

# Prototypowe urządzenie do automatycznego prostowania smukłych wyrobów drążonych

## *Prototype machine for automatic straightening of slender, hollowed products*

(1) Maria Gąsioriewicz\*  (2) Szymon Szkudelski  (3) Marcin Bączek  (4) Jarosław Lulkiewicz   
(5) Stanisław Ziółkiewicz 

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Obróbki Plastycznej, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań, Poland

### Informacje o artykule

Zgłoszenie: 26.06.2019

Recenzja: 27.06.2019

Akceptacja: 30.08.2019

### Wkład autorów

- (1) Opracowanie dokumentacji konstrukcyjnej, analiza wyników prostowania
- (2) Opracowanie dokumentacji konstrukcyjnej, analiza wyników prostowania
- (3) Uruchomienie urządzenia, pomiary i prostowanie
- (4) Uruchomienie urządzenia, pomiary i prostowanie
- (5) Koncepcja, założenia

### ORCID iD

- (1) <https://orcid.org/0000-0003-2174-9638>
- (2) <https://orcid.org/0000-0002-6140-0775>
- (3) <https://orcid.org/0000-0001-7701-8565>
- (4) <https://orcid.org/0000-0003-2703-6970>
- (5) <https://orcid.org/0000-0002-0684-1981>

### Streszczenie

W procesie wytwarzania długich wyrobów, to znaczy takich, których wymiary wzdłużne są znacznie większe od wymiarów przekroju poprzecznego (np. rury o zmiennym przekroju) pod wpływem procesów obróbkowych tj.: skrawanie, kształtowanie, obróbka cieplna dochodzi do krzywienia i wypaczenia detali. W związku z tym konieczne jest wprowadzenie do procesu technologicznego operacji prostowania. Jedną z najczęściej stosowanych metod prostowania jest przeginanie odbywające się na prasach. W pracy przedstawiono zautomatyzowane urządzenie do prostowania smukłych wyrobów drążonych, zbudowane w ramach projektu realizowanego przez Sieć Badawczą Łukasiewicz – Instytut Obróbki Plastycznej wspólnie z Zakładami Mechanicznymi Tarnów. W ramach współpracy opracowano koncepcję stanowiska do prostowania opartego na korpusie ramowym. Geometria korpusu została opracowana przy wykorzystaniu modułu do analizy numerycznej. Wykonane symulacje pozwoliły na dobranie przekrojów, rozstawów i geometrii żeber oraz sposobu łączenia tak, aby odkształcenia sprężyste korpusu podczas pracy były jak najmniejsze. Powstało prototypowe urządzenie umożliwiające wykonanie na jednym stanowisku procesu prostowania, pomiaru prostoliniowości zarówno na średnicy zewnętrznej, jak i w środku otworu. Proces prostowania oparty jest na pomiarze prostoliniowości wewnątrz otworu. Aby możliwe było wprowadzenie czujnika pomiarowego do otworu, wstępnie prostowano i przegnano rurę, korzystając z pomiaru zewnętrznego. Proces prostowania kończy się po wykonaniu pomiaru wewnątrz otworu i uzyskaniu jego prostoliniowości w zakresie wymaganej tolerancji. W pracy przedstawiono również pierwsze wyniki badań prostowania, które prowadzono w celu synchronizacji pracy systemu pomiarowego ze sterowaniem.

**Słowa kluczowe:** prostowanie rur, urządzenie do prostowania, długie wyroby drążone

### Article info

Received: 26.06.2019

Reviewed: 27.06.2019

Accepted: 30.08.2019

### Authors' contribution

- (1) Preparation of construction documentation, analysis of straightening results
- (2) Preparation of construction documentation, analysis of straightening results

### Abstract

*In the process of manufacturing long products, those whose longitudinal dimensions are substantially greater than the dimensions of the cross-section (e.g. pipes with variable cross-section), when processes are applied, i.e.: machining, forming, heat treatment, pieces are warped and twisted. Because of this, it is necessary to introduce a straightening operation into the technological process. One of the most commonly applied straightening methods is contraflexion on presses. This paper presents an automated machine for straightening of slender, hollowed products, built as part of a project realized by the Łukasiewicz Research Network – Metal Forming Institute jointly with Zakłady Mechaniczne Tarnów. As part of this collaboration, a concept of a straightening station based*

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

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

- (3) *Start-up of the device, measurements and straightening*  
 (4) *Start-up of the device, measurements and straightening*  
 (5) *Concept, assumptions*

#### ORCID iDs

- (1) <https://orcid.org/0000-0003-2174-9638>  
 (2) <https://orcid.org/0000-0002-6140-0775>  
 (3) <https://orcid.org/0000-0001-7701-8565>  
 (4) <https://orcid.org/0000-0003-2703-6970>  
 (5) <https://orcid.org/0000-0002-0684-1981>

*on a frame body was developed. The body's geometry was designed using a numerical analysis module. Conducted simulations made it possible to select rib cross-sections, spacing and geometry, as well as the joining method, so that the body's elastic deformations during work were as low as possible. And so, a prototype machine enabling performance of the straightening process, linearity measurement on the exterior surface and at the center of the hole in one station was created. The straightening process is based on linearity measurement inside the hole. For it to be possible to insert a measuring sensor into the hole, the pipe was pre-straightened and contraflexed using external measurement. The straightening process ends after a measurement is taken inside the hole, and its linearity is found within the required tolerance range. This paper also presents the first results of straightening tests, performed in order to synchronize the operation of the measuring system and control.*

**Keywords:** pipe straightening, straightening machine, straightener, long hollowed products

## 1. WPROWADZENIE

Prostoliniowość jest ważną cechą długich wyrobów drążonych. Procesy obróbcze, takie jak: skrawanie, kształtowanie oraz obróbka cieplna elementów o małej sztywności, których wymiary wzdluzne są znacznie większe od wymiarów przekroju poprzecznego, mogą powodować krzywienie. Przyczyną tego zjawiska jest stan naprężeń powstały podczas procesu wytwarzania, pozostający w obrabianej części po usunięciu oddziaływania sił zewnętrznych (np. frezu) [1–4]. Zmiana kształtu z postaci zakrzywionej do postaci precyzyjnie wyprostowanej nie jest zabiegiem prostym, szczególnie jeśli prostoliniowość ma być dodatkowo spełniona dla otworu wewnętrznego. ŁUKASIEWICZ – INOP wraz z Zakładami Mechanicznymi Tarnów realizuje projekt, którego celem jest opracowanie procesu i urządzenia do automatycznego prostowania smukłych wyrobów drążonych o dużej zmienności przekroju poprzecznego: średnica wewnętrzna od 6 do 25 mm, średnica zewnętrzna od 20 do 65 mm, długość od 500 do 2000 mm. W ramach projektu zaprojektowano i wykonano prototypowe urządzenie do automatycznego prostowania smukłych wyrobów drążonych.

## 2. KONCEPCJA STANOWISKA BADAWCZEGO

Jednym z problemów, jakiemu musieli sprostać konstruktorzy urządzenia, był dobór metody prostowania, opracowania przestrzeni roboczej tak, aby zapewnić odpowiednią sztywność urządzenia. Najbardziej popularną metodą pro-

## 1. INTRODUCTION

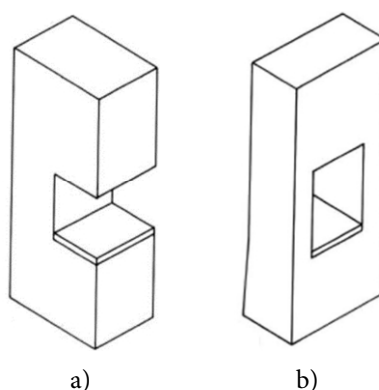
*Linearity is an important feature of long, hollowed products. Processes like: machining, forming and heat treatment of elements with low rigidity, the longitudinal dimensions of which are substantially greater than the dimensions of their cross-section, may cause twisting. The cause of this phenomenon is the stress state occurring during the manufacturing process, remaining in the processed part after external forces (e.g. milling cutter) cease to act [1–4]. Shape change from curved form to a precisely straightened form is not a simple operation, particularly if linearity must also be fulfilled for the interior hole. ŁUKASIEWICZ – INOP and Zakłady Mechaniczne Tarnów are realizing a project with the goal of developing a process and machine for automatic straightening of slender, hollowed products with high cross-sectional variability: interior diameter from 6 to 25 mm, exterior diameter from 20 to 65 mm, length from 500 to 2000 mm. As part of this project, a prototype machine for automatic straightening of slender, hollowed products was designed and built.*

## 2. CONCEPT OF TEST STAND

*One of the problems faced by the machine's designers was selection of the straightening method and organization of the workspace so as to ensure the appropriate rigidity of the machine. The most popular method of straightening twisted,*

stowania skrzywionych, smukłych wyrobów o różnym profilu są urządzenia prostujące opierające się na metodzie prostowania przez przeginanie oraz, rzadziej spotykane, mniej uniwersalne polegające na prostowaniu przez rozciąganie. Urządzenia wykorzystujące sposób prostowania przez rozciąganie stosuje się głównie w budownictwie, gdzie znalazły zastosowanie przy prostowaniu prętów zbrojeniowych o małych średnicach, które nie wymagają wysokiej dokładności prostowania. Metoda prostowania przez rozciąganie znalazła również zastosowanie w produkcji wyciskanych na gorąco profili aluminiowych, które w trakcie wyciskania ulegają deformacji. Powszechnie stosowane jest prostowanie poprzez przeginanie, które wykorzystywane jest również przy prostowaniu precyzyjnych wyrobów. W literaturze [5–7] można znaleźć liczne opracowania naukowe z zakresu badania prostowania smukłych wyrobów, jednak problem wypaczenia, krzywienia nadal pozostaje jednym z podstawowych zadań do rozwiązania. Proces prostowania realizowany jest przeważnie na prasach o korpusie wysięgowym (rys. 1a), który umożliwia łatwiejszy dostęp do przestrzeni roboczej, choć jest znacznie mniej sztywny. Natomiast korpusy ramowe (rys. 1b) charakteryzują się sztywną konstrukcją, dzięki czemu mogą przenosić znacznie większe obciążenia niż korpusy wysięgowe [8]. Cecha ta była decydująca w procesie projektowania konstrukcji urządzenia.

*slender products of various profiles are straighteners based on the contraflexion method, and less often encountered, less universal straighteners based on straightening through tension. Machines that employ the tensile straightening method are mainly applied in construction, where they have found applications in straightening low-diameter rebar, which does not require high straightening accuracy. The tensile straightening method has also found application in the manufacture of hot-extruded aluminum profiles, which undergo deformation over the course of extrusion. Contraflexion straightening is commonly applied and also used for straightening of precision products. The literature [5–7] contains numerous scientific papers concerning straightening tests of slender products, however the problem of twisting and warping continues to be a fundamental obstacle. The straightening process is primarily carried out on presses with an extended-throat-clearance body (Fig. 1a), which enables easier access to the workspace, although it is significantly less rigid. Meanwhile, frame bodies (Fig. 1b) are characterized by a rigid structure, thanks to which they can carry much higher loads than bodies with extended throat clearance [8]. This feature was decisive in the process of designing the machine.*



Rys. 1. a) Korpus wysięgowy, b) korpus ramowy

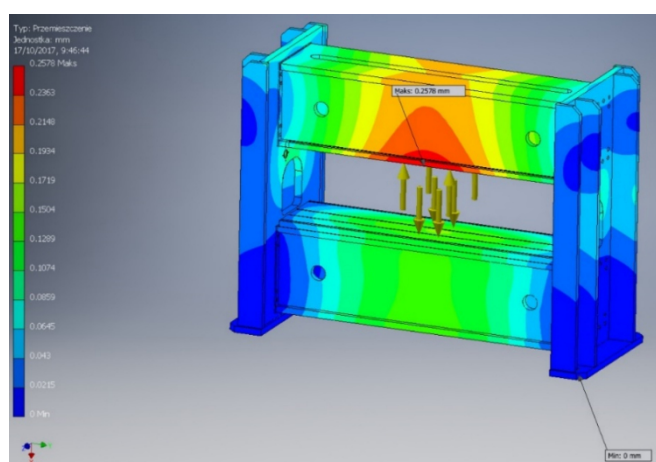
Fig. 1. a) Extended-throat-clearance body, b) frame body

W ramach współpracy ŁUKASIEWICZA – INOP i Zakładów Mechanicznych Tarnów opracowano koncepcję stanowiska do prostowania

*As part of collaboration between ŁUKASIEWICZ – INOP and Zakłady Mechaniczne Tarnów, a concept of a straightening station based on*

opartego na korpusie ramowym. Geometria korpusu została zbadana przy wykorzystaniu modułu do analizy numerycznej. Wykonane symulacje pozwoliły na dobranie przekrojów, rozstawów i wielkości żeber, sposobu łączenia tak, aby odkształcenia sprężyste korpusu podczas pracy były jak najmniejsze. Na rys. 2 przedstawiono graficznie wartość przemieszczenia przy obciążeniu 750 kN, czyli maksymalnym przyjętym obciążeniu prasy. Maksymalne przemieszczenie na środku belki górnej uzyskano na poziomie 0,26 mm. W praktyce siła generowana przez proces prostowania wyrobów wytwarzanych przez ZMT będzie znacznie mniejsza.

*a frame body was developed. The body's geometry was investigated using a numerical analysis module. Conducted simulations made it possible to select rib cross-sections, spacing and sizes, as well as the joining method, so that the body's elastic deformations during work were as low as possible. Fig. 2 illustrates the value of displacement under 750 kN load, i.e. the maximum accepted load of the press. Maximum displacement at the center of the top beam was 0.26 mm. In practice, the force generated by the process of straightening products manufactured by ZMT will be significantly lower.*



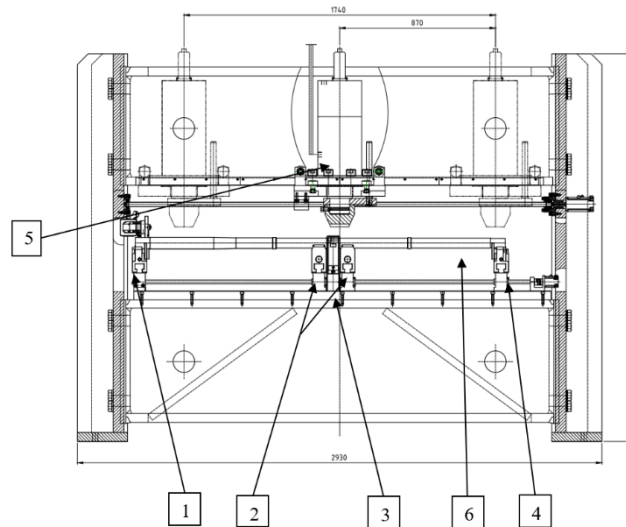
Rys. 2. Graficzne przedstawienie przemieszczenia przy obciążeniu korpusu siłą 750 kN

*Fig. 2. Graphical illustration of displacement of body under 750 kN load*

Schemat urządzenia, jakie zostało opracowane na bazie korpusu obliczonego przy wykorzystaniu analizy numerycznej przedstawiono na rys. 3. Stanowisko badawczo-pilotażowe wyposażone jest w układ sterowania, układ hydrauliczny, układ serwonapędów i układ pomiarowy. Prototypowe urządzenie prostujące jest w pełni zautomatyzowane, posiada 10 napędów serwo, 5 siłowników pneumatycznych oraz jeden siłownik hydrauliczny. W odróżnieniu od spotykanych urządzeń prostujących urządzenie to posiada przesuwny siłownik hydrauliczny, który wykonuje gięcie w zadanym miejscu. Dzięki zastosowaniu takiego rozwiązania, prostowany wyrób (od pomiaru do prostowania) pozostaje nieruchomy, zostaje tylko obracany o zadany kąt.

*The diagram of the machine drawn based on the base of the body calculated by means of numerical analysis is shown in Fig. 3. The pilot test station is equipped with a control system, hydraulic system, servodrives and measuring system. The prototype straightening machine is fully automated, has 10 servodrives, 5 pneumatic actuators and one hydraulic actuator. In contrast to commonly encountered straightening machines, this prototype has a sliding hydraulic actuator, which performs bending at the set position. Thanks to the application of this solution, the straightened product (from measurement to straightening) remains immobile and is only rotated by a set angle.*





Rys. 3. Stanowisko do prostowania smukłych wyrobów drążonych: 1 – podpora stała, 2 – podpory przesuwne, na których następuje gięcie, 3 – mikrometr bezstykowy, przesuwny, 4 – podpora przesuwna, 5 – siłownik hydrauliczny, 6 – smukły wyrób drążony

Fig. 3. Station for straightening slender, hollowed products: 1 – fixed support, 2 – sliding supports on which bending occurs, 3 – contactless micrometer, sliding, 4 – sliding support, 5 – hydraulic actuator, 6 – slender, hollowed product

### 3. STANOWISKO BADAWCZE

Urządzenie do prostowania (rys. 4a) ma możliwość regulacji takich parametrów, jak: wielkość siły prostującej, prędkość prostowania, czas postoju siłownika w dolnym położeniu i kąt obrotu wyrobu. Pozwala na automatyczne podanie detali, ustawienie pryzm gnących (rys. 5), mikrometru bezdotykowego (rys. 4b) oraz siłownika hydraulicznego. Maksymalny nacisk siłownika hydraulicznego wynosi 750 kN, jego skok roboczy wynosi 250 mm, prędkość dosuwu oraz powrotu suwaka wynosi min. 20 mm/s. Urządzenie pozwala na prostowanie rur o długości od 500 do 2000 mm i średnicy od  $\phi 20$  do  $\phi 65$  mm.

Wykonana weryfikacja wytrzymałości korpusu zrealizowana została przy maksymalnym obciążeniu 750 kN w strefie środkowej prasy i przy najwęższym możliwym ułożeniu podpór. Maksymalne ugięcie, jakie uzyskano, wyniosło 0,3 mm. Różnica w wielkości ugięcia w stosunku do wyników symulacji wynosiła 0,04 mm. Rozbieżność ta jest stosunkowo niewielka i wynika ze sposobu przyłożenia sił (inny rozstaw podpór w związku z grubością mikrometru).

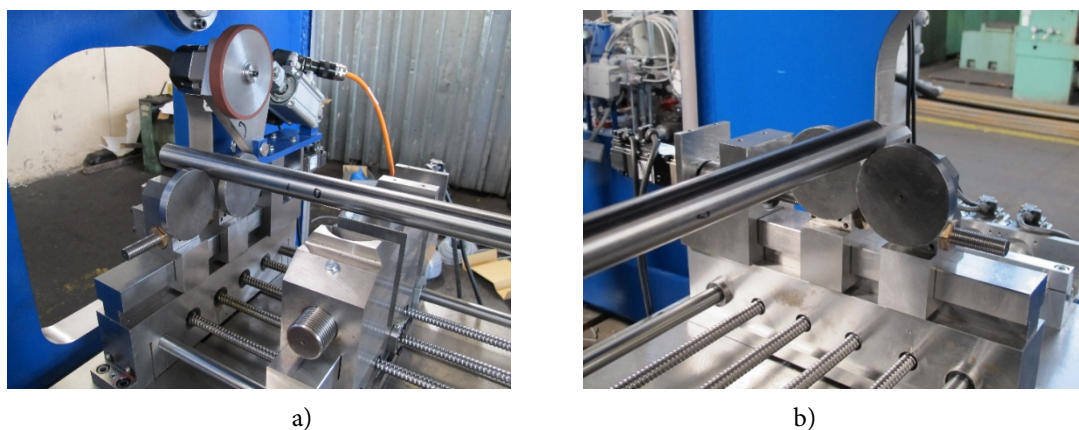
### 3. TEST STAND

The straightening machine (Fig. 4a) has adjustable parameters, such as: straightening force, straightening speed, actuator time in bottom position and angle of product rotation. It allows for automatic feeding of pieces, positioning of bending blocks (Fig. 5), contactless micrometer (Fig. 4b) and hydraulic actuator. The maximum pressing force of the hydraulic actuator is 750 kN and its working pitch is 250 mm, with a minimum speed of slider advance and return equal to 20 mm/s. The machine makes it possible to straighten pipes with length from 500 to 2000 mm and diameter from  $\phi 20$  to  $\phi 65$  mm.

Verification of the body's strength was carried out under maximum load, 750 kN, in the central area of the press and with the narrowest possible positioning of supports. The maximum deflection obtained was 0.3 mm. The difference in deflection size with respect to simulation results was 0.04 mm. This divergence is relatively small and arises from the method of force application (different spacing of supports due to thickness of micrometer).



Rys. 4. Urządzenie do prostowania smukłych wyrobów drążonych (a), widok na mikrometr bezstykowy (b)  
 Fig. 4. Machine for straightening slender, hollow products (a), view of contactless micrometer (b)



Rys. 5. Urządzenie do prostowania: a) widok przyzmy lewej, b) widok przyzmy prawej  
 Fig. 5. Straightening machine: a) view from left block, b) view from right block

Zbudowane urządzenie (rys. 4a) posiada 2 tryby pracy: automatyczny i ręczny. Tryb ręczny pozwala na realizację tradycyjnego procesu prostowania, bez konieczności przenoszenia wyrobu, z możliwością pomiaru wyrobu. Tryb automatyczny sprowadza czynności operatora do wyboru z panelu sterującego wyrobu (kształt, długość rury) oraz parametrów ustawienia urządzenia (wkładki stempla, przyzmy podpór gnących).

Proces prostowania rozpoczyna się od automatycznego przyjęcia pozycji startowych przez podzespoły (na podstawie ustawień operatora na pulpicie sterującym) i podania wyrobu na rolki pomiarowe (rys. 5). W przypadku rur krótkich (do 600 mm) podawanie odbywa się ręcznie dla wyrobów długich przez zespół podający (rys. 6).

The constructed machine (Fig. 4a) has two work modes, automatic and manual. Manual mode allows for carrying out a traditional straightening process, without the need for moving the product, with the possibility of its measurement. Automatic mode only requires the operator to select the product on the control panel (pipe shape, length) and configure the machine's settings (punch inserts, blocks of bending supports).

The straightening process begins with all subassemblies assuming their starting positions (based on the operator's settings on the control panel) and feeding of the product onto measurement rolls (Fig. 5). In the case of short pipes (up to 600 mm), feeding is done manually for long products through the feed unit (Fig. 6).



Rys. 6. Zespół podający wyrób na pryzmy

Fig. 6. Unit feeding product onto blocks

Po ustawieniu wyrobu na rolkach wykonywany jest pomiar zewnętrzny. Wyrób za pomocą rolki napędowej jest obracany o odpowiedni kąt, a mikrometr bezstykowy (rys. 4b) mierzy wysokość przedmiotu względem osi pomiarowej. Wyniki pomiarów informują o wykrzywieniu detalu, ale również o możliwości wykonania pomiaru wewnątrz otworu. Zbyt duże ugięcie nie pozwoli na wprowadzenie czujnika pomiarowego do otworu rury.

Na podstawie wyników pomiaru system sterujący urządzeniem podaje takie parametry prostowania, jak: kąt, na który ma nastąpić gięcie, rozstaw podpór oraz pozycja stempla. Po ustawieniu podzespołów urządzenia rozpoczyna się proces gięcia, a następnie pomiar zewnętrzny prostowania. Proces prostowania wykonywany jest do czasu uzyskania zakładanej tolerancji koniecznej dla pracy systemu pomiarowego prostoliniowości wewnętrznej. Prostowanie rury odbywa się do uzyskania tolerancji współosiowości otworu na całej długości rury, o wartości maksymalnej do 0,05 mm.

#### 4. BADANIA PROSTOWANIA

Po zakończonym pozytywnie teście rozruchowym przeprowadzono badania, których celem było sprawdzenie synchronizacji systemu pomiarowego ze sterowaniem zautomatyzowanego urządzenia prostującego. Przedmiotem badań były rury o średnicy  $\phi 30$  mm i długości 600 mm, o różnych typach krzywizn, przedstawionych w tab. 1.

After the product is placed on the rolls, exterior measurement is carried out. The drive roll rotates the product by the appropriate angle and the contactless micrometer (Fig. 4b) measures the height of the object with respect to the axis of measurement. Measurement results provide information on twisting of the piece but also about the possibility of taking a measurement inside the hole. An excessive bend will make it impossible to insert the measuring sensor into the pipe's hole.



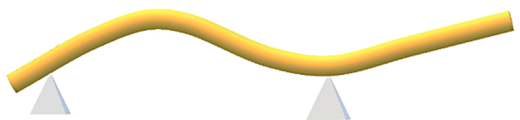

Based on measurement results, the machine control system reads out straightening parameters, such as: target bending angle, support spacing and punch position. After the machine's sub-assemblies assume their positions, the bending process begins, followed by exterior measurement of straightening. The straightening process runs until the accepted tolerance required for operation of the interior linearity measuring system is achieved. Pipe straightening is carried out until the hole reaches the coaxiality tolerance throughout the entire length of the pipe, which has a maximum value of 0.05 mm.

#### 4. TESTS OF THE STRAIGHTENING PROCESS

After a successful start-up tests, tests were performed to check the synchronization between the measuring system and the control of the automated straightening machine. The test subjects were pipes with a diameter of  $\phi 30$  mm and length of 600 mm, with different curvatures, presented in Tab. 1.



Tab. 1. Warianty ugięcia rur o długości 600 mm  
 Tab. 1. Bending variants of pipes with length of 600 mm

Próbka Sample	Charakterystyka Characteristics	Wizualizacja ugięcia rury Visualization of pipe bending
1	Rura prosta – prostoliniowość mieści się w zakresie tolerancji 0,05 mm <i>Straight pipe – linearity within tolerance range 0.05 mm</i>	
2	Rura z jednym znaczącym miejscem ugięcia w jednej płaszczyźnie <i>Pipe with one significant bending site on one plane</i>	
3	Rura z dwoma znaczącymi miejscami ugięcia w jednej płaszczyźnie <i>Pipe with two significant bending sites on one plane</i>	
4	Rura z kilkoma miejscami ugięć w dwóch płaszczyznach <i>Pipe with several bending sites on two planes</i>	

Badania przeprowadzono w identycznych warunkach i według tej samej metodyki, gdzie po przeprowadzeniu pomiaru średnicy system proponował rozstaw podpór i pozycję wraz z wartością przemieszczenia stempla. Badania wykonano na podstawie propozycji systemowych. Wyniki badań przedstawiono w tab. 2.

*Tests were conducted under identical conditions and according to the same methodology, in which, after diameter measurement, the system suggested support spacing and position along with the value of punch displacement. Tests were carried out based on suggestions made by the system. Test results are given in Tab. 2.*

Tab. 2. Wyniki badań prostowania  
 Tab. 2. Straightening test results

Wariant próbki Sample variant	Liczba zabiegów prostowania Number of straightening operations	Zakres uzyskanej prostoliniowości [mm] Obtained linearity range [mm]	Wartość prostoliniowości w kolejnych gięciach [mm] Linearity value in successive bending operations [mm]
1	—	0,05	—
2	4	0,05–0,06	1 – 0,23 2 – 0,25 3 – 0,09 4 – 0,06
3	8	0,05–0,08	1 – 0,25 2 – 0,08 3 – 0,12 4 – 0,10 5 – 0,08 6 – 0,08 7 – 0,06 8 – 0,05



Wariant próbki Sample variant	Liczba zabiegów prostowania Number of straightening operations	Zakres uzyskanej prostoliniowości [mm] Obtained linearity range [mm]	Wartość prostoliniowości w kolejnych gięciu [mm] Linearity value in successive bending operations [mm]
4	8	0,05–0,8	1 – 0,10 2 – 0,30 3 – 0,20 4 – 0,08 5 – 0,10 6 – 0,08 7 – 0,08 8 – 0,05

## 5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania potwierdziły synchronizację pracy systemu pomiarowego ze sterowaniem, co było głównym celem badań. Prostowanie rur do prostoliniowości 0,05 mm wykazało, że wraz ze wzrostem stopnia krzywizny zwiększa się konieczna liczba pojedynczych zabiegów. W ramach realizacji dalszych prac prowadzone będą badania prostowania dla próbek o długości 1200 mm i 2000 mm.

## PODZIĘKOWANIA

Badania realizowane były w ramach projektu współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020 – Działanie 4.1 „Badania naukowe i prace rozwojowe”, poddziałanie 4.1.4 „Projekty aplikacyjne”, umowa o dofinansowanie projektu podpisana z Narodowym Centrum Badań i Rozwoju w Warszawie dnia 16.06.2016 r. (umowa POIR.04.01.04-00-0124/15).



## LITERATURA

- [1] Birger I.A., M.L. Kozlov. 1988. “Ostateczne naprężenia: problemy i perspektywy”. W Materiały Š Vsesoúznogo simpoziuma „Tehnologičeskie ostatečnyje naprężeniá”, s. 388.

## 5. CONCLUSIONS

Conducted tests confirmed synchronization of the measuring system’s operation with the control, which was the main goal of tests. Straightening of pipes to 0.05 mm linearity demonstrated that the number of individual operations required increases as the degree of curvature grows. In further studies, straightening tests will be carried out for samples 1200 mm and 2000 mm in length.

## ACKNOWLEDGEMENTS

Tests were carried out as part of a project co-funded with funds from the European Regional Development Fund, Smart Growth Operational Programme 2014–2020 – Measure 4.1 “Scientific research and development”, submeasure 4.1.4 “Application projects”, Project co-funding contract signed with the National Centre for Research and Development in Warsaw on 16.06.2016 (contract POIR.04.01.04-00-0124/15).

## REFERENCES

- [1] Birger I.A., M.L. Kozlov. 1988. “Ostatečne naprężeniá: problemy i perspektyvy”. In Materiały Š Vsesoúznogo simpoziuma „Tehnologičeskie ostatečnyje naprężeniá”, s. 388.

- [2] Sokolov I.A., V.I. Uralskij. 1981. „Ostatocnye naprâženîa i kačestvo metalloprodukcii”. W M.: Metallurgîa, 96.
- [3] Świć A. 2009. *Technologia obróbki wałów o małej sztywności*. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.
- [4] Draczew O., A. Świć, W. Taranenko, G. Taranenko. 2010. „Podstawy teoretyczne i doświadczalne modelowania operacji obróbki cieplno-mechanicznej wałów o małej sztywności”. *Postępy Nauki i Techniki* 5: 55–70.
- [5] Yong-Chen Pei , Wang Jia-Wei, Tan Qing-Chang, Yuan De-Zhi, Zhang Fan. 2017. “An investigation on the bending straightening process of D-type cross section shaft”. *International Journal of Mechanical Sciences* 131–132: 1082–1091.
- [6] Galvis J.C., Maury H.E.,. Hernández R.J. 2017. “Elasto-plastic model to determine the maximum force for shaft straightening process”. *Ingeniería e Investigación* 37 (2): 107–110.
- [7] Seung-Cheol Kim, Chung Sung-Chong. 2012. “Synthesis of the multi-step straightness control system for shaft straightening processes”. *Mechatronics* 12: 139–156.
- [8] Tomczak J., J. Bartnicki. 2012. *Maszyny i urządzenia do obróbki plastycznej*. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.
- [2] Sokolov I.A., V.I. Uralskij. 1981. „Ostatocnye naprâženîa i kačestvo metalloprodukcii”. W M.: Metallurgîa, 96.
- [3] Świć A. 2009. *Technologia obróbki wałów o małej sztywności*. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.
- [4] Draczew O., A. Świć, W. Taranenko, G. Taranenko. 2010. „Podstawy teoretyczne i doświadczalne modelowania operacji obróbki cieplno-mechanicznej wałów o małej sztywności”. *Postępy Nauki i Techniki* 5: 55–70.
- [5] Yong-Chen Pei , Wang Jia-Wei, Tan Qing-Chang, Yuan De-Zhi, Zhang Fan. 2017. “An investigation on the bending straightening process of D-type cross section shaft”. *International Journal of Mechanical Sciences* 131–132: 1082–1091.
- [6] Galvis J.C., Maury H.E.,. Hernández R.J. 2017. “Elasto-plastic model to determine the maximum force for shaft straightening process”. *Ingeniería e Investigación* 37 (2): 107–110.
- [7] Seung-Cheol Kim, Chung Sung-Chong. 2012. “Synthesis of the multi-step straightness control system for shaft straightening processes”. *Mechatronics* 12: 139–156.
- [8] Tomczak J., J. Bartnicki. 2012. *Maszyny i urządzenia do obróbki plastycznej*. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.