



Kształtowanie elementów cienkościennych z zastosowaniem strefowego podgrzewania laserowego

Shaping thin-walled elements using zone laser heating

(1) Tomasz Gądek, (2) Łukasz Nowacki*

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

Informacje o artykule

Data przyjęcia: 14.06.2017
Data recenzji: 26.07.2017
Data akceptacji: 29.09.2017

Wkład autorów

- (1) Autor koncepcji, metod, przeprowadzonych badań
- (2) Autor założeń, metod przeprowadzonych badań

Streszczenie

Dotychczasowy sposób wytwarzania wyrobów w postaci dyfuzorów o zmiennym przekroju polega na tłoczeniu na prasie dwóch odpowiednio ukształtowanych wytłoczek, a następnie ich spawaniu. W efekcie powstaje detal łączony w dwóch miejscach. W projekcie podjęto próbę opracowania innej technologii kształtowania dyfuzorów, która pozwoli na wyeliminowanie przynajmniej jednego ze spawów łączącego dwa oddzielne elementy dyfuzora. W artykule przedstawiono wyniki badań gięcia rurek na zimno wraz z podgrzewaniem laserem diodowym o mocy 3,6 kW oraz o promieniu lasera 8x30 mm. Badania te stanowiły wytyczne do zaprojektowania i wykonania stanowiska badawczego składającego się z manipulatora oraz urządzenia sterującego ruchem obrotowym głowicy lasera. Stanowisko zaprojektowano w taki sposób, aby głowica lasera mogła obracać się względem osi kształtowanego detalu. Takie rozwiązanie umożliwia podgrzewanie kształtowanego wyrobu nie tylko punktowo, ale również na jego obwodzie. Pozwoli ono na uzyskanie równomiernego rozkładu temperatury w miejscu gięcia kształtowanego elementu, co bezpośrednio wpływa na zwiększenie jego plastyczności. Na nowo powstałym stanowisku przeprowadzono próby gięcia na gorąco zarówno profili stożkowych, jak i rurek. Kształtowane elementy w postaci rur wypełniano piaskiem kwarcowym, natomiast w przypadku profili jako wypełnienie zastosowano specjalnie skonstruowany trzpień wielosegmentowy. Wyniki z przeprowadzonych prób technologicznych zamieszczono w drugiej części artykułu. W dalszej części prac przewiduje się kontynuację badań gięcia z podgrzewaniem laserowym strefy kształtowanej zarówno wyrobów okrągłych (rura), jak i o zmiennym przekroju (dyfuzor).

Słowa kluczowe: gięcie, podgrzewanie laserowe, rura, profil cienkościenny, technologia kształtowania laserowego

Article info

Received: 14.06.2017
Reviewed: 26.07.2017
Accepted: 29.09.2017

Authors' contribution

- (1) Author of concepts, methods, conducted research
- (2) Author of assumptions, methods, conducted research

Abstract

The current method of manufacturing products in the form of diffusers with variable cross-section is based on press forming two drawpieces of appropriate shape and then welding them. In effect, a detail joined in two places is created. This project undertakes to develop alternate diffuser shaping technology, which will make it possible to eliminate at least one of the welds joining two separate diffuser elements. This article presents the results of cold bending tests of tubes with heating via 3.6 kW diode laser, emitting an 8x30 mm laser beam. These tests laid the groundwork for guidelines for designing and building a testing station consisting of a manipulator and device controlling the rotation of the laser head. The station was designed so that the laser head can rotate relative to the axis of the shaped detail. Such a solution does not only allow for point heating of the shaped product, but also for heating over its circumference. This makes it possible to achieve uniform temperature distribution at the bending point of the shaped element, which directly increases its plasticity. Hot bending tests of both conical profiles and tubes were performed at the newly created station. Shaped elements, in the form of tubes, were filled with quartz sand, and in the case of profiles, a specially designed multi-segment mandrel was applied as the filling. The results of performed technological trials are given in the second part of the article. In further work, it is planned to continue

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 61 657 05 55; fax: +48 64 657 07 21; e-mail: nowacki@inop.poznan.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 61 657 05 55; fax: +48 64 657 07 21; e-mail: nowacki@inop.poznan.pl

bending tests with laser heating of the shaped zone, for both round products (tube) and products with variable cross-section (diffuser).

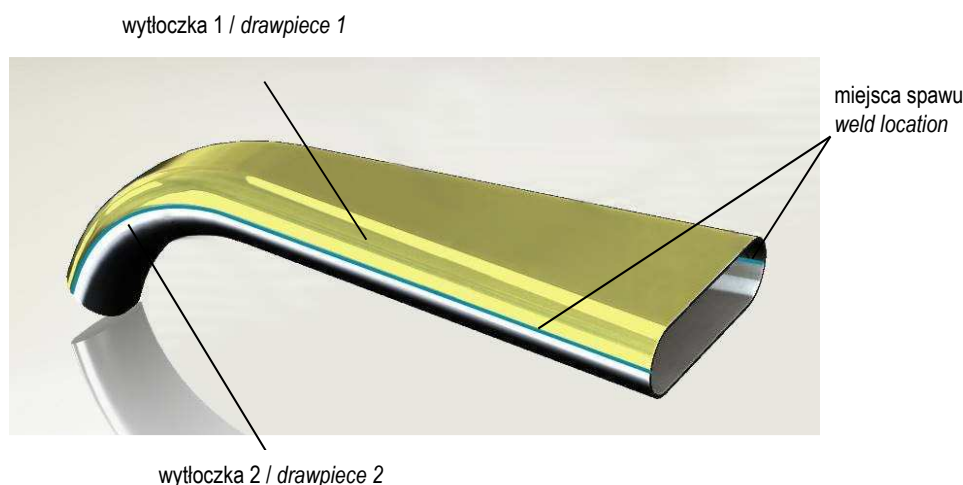
Keywords: *bending, laser heating, tube, thin-walled profiles, laser forming technology*

1. WSTĘP

Obecnie wyroby w postaci dyfuzorów o zmiennym przekroju uzyskuje się metodą tłoczenia dwóch odpowiednio ukształtowanych na prasie wytłoczek, a następnie ich spawania. W efekcie powstaje detal łączony w dwóch miejscach, jak na rys. 1.

1. INTRODUCTION

Currently, products in the form of diffusers with variable cross-section are obtained using the method of press forming two drawpieces, followed by their welding. In effect, a detail joined in two places is created, as shown in Fig. 1.



Rys. 1. Dyfuzor wykonywany z dwóch wytłoczek

Fig. 1. Diffuser made from two drawpieces

W literaturze odnajdujemy szereg artykułów dotyczących tłoczenia na zimno oraz na gorąco [1–5]. Istnieje szereg prac dotyczących kształtowania poprzez zastosowanie samego podgrzewania laserowego [6–10]. W ramach projektu podjęto próbę opracowania innowacyjnej technologii laserowego kształtowania cienkościennych profili wspomaganym mechanicznie, co pozwoli na wyeliminowanie przynajmniej jednego ze spawów, łączącego ze sobą wytłoczki dyfuzora.

W artykule przedstawiono wyniki badań gięcia elementów „handlowych” ze stali 1.4301 w postaci rury o przekroju okrągłym i grubości ścianki równej 1 mm. W celu kształtowania rurek o grubości poniżej 1 mm, niezbędne było przeprowadzenie prób technologicznych zgniatania obrotowego umożliwiających uzyskanie wyrobów cienkościennych o grubości ścianki ok. 0,7 mm. Celem badań gięcia wyrobów o przekroju okrąg-

A series of articles concerning cold and hot press forming can be found in the literature [1–5]. There is a series of works concerning shaping through the application of laser heating by itself [6–10]. As part of the project, an attempt was made to develop innovative technology of laser shaping of mechanically supported thin-walled profiles, which will make it possible to eliminate at least one of the welds joining the diffuser's drawpieces.

This article presents the results of bending tests of “commercial” elements made of 1.4301 steel in the form of a tube with round cross-section and wall thickness equal to 1 mm. In order to shape tubes with a thickness below 1 mm, it was necessary to conduct technological roll forming tests, making it possible to obtain thin-walled products with a wall thickness of approx. 0.7 mm. The purpose of bending tests on products with round cross-section was

łym było uzyskanie wytycznych, które posłużyły do zaprojektowania manipulatora do kształtowania z podgrzewaniem m.in. profili stożkowych.

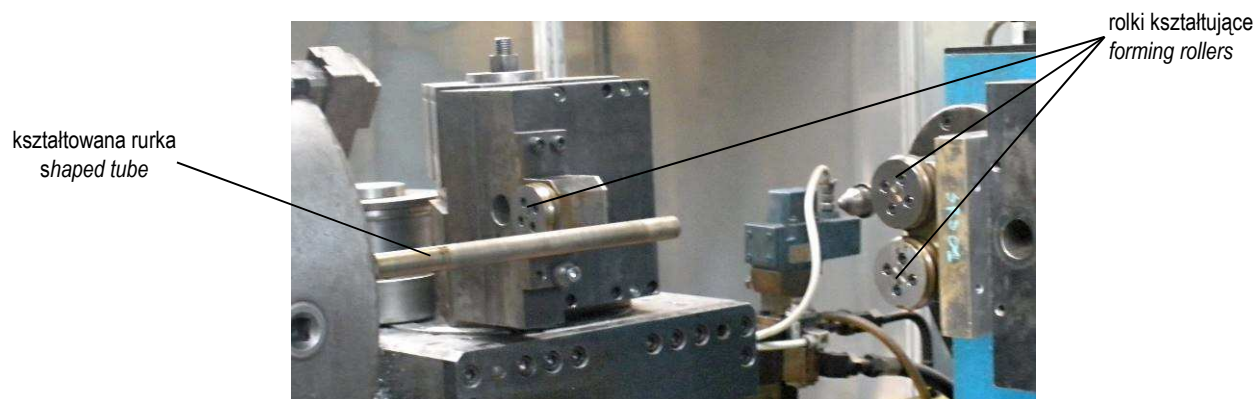
to obtain guidelines that would serve for designing of the manipulator for shaping of conical profiles, among others, with heating.

2. WYNIKI BADAŃ

Badania zgniatania obrotowego przeprowadzono na wyoblarko-zgniatarce za pomocą przyrządu trójrolkowego (rys. 2). Przygotowano 16 rurek o grubości ścianki 1 mm i długości 230 mm, które poddano badaniom metodą zgniatania obrotowego. Prędkość obrotowa wzornika wynosiła 250 obr/min, a posuw wzdłużny suportów – 150 mm/min.

2. TEST RESULTS

Rotary extrusion tests were performed on a spinning-roll forming machine by means of a tri-roller tool (Fig. 2). 16 tubes with a wall thickness of 1 mm and length of 230 mm were prepared and tested by roll forming. The temple's revolutions amounted to 250 rpm, with longitudinal slide advance – 150 mm/min.



Rys. 2. Stanowisko badawcze zgniatania obrotowego

Fig. 2. Roll forming testing station

Wyniki badań dotyczących zgniatania obrotowego przedstawiono w tab. 1.

Test results concerning roll forming are presented in Tab. 1.

Tab. 1. Grubość ścianki po zgniataniu obrotowym

Tab. 1. Wall thickness after roll forming

Lp. / Item	Grubość ścianki po zgniataniu [mm] Wall thickness after roll forming [mm]					Średnia wartość [mm] Mean value [mm]
	Nr pomiaru / Measurement no.					
	1	2	3	4	5	
1	0,75	0,74	0,73	0,73	0,70	0,73
2	0,70	0,71	0,68	0,69	0,69	0,69
3	0,71	0,68	0,67	0,70	0,71	0,69
4	0,74	0,70	0,69	0,68	0,71	0,70
5	0,76	0,74	0,72	0,73	0,72	0,73

Tak otrzymane próbki w postaci cienkościennych rurek wykorzystano w badaniach gięcia. Dodatkowo prowadzono badania gięcia rur handlowych o grubości ścianki 1 mm. Badania przeprowadzono na urządzeniu przedstawionym na rys. 3. Próbkę gięto na kąt 45° , 60° i 90° .

Samples, in the form of thin-walled tubes, obtained in this manner were used in bending tests. In addition, bending tests were performed on commercial tubes with a wall thickness of 1 mm. Tests were conducted on the device presented in Fig. 3. Samples were bent to angles 45° , 60° , and 90° .



a)



b)

Rys. 3. Badanie gięcia rurek: a) rurka przed gięciem, b) rurka po gięciu

Fig. 3. Tube bending tests: a) tube before bending, b) tube after bending

Rurki gięto po wypełnieniu ich piaskiem kwarcowym o ziarnistości 1 mm, jak również bez wypełnienia. Efekty gięcia przedstawiono na rys. 4. Natomiast na rys. 5 przedstawiono w formie graficznej uzyskane pocienienie ścianki na promieniu zewnętrznym dla rurek giętych na kąt 60° .

Tubes were bent after being filled with quartz sand with 1 mm grain coarseness, and without filling. The effects of bending are presented in Fig. 4. Fig. 5 presents the wall thinning obtained on the exterior radius for tubes bent to an angle of 60° , in graphical form.



a)



b)

Rys. 4. Rurki po gięciu: a) bez wypełnienia, b) wypełnione piaskiem kwarcowym

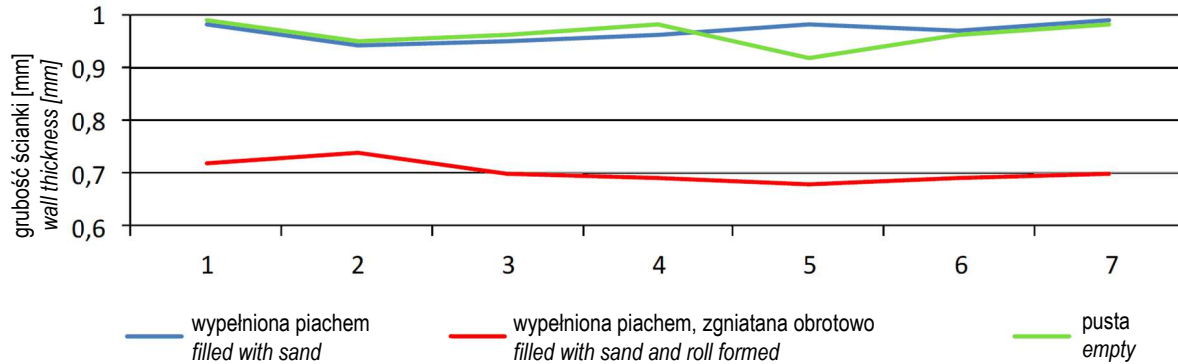
Fig. 4. Tubes after bending: a) without filling, b) filled with quartz sand

Można zaobserwować (rys. 4a), że rurki bez wypełnienia przy kącie gięcia 60° , w miejscu gięcia, odkształcały się w sposób niekontrolowany. Niekontrolowane odkształcenie widoczne jest bardziej przy kącie gięcia 90° . Zastosowanie wypeł-

It can be observed (Fig. 4a) that tubes without filling, at a 60° bending angle, were deformed in an uncontrolled manner at the bending point. This uncontrolled deformation is even more visible at a sand filling significantly improved the shape of

nienia w postaci piasku kwarcowego znacznie poprawiło kształt rurki w miejscu jej gięcia. Rurki charakteryzowały się łagodnym promieniem, niezależnie od kąta gięcia (rys. 4b).

the bending angle of 90°. The application of quartz tube at its bending point. Tubes were characterized by a mild radius, regardless of bending angle (Fig. 4b).



Rys. 5. Rozkład grubości ścianki na promieniu zewnętrznym giętej rurki

Fig. 5. Wall thickness distribution on exterior radius of bent tube

Jak można zauważyć, piasek stosowany do wypełnienia rur nie wpłynął na wielkość pocienienia ścianki rurki, natomiast miał on wpływ na jej kształt w miejscu gięcia. Pocienienie ścianek rurek w miejscu gięcia wynosiło około 10% w porównaniu do grubości materiału wyjściowego.

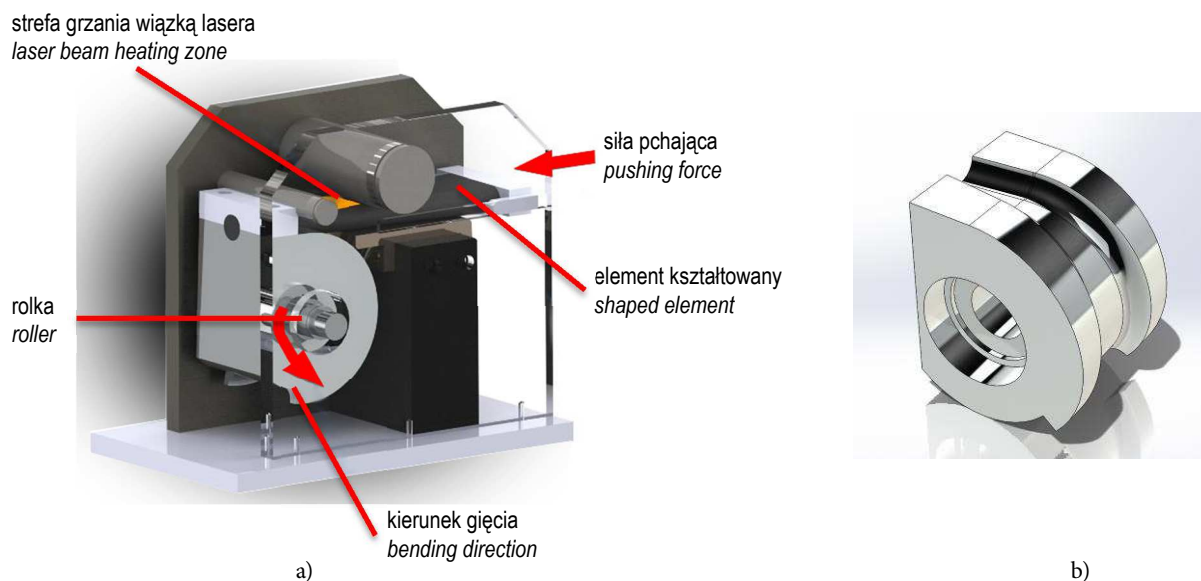
Przeprowadzono również stacjonarne badania gięcia rurek z podgrzewaniem laserowym, jednak miejscowe grzanie jedynie na powierzchni 8x30 mm powodowało, że znaczna ich część ulegała zniszczeniu. Wyniki dotychczasowych badań posłużyły jako wytyczne przy konstruowaniu nowego stanowiska badawczego gięcia rur oraz profili o zmiennym przekroju, przy zastosowaniu miejscowego podgrzewania laserowego zarówno od góry, jak i na obwodzie.

Zaprojektowano i wykonano prototypowe stanowisko do badań gięcia w taki sposób, aby głowica lasera mogła obracać się względem osi kształtowanego detalu [11]. Wpłynęło to pośrednio na uzyskanie równomiernego rozkładu temperatury w miejscu gięcia kształtowanego elementu, a bezpośrednio na zwiększenie jego plastyczności. Gięcie wyrobu odbywa się na manipulatorze (rys. 6a) poprzez przyłożenie siły wzdłuż osi wyrobu, a jego kształt odwzorowuje się na rolce (rys. 6b).

As one can observe, the sand used to fill tubes did not affect the degree of the tube's wall thinning, however it did affect its shape at the bending point. Wall thinning of tubes at the bending point amounted to approx. 10% relative to the thickness of the starting material.

Stationary tube bending tests with laser heating were also performed, however local heating on a surface of only 8x30 mm caused a significant number of tubes to be destroyed. The results of tests conducted until now served as the groundwork for guidelines for designing the new testing station for bending of tubes and profiles of variable cross-section with the application of local laser heating, both from the top and on the circumference.

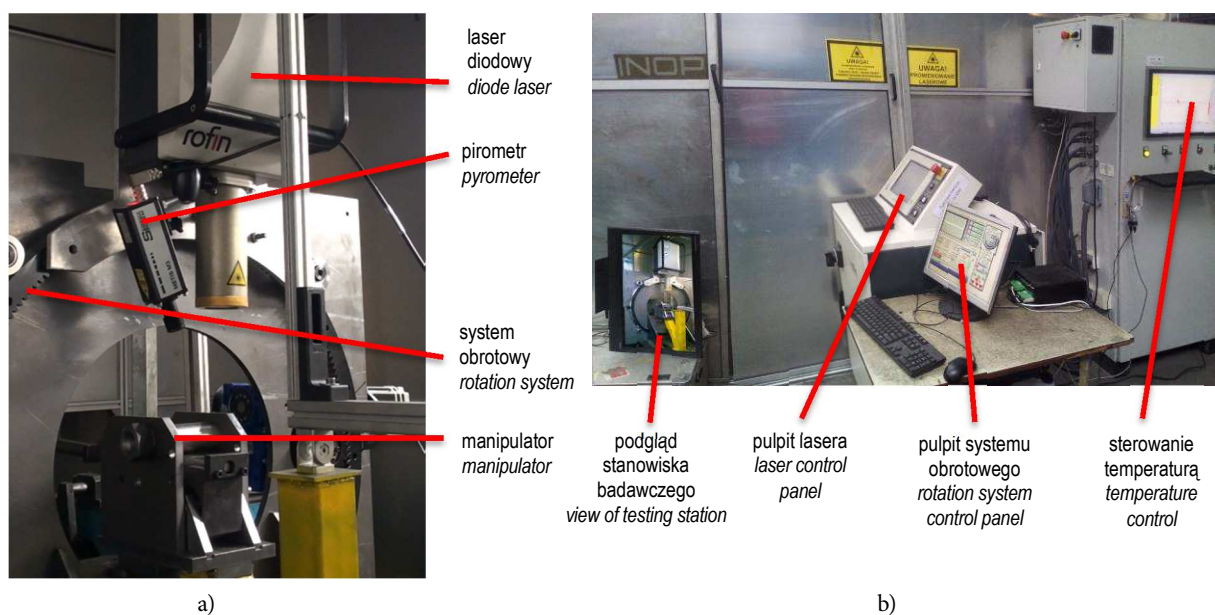
A prototype bending testing station was designed and built in such a manner that the laser head could rotate relative to the axis of the shaped detail [11]. This indirectly made it possible to obtain a uniform temperature distribution at the bending point of the shaped element, and directly increased its plasticity. Product bending takes place on the manipulator (Fig. 6a) by applying force along the product's axis, and its shape is reflected on the roller (Fig. 6b).



Rys. 6. Manipulator do badań gięcia z podgrzewaniem: a) widok ogólny, b) rolka kształtowa manipulatora
Fig. 6. Manipulator for bending tests with heating: a) general view, b) manipulator's shaping roller

Na rys. 7 przedstawiono nowo powstałe stanowisko badawcze gięcia z podgrzewaniem.

Fig. 7 presents the newly created testing station for bending with laser heating.



Rys. 7. Stanowisko do kształtowania z podgrzewaniem laserowym, a) widok części roboczej, b) stanowisko sterowania i kontroli procesu

Fig. 7. Station for shaping with laser heating, a) view of working part, b) control and process control station

Część robocza stanowiska składała się m.in.: z manipulatora, urządzenia do kontroli temperatury wraz z pirometrem oraz lasera diodowego dużej mocy 3,6 kW. Ruch obrotowy głowicy lasera kontrolowany był za pomocą programu Mach3. Sterowanie procesem podgrzewania wraz z kontrolą temperatury oraz ruchem głowicy lasera przedstawiono na rys. 7b. Na tak przygo-

The working part of the station consisted of, among other things: the manipulator, temperature control device with pyrometer and 3.6 kW high-power diode laser. The laser head's rotation was controlled by means of Mach3 software. Heating process control as well as temperature control and laser head movement control are presented in Fig. 7b. Bending tests of tubes and profiles with laser

towanym stanowisku kontynuowano próby gięcia rurek oraz profili z podgrzewaniem laserowym. Gięcie rurek prowadzono przy następujących parametrach: posuw 15 mm/min i temperatura grzania 900°C [12–13].

Do podgrzewania zastosowano laser diodowy o mocy 3,6 kW i długości fali 940–980 nm. Kształtowane wyroby podgrzewane były na powierzchni górnej, gdzie wpływ oddziaływania ciepła wiązki lasera obejmował ok. 45% powierzchni wyginanej. Rurki podczas gięcia były wypełnione piaskiem kwarcowym o ziarnistości 1 mm. Wyroby uzyskane w trakcie badań przedstawiono na rys. 8 i 9.

heating were continued on the station prepared in this manner. Tube bending was performed at the following parameters: advance 15 mm/min and heating temperature 900°C [12–13].

A 3.6 kW diode laser with 940–980 nm wavelength was applied for heating. Shaped products were heated on their top surface, where the influence of the laser beam's heat covered approx. 45% of the bent surface. During bending, tubes were filled with quartz sand with 1 mm grain coarseness. Products obtained during tests are presented in Fig. 8 and 9.



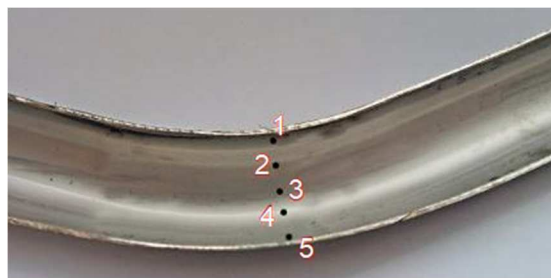
Rys. 8. Rurka gięta na zimno
Fig. 8. Cold-bent tube



Rys. 9. Rurka gięta z podgrzewaniem laserowym
Fig. 9. Tube bent with laser heating

Podczas kształtowania na zimno, w miejscu gięcia powstało spłaszczenie rurki na wewnętrznym jej promieniu. W przypadku zastosowania podgrzewania laserem diodowym problem ten nie występował. Wyniki pomiarów grubości ścianki w obszarze gięcia przedstawiono w tab. 2, a miejsca pomiarów pokazano na rys. 10.

During cold shaping, the tube was flattened on its interior radius at the bending point. In the case where diode laser heating was applied, this problem did not occur. The results of wall thickness measurements in the bending area are presented in Tab. 2, and measuring points are shown in Fig. 10.



Rys. 10. Punkty pomiarowe
Fig. 10. Measuring points

Tab. 2. Grubości ścianek wyrobów giętych z podgrzewaniem laserowym
 Tab. 2. Wall thicknesses of products bent with laser heating

Lp. / Item	Nr pomiaru / Measurement no.				
	1 (r _{wew.}) [mm]	2 [mm]	3 [mm]	4 [mm]	5 (r _{zew.}) [mm]
Próbka 1/ Sample 1	1,00	0,98	0,95	0,90	0,89
Próbka 2/ Sample 2	1,05	0,99	0,93	0,87	0,86
Próbka 3/ Sample 3	1,04	0,98	0,96	0,91	0,90
Próbka 4/ Sample 4	1,02	0,99	0,94	0,92	0,90
Próbka 5/ Sample 5	1,02	1,00	0,95	0,89	0,85
Próbka 6/ Sample 6	1,04	0,98	0,90	0,88	0,84
Próbka 7/ Sample 7	1,02	0,97	0,93	0,92	0,90
Próbka 8/ Sample 8	1,02	0,98	0,94	0,90	0,88
Średnia / Mean	1,03	0,98	0,94	0,90	0,88

Przebieg zmian temperatury w trakcie procesu oscylował w granicach $900 \pm 7^\circ\text{C}$. Nieznaczne wahania temperatury powstały wskutek zwiększonej absorpcji światła lasera spowodowanej zabrudzeniem powierzchni kształtowanego wyrobu.

W celu wykonania badań kształtowania profili stożkowych wytworzono półprodukt z blachy o grubości 0,9 mm, który przedstawiono na rys. 11. Półprodukt wykonano metodą gięcia, a krawędzie zespawano doczołowo na całej długości. Przed próbami technologicznymi profile pomierzono wg schematu przedstawionego na rys. 12, a wyniki pomiarów zamieszczono w tab. 3.

The progression of temperature changes over the course of the process oscillated within the range of $900 \pm 7^\circ\text{C}$. Slight temperature fluctuations were due to increased laser light absorption caused by contamination of the shaped product's surface.

In order to perform shaping tests of conical profiles, a semi-product was made of sheet with a thickness of 0.9 mm, presented in Fig. 11. The semi-product was made by means of bending, and edges were butt welded over their entire length. Prior to technological tests, profiles were measured according to the diagram presented in Fig. 12, and results of measurements are given in Tab. 3.

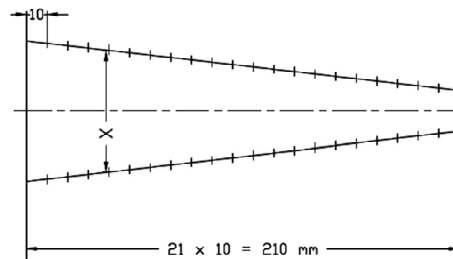


Rys. 11. Półprodukt do badań gięcia – profil stożkowy
 Fig. 11. Semi-product for bending tests – conical profile

Tab. 3. Wyniki pomiarów profili
 Tab. 3. Profile measurement results

Wysokość od dna [mm] Height from bottom [mm]	Szerokości [mm] Widths [mm]			Maks. różnica szer. [mm] Max. width difference [mm]
	Profil 1 Profile 1	Profil 2 Profile 2	Profil 3 Profile 3	
10	68,844	68,169	69,586	1,417
20	66,513	66,668	66,938	0,425

Wysokość od dna [mm] <i>Height from bottom [mm]</i>	Szerokości [mm] <i>Widths [mm]</i>			Maks. różnica szer. [mm] <i>Max. width difference [mm]</i>
	Profil 1 <i>Profile 1</i>	Profil 2 <i>Profile 2</i>	Profil 3 <i>Profile 3</i>	
30	64,119	64,258	64,621	0,502
40	62,002	62,285	62,338	0,336
50	59,680	59,501	59,969	0,468
60	57,537	57,299	57,737	0,438
70	55,193	55,982	55,188	0,794
80	53,057	52,553	52,974	0,504
90	50,775	50,283	50,960	0,677
100	48,378	47,862	48,285	0,516
110	45,954	45,552	46,073	0,521
120	43,988	43,107	43,930	0,881
130	41,983	40,902	41,732	1,081
140	38,943	38,609	39,235	0,626
150	36,598	36,217	37,032	0,815
160	34,327	33,707	34,687	0,980
170	31,944	31,59	32,139	0,549
180	29,639	29,752	29,813	0,174
190	27,289	26,739	27,477	0,738
200	25,023	24,273	24,877	0,750
210	22,015	22,152	22,695	0,680



Rys. 12. Schemat pomiaru profili

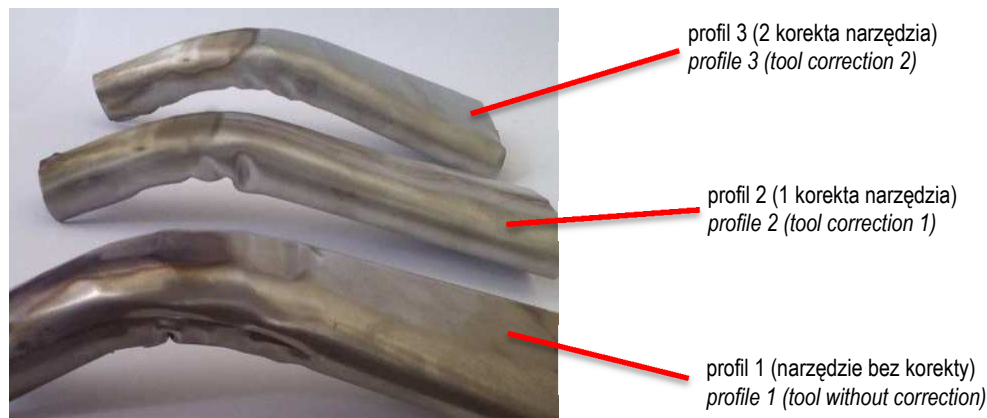
Fig. 12. Profile measurement diagram

Próby gięcia profili przeprowadzono przy posuwie 15 mm/min i temperaturze 900°C. W tym przypadku również zastosowano grzanie elementu od góry. Przy gięciu profili, zamiast wypełniania w postaci piasku kwarcowego, zastosowano specjalnie skonstruowany trzpień dzielony, który umieszczono wewnątrz profilu. Kształtowany element gięty był na rolce, której kształt wewnętrzny odpowiadał kształtowi wygiętego profilu.

Przeprowadzone badania wskutek niedokładności wymiarowej wykonania półproduktu wykazały konieczność wprowadzenia korekty rolki, na której gięty był profil. Zmiany na krawędzi rolki umożliwiły uzyskanie wyrobu z mniejszymi wadami (rys. 13); jednak konieczne będą dalsze prace związane z korektą narzędzi.

Profile bending tests were performed at an advance of 15 mm/min and temperature of 900°C. In this case, heating of the element from the top was also applied. During bending of profiles, instead of quartz sand filling, a specially designed segmented mandrel was placed inside the profile. The shaped element was bent on a roller whose interior shape corresponded to the shape of the bent profile.

As a result of the dimensional inaccuracy of the semi-product, conducted tests showed the need to introduce corrections to the roller used to bend the profile. Changes on the roller's edges made it possible to obtain a product with lesser defects (Fig. 13); however further work related to tool correction will be necessary.



Rys. 13. Widok profili po badaniach gięcia (bez korekty i po wprowadzeniu korekty narzędzi)

Fig. 13. View of profiles after bending tests (without correction and after tool correction)temperature

Wyroby widoczne na rys. 13 charakteryzują się różną jakością wykonania. W przypadku profilu 1 widoczne są ślady po narzędziu (rolka kształtująca) na krawędzi profilu oraz pofałdowanie profilu na promieniu wewnętrznym. W przypadku profilu 2 oraz 3, gdzie stopniowo wprowadzano modyfikację rolki kształtującej, nie zaobserwowano śladów na krawędzi profilu, a pofałdowanie na wewnętrznym promieniu uległo znacznemu zmniejszeniu.

W tab. 4 zamieszczono wyniki pomiarów grubości ścianki na promieniu zewnętrznym wraz ze schematem pomiarowym przedstawionym na rys. 14.

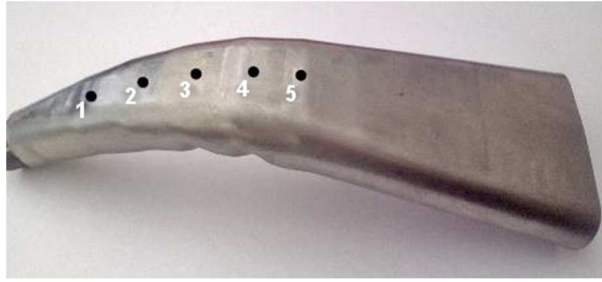
The products shown in Fig. 13 are characterized by varying quality of workmanship. In the case of profile 1, traces of the tool (shaping roller) are visible on the profile's edge, and folds are visible on the profile's interior radius. In the case of profile 2 and 3, where modifications of the shaping roller were introduced gradually, no traces were observed on the profile's edge, and folds on the interior radius were significantly reduced.

Tab. 4 contains the results of wall thickness measurements on the exterior radius along with the measurement diagram presented in Fig. 14.

Tab. 4. Wyniki pomiarów grubości ścianki promienia zewnętrznego

Tab. 4. Results of wall thickness measurements on exterior radius

Lp. / Item	Nr pomiaru / Measurement no.				
	1 [mm]	2 [mm]	3 [mm]	4 [mm]	5 [mm]
Profil 1 / Profile 1	0,85	0,77	0,76	0,78	0,81
Profil 2 / Profile 2	0,86	0,87	0,87	0,86	0,89
Profil / Profile 3	0,86	0,89	0,88	0,88	0,88
Profil 4 / Profile 4	0,9	0,87	0,88	0,87	0,89
Profil 5 / Profile 5	0,9	0,55	0,87	0,89	0,9
Profil 6 / Profile 6	0,86	0,8	0,75	0,74	0,84
Profil 7 / Profile 7	0,87	0,81	0,77	0,79	0,86
Średnia / Mean	0,87	0,79	0,83	0,83	0,87



Rys. 14. Miejsca pomiaru grubości ścianki

Fig. 14. Wall thickness measuring points(direction)

Podczas prób gięcia zaobserwowano, że maksymalne uzyskane pocienienie grubości ścianki profilu stożkowego wynosiło ok. 12%.

3. PODSUMOWANIE

Przeprowadzono badania mające na celu opracowanie założeń konstrukcji manipulatora. Wykonano urządzenie do wspomagania kształtowania, które umożliwia gięcie elementów typu rurka oraz profil stożkowy. Przeprowadzono badania gięcia rur na zimno oraz z podgrzewaniem laserowym. Wykonano również wstępne badania kształtowania profili. Dotychczasowe badania rokują możliwość uzyskania poprawnego kształtu giętych elementów.

PODZIĘKOWANIA

Przedstawione wyniki badań finansowane są w ramach projektu nr PBS3/A5/47/2015, Programu Badań Stosowanych pt.: „Laserowe formowanie cienkościennych profili wspomagane mechanicznie”, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

LITERATURA

- [1] Stachowicz F., T. Trzepieciński, T. Pieja. 2010. „Warm forming of stainless steel sheet”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 10: 85–94.
- [2] Iguchi T., T. Ujio. 2010. „Effect of imposing temperature gradient in stretch forming process for ferritic stainless steel sheets”. W *Proceedings of 10th international conference on numerical methods in*

Over the course of bending tests, it was observed that the maximum wall thinning of the conical profile amounted to approx. 12%.

3. CONCLUSIONS

Tests intended to determine assumptions for manipulator design were conducted. A device for supporting shaping was made, enabling bending of tube and conical profile elements. Cold tube bending tests and tests with laser heating were performed. Preliminary profile shaping tests were also performed. The tests performed until now are promising with regard to the possibility of obtaining the proper shape of bent elements.

ACKNOWLEDGEMENTS

The presented test results are financed under project no. PBS3/A5/47/2015 of the Applied Research Program, titled: „Laser shaping of thin-walled, mechanically supported profiled”, financed by the National Centre for Research and Development.

REFERENCES

- [1] Stachowicz F., T. Trzepieciński, T. Pieja. 2010. „Warm forming of stainless steel sheet”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 10: 85–94.
- [2] Iguchi T., T. Ujio. 2010. „Effect of imposing temperature gradient in stretch forming process for ferritic stainless steel sheets”. In *Proceedings of 10th international conference on numerical methods in*

- industrial forming processes, Pohang, 13-17.07.2010, 1193-1200. Melville: American Institute of Physics.*
- [3] Pieja T. 2009. „Kształtowanie na półgorąco wytłoczek ze stali odpornej na korozję”. *Praca doktorska*, Rzeszów: Politechnika Rzeszowska.
- [4] Marciniak Z. 1987. „Non-uniformity of strains in shearing within the warm-forming temperature range”. *International Journal of Mechanical Sciences* 29: 721–731.
- [5] Frechard S., A. Redjaimia, E. Lach, A. Lichtenberger. 2006. „Mechanical behaviour of nitrogen-alloyed austenitic stainless steel hardened by warm rolling”. *Materials Science Engineering*, A415: 219- 224.
- [6] Safari M., M. Farzin. 2014. „A study on laser bending of tailor machined blanks with various irradiating schemes”. *Journal of Materials Processing Technology* 214: 112–122.
- [7] Safdar S., L. Li, M.A. Sheikh, Z. Liu. 2007. „Finite element simulation of laser tube bending: Effect of scanning schemes on bending angle, distortions and stress distribution”. *Optics & Laser Technology* 39: 1101–1110.
- [8] Guan Y., H. Zhang, L. Jie, S. Shen. 2012. „Laser micro-bending process based on the characteristic of the laser polarization”. *Journal of Materials Processing Technology* 212: 662–671.
- [9] Wang X.Y., J. Wang, W.J. Xu, D.M. Guo. 2014. „Scanning path planning for laser bending of straight tube into curve tube”. *Optics & Laser Technology* 56: 43–51.
- [10] Mucha Z., J. Widłaszewski. 2015. „Laserowe formowanie powłok o zadanym kształcie powierzchni rozwijalnej”. *Mechanik* 2: 85–90.
- [11] Gądek T., Ł. Nowacki. 2017. „Prototyp urządzenia do kształtowania profili cienkościennych z podgrzewaniem laserowym”. *Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie* 5 (116): 18–23.
- [12] <http://www.stalnierdzewne.pl/porady-eksperta/obrobka-stali-nierdzewnej-na-goraco>. Data dostępu: 06.2017.
- [13] http://www.investa.pl/oferta/stal_nierdzewna_poradnik_odpornosc_na_temperatury.html. Data dostępu: 06.2017.
- industrial forming processes, Pohang, 13-17.07.2010, 1193-1200. Melville: American Institute of Physics.*
- [3] Pieja T. 2009. „Kształtowanie na półgorąco wytłoczek ze stali odpornej na korozję”. *PhD thesis*, Rzeszów: Politechnika Rzeszowska.
- [4] Marciniak Z. 1987. „Non-uniformity of strains in shearing within the warm-forming temperature range”. *International Journal of Mechanical Sciences* 29: 721–731.
- [5] Frechard S., A. Redjaimia, E. Lach, A. Lichtenberger. 2006. „Mechanical behaviour of nitrogen-alloyed austenitic stainless steel hardened by warm rolling”. *Materials Science Engineering*, A415: 219- 224.
- [6] Safari M., M. Farzin. 2014. „A study on laser bending of tailor machined blanks with various irradiating schemes”. *Journal of Materials Processing Technology* 214: 112–122.
- [7] Safdar S., L. Li, M.A. Sheikh, Z. Liu. 2007. „Finite element simulation of laser tube bending: Effect of scanning schemes on bending angle, distortions and stress distribution”. *Optics & Laser Technology* 39: 1101–1110.
- [8] Guan Y., H. Zhang, L. Jie, S. Shen. 2012. „Laser micro-bending process based on the characteristic of the laser polarization”. *Journal of Materials Processing Technology* 212: 662–671.
- [9] Wang X.Y., J. Wang, W.J. Xu, D.M. Guo. 2014. „Scanning path planning for laser bending of straight tube into curve tube”. *Optics & Laser Technology* 56: 43–51.
- [10] Mucha Z., J. Widłaszewski. 2015. „Laserowe formowanie powłok o zadanym kształcie powierzchni rozwijalnej”. *Mechanik* 2: 85–90.
- [11] Gądek T., Ł. Nowacki. 2017. „Prototyp urządzenia do kształtowania profili cienkościennych z podgrzewaniem laserowym”. *Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie* 5 (116): 18–23.
- [12] <http://www.stalnierdzewne.pl/porady-eksperta/obrobka-stali-nierdzewnej-na-goraco>. Data dostępu: 06.2017.
- [13] http://www.investa.pl/oferta/stal_nierdzewna_poradnik_odpornosc_na_temperatury.html. Data dostępu: 06.2017.