 3,68 mm. Różnica ta wynikała z niedostatecznej sztywności giętarki, co było widoczne podczas badań. Niemniej jednak kształt narzędzi, który został zaprojektowany w badaniach numerycznych, pozwolił na uzyskanie poprawnych wyników badań laboratoryjnych.

3.2.2. Skanowanie profili

W celu zbadania odchyłek kształtowo-wymiarowych, profile poddano skanowaniu skanerem optycznym firmy GOM ATOS COMPACT 5M. Wyniki skanowanych profili zamieszczono na rys. 17 i 18. W celu określenia odkształcenia przekroju profilu, zeskanowano nieodkształcony profil i porównano go z przekrojem profilu po gięciu. Do badań porównawczych wybrano profile, dla których uzyskano wynik gięcia zgodny z założeniami. Wybrane profile przecięto w połowie długości gięcia. Profil odkształcony obrysowano na zielono, a wymiary nominalne/profil nieodkształcony zaznaczono kolorem czarnym.

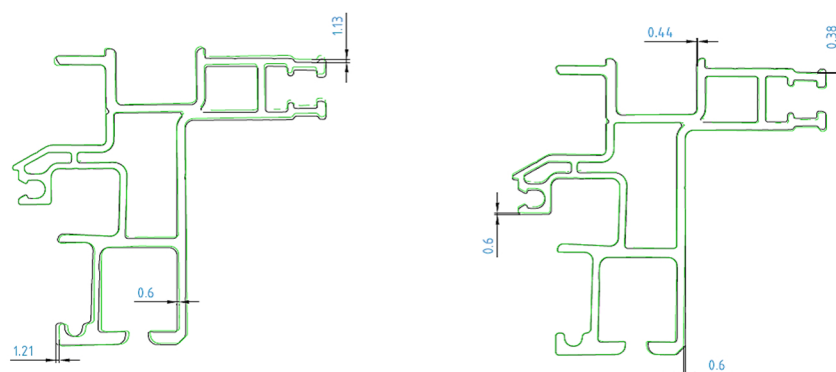
It was not possible to bend the profile in the T6 delivery condition under laboratory conditions. The problem was insufficient bender power.

For 2 profiles in the T6 delivery condition the maximum deflection value obtained was below 2 mm. The force necessary to obtain the required profile deflection was beyond the maximum range of the bending machine.

The roll stroke values from the laboratory tests were compared with the values obtained in numerical simulation tests. In order to achieve a result consistent with the assumptions for numerical simulations, the roll displacement value was set to 1.1 mm. However, in laboratory tests, forming the profile in the T4 delivery condition, the desired deflection amount was successfully obtained with the roll displacement by 3.68 mm. The difference was due to insufficient stiffness of the bending machine, which was evident during the tests. Nevertheless, the shape of the tools, which was designed in numerical studies, allowed obtaining the correct results of laboratory tests.

3.2.2. Profile scanning

In order to investigate shape and dimensional deviations, the profiles were scanned with the optical scanner GOM ATOS COMPACT 5M. The results of scanned profiles are shown in Fig. 17 and 18. In order to determine the deformation of the profile cross-section, a non-deformed profile was scanned and compared to a bent profile cross-section. For comparative tests profiles were selected for which the bending result was obtained consistent with the assumptions. Selected profiles were cut in the middle of the bending length. The deformed profile is outlined in green, and nominal dimensions /non-deformed profile are marked black.



Rys. 16. Przekrój profilu w stanie dostawy T4

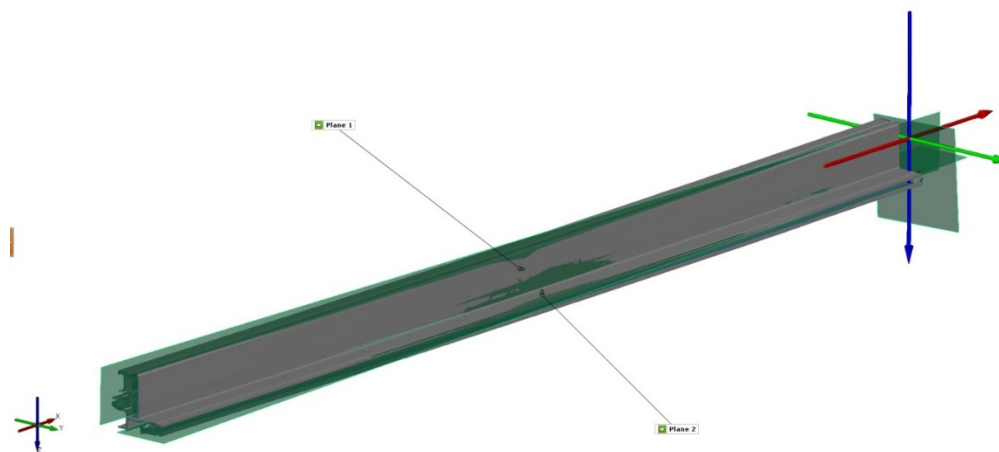
Fig. 16. Profile cross-section in T4 delivery condition

Na rys. 16 czerwoną kropką wskazano punkt bazowy, względem którego porównywano zmianę kształtu przekroju poprzecznego profilu. Nie wielkie odchyłki od wymiarów nominalnych, powstałe podczas gięcia są akceptowalne.

Skręcenie się profilu podczas kształtowania obrazuje rys. 17, który jest wynikiem skanowania i analizy w programie Atos Professional V8 I Gom Inspect V8 Professional.

In Fig. 16 a red dot indicates the base point, against which a change in the shape of the profile cross-section was compared. Minor deviations from the nominal dimensions, resulting from bending are acceptable.

Profile twisting during forming is shown in Fig. 17, which is the result of scanning and an analysis in the computer programme Atos Professional V8 I Gom Inspect V8 Professional.



Rys. 17. Widok profilu po skanowaniu wraz z płaszczyznami wzorcowymi

Fig. 17. The profile view after scanning along with master planes

Wylimitowanie lub zminimalizowanie kąta skręcania się profilu wymaga większej liczby badań oraz modyfikacji kształtu narzędzi.

Eliminating or minimizing the angle of profile twisting requires more testing and modification of the shape of the tools.

3.3. Badania materiałowe profili aluminiowych po procesie gięcia

Po przeprowadzeniu badań laboratoryjnych, wytypowano 2 poprawnie odkształcone profile, z których przygotowano próbki do badań rozciągania oraz badań twardości. Wyniki badań zamieszczono w tab. 6 i 7.

Tab. 6. Wyniki badań rozciągania próbek aluminiowych po gięciu

Tab. 6. Results of tests of aluminium sample stretching after bending

Numer próbki / Sample number	Stan dostawy / Delivery condition	S ₀ [mm ²]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
1	T4	57,63	101	195	26,9
2		56,09	99	194	26,0

Tab. 7. Wyniki badań twardości próbek aluminiowych po badaniach gięcia

Tab. 7. Results of hardness tests for aluminium samples after bending tests

Stan dostawy / rodzaj profilu Delivery status / profile type	Po gięciu / After bending	
	Twardość HV 0,5 Hardness HV 0.5	Odchylenie standardowe Standard deviation
T4	71	1,95

Wyniki badań rozciągania próbek po gięciu są zbliżone z wynikami próbek przed gięciem. Natomiast w przypadku pomiarów twardości, uzyskano ok. 10% wzrost twardości próbek po procesie gięcia. Możliwe jest gięcie profilu w stanie dostawy T4 przy skoku rolki ok. 3,7 mm.

3.3. Material testing of aluminium profiles after bending

After laboratory tests, 2 correctly deformed profiles were selected, which were used to prepare samples for tensile and hardness tests. Test results are provided in Tables 6 and 7.

The results of tensile tests of samples after bending are similar to results of samples before bending. However, in the case of hardness measurements a 10% increase in hardness was achieved after the bending process. It is possible to bend a profile in the T4 delivery condition with a roll stroke of approx. 3.7 mm.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Udowodniono, że metodami MES można wykonać symulacje różnych procesów gięcia profili aluminiowych, określić metodę odpowiednią dla danego zadania, a następnie przebadać dany sposób kształtowania w warunkach laboratoryjnych.

Dokonano weryfikacji wyników badań numerycznych i eksperymentalnych. Pomimo różnic zastosowanie metod MES w połączeniu z badaniami laboratoryjnymi pozwala maksymalizować zyski poprzez trafny dobór technologii do zadania oraz minimalizować koszty, poprzez efektywne projektowanie narzędzi.

4. FINAL CONCLUSIONS

It was proven that with the use of FEM simulations of various processes of aluminium profile bending can be carried out, the method appropriate for a given task can be determined and subsequently a given method of forming in laboratory conditions can be examined.

The results of numerical and experimental tests were verified. Despite the differences, the use of FEA methods in combination with laboratory tests makes it possible to maximize profits by selecting the right technology for the task and minimize costs through effective tool design.

W dalszej części badań planuje się wykonanie badań dla większej serii profili, jak również przeprowadzenie badań w warunkach przemysłowych.

Further research plans include performance of tests for a larger series of profiles and testing in industrial conditions.

PODZIĘKOWANIA

Przedstawione wyniki prac zostały sfinansowane ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Inteligentny Rozwój 2014–2020. Poddziałanie 1.1.1. „Badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane przez przedsiębiorstwa”. Projekt „Opracowanie technologii wytwarzania belki konstrukcji nośnej dla pojazdów ciężarowych i transportu kolejowego” Nr POIR.01.01.01-00-0302/16.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research results presented in this publication are financed by European Regional Development Fund within smart Growth Operational Programme 2014–2020, Objective 1.1.1. “Increased R&D activity of enterprises”. Project: “Opracowanie technologii wytwarzania belki konstrukcji nośnej dla pojazdów ciężarowych i transportu kolejowego” No. POIR.01.01.01-00-0302/16.



LITERATURA

- [1] Welo T., F. Wideroe. 2010. “Precision bending of high-quality components for volume applications”. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 20: 2100–2110.
- [2] Clausen A.H., O.S. Hopperstad, M. Langseth. 2000. “Stretch bending of aluminium extrusions for car bumpers”. *Journal of Materials Processing Technology* 102: 241–248.
- [3] Chatti S., M. Hermes, A.E. Tekkaya, M. Kleiner. 2010. “The new TSS bending proces: 3D bending of profiles with arbitrary cross-sections”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 59: 315–318.
- [4] Muller K.B. 2006. “Bending of extruded profiles during extrusion process”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46: 1238–1242.
- [5] Spoorenberg R.C., H.H. Snijder, J.C.D. Hoenderkamp. 2011. “Finite element simulations of residual stress in roller bent flange sections”. *Journal of Constructional Steel Research* 67: 39–50.
- [6] Shim D., K. Kim, K. Lee. 2016. “Double-stage forming using critical pre-bending radius in roll bending of pipe with rectangular cross-section”. *Journal of Materials Processing Technology* 236: 189–203.
- [7] Dyja K., J. Adamus. 2014. “Badania nad doborem smarów technologicznych do tłoczenia blach aluminiowych i tytanowych. Research on selection of technological lubricants for forming aluminium and titanium sheets”. *Tribologia* 3: 19–28.

REFERENCES

- [1] Welo T., F. Wideroe. 2010. “Precision bending of high-quality components for volume applications”. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 20: 2100–2110.
- [2] Clausen A.H., O.S. Hopperstad, M. Langseth. 2000. “Stretch bending of aluminium extrusions for car bumpers”. *Journal of Materials Processing Technology* 102: 241–248.
- [3] Chatti S., M. Hermes, A.E. Tekkaya, M. Kleiner. 2010. “The new TSS bending proces: 3D bending of profiles with arbitrary cross-sections”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 59: 315–318.
- [4] Muller K.B. 2006. “Bending of extruded profiles during extrusion process”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46: 1238–1242.
- [5] Spoorenberg R.C., H.H. Snijder, J.C.D. Hoenderkamp. 2011. “Finite element simulations of residual stress in roller bent flange sections”. *Journal of Constructional Steel Research* 67: 39–50.
- [6] Shim D., K. Kim, K. Lee. 2016. “Double-stage forming using critical pre-bending radius in roll bending of pipe with rectangular cross-section”. *Journal of Materials Processing Technology* 236: 189–203.
- [7] Dyja K., J. Adamus. 2014. “Badania nad doborem smarów technologicznych do tłoczenia blach aluminiowych i tytanowych. Research on selection of technological lubricants for forming aluminium and titanium sheets”. *Tribologia* 3: 19–28.