



## Koncepcja i badania eksperymentalne kształtowania elementów cienkościennych przy pomocy hybrydowej metody laserowo-mechanicznej

### *Concept and experimental tests of forming thin-walled elements using a hybrid, laser-mechanical method*

Piotr Kurp\*

Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Centrum Laserowych Technologii Metali, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, Poland

#### Informacje o artykule

Zgłoszenie: 25.06.2018

Recenzja: 13.07.2018

Akceptacja: 3.12.2018

#### Streszczenie

W niniejszym artykule autor przedstawia założenia oraz wstępne wyniki badań doświadczalnych procesu kształtowania elementów cienkościennych przy pomocy hybrydowej metody laserowo-mechanicznej. W prezentowanej metodzie została użyta nieruchoma wiązka laserowa o przekroju prostokątnym. Autor prezentuje m.in.: główną ideę metody hybrydowej, jedną z wybranych do realizacji koncepcji, projekt stanowiska oraz wykonane stanowisko do gięcia cienkościennych rur i dyfuzorów stożkowych stosowanych w budowie silników lotniczych. Docelowym materiałem badań są żarowytrzymałe nadstopy niklu Inconel 618 i Inconel 625 oraz żaroodporne stale martenzytyczne AISI 410 i AISI 325. Materiały te, ze względu na ich wysokie właściwości mechaniczne przy pracy w podwyższonej temperaturze, używane są do budowy podzespołów silników turbośmigłowych. Ze względów ekonomicznych próby zostały wykonywane na austenitycznej stali kwasoodpornej X5CrNi18-10. Prezentowana w artykule metoda hybrydowa (założenia, koncepcja, projekt) została poddana walidacji w warunkach laboratoryjnych. Zmierzone siły potrzebne do uzyskania odkształceń plastycznych w elemencie, kąt gięcia oraz ustalono temperaturę procesu. Ważną innowacją procesu jest kontrolowanie temperatury w jego trakcie. Pozwala to na zachowanie struktury wyjściowej stali, a tym samym na utrzymanie właściwości wytrzymałościowych produktu. Na podstawie przeprowadzonych badań planuje się wykonać symulacje numeryczne procesu oraz wykonać badania metalograficzne gotowych komponentów. Ponadto prowadzone badania wskazują kierunek dalszych działań. Przejawia się to m.in. w ciągłym modyfikowaniu konstrukcji oraz samego procesu. Przedstawione wyniki testów zostały poddane dyskusji. Na podstawie uzyskanych efektów zostaną zaplanowane dalsze prace nad hybrydową metodą laserowo-mechaniczną formowania elementów cienkościennych.

**Słowa kluczowe:** kształtowanie laserowe, obróbka laserowa, dyfuzory, silniki turbośmigłowe

#### Article info

Received: 25.06.2018

Reviewed: 13.07.2018

Accepted: 3.12.2018

#### Abstract

*In this paper, author presents the assumptions and preliminary results of experimental tests of the process of forming thin-walled elements using a hybrid, laser-mechanical technique. An immobile laser beam with a rectangular cross-section was used in the presented method. Author presents, among other things: the main idea of the hybrid method, one of the concepts selected for realization, design of the test stand and the station that was built for bending of thin-walled pipes and conical diffusers used in the design of*

\* Autor do korespondencji. Tel.: +48 41 342 47 79; e-mail: pkurp@tu.kielce.pl

\* Corresponding author. Tel.: +48 41 342 47 79; e-mail: pkurp@tu.kielce.pl

*aircraft engines. Inconel 618 and Inconel 625 high-temperature creep-resistant nickel superalloys and AISI 410 and AISI 325 heat-resistant martensitic steels are the target materials for testing. Due to their high mechanical properties during work at elevated temperatures, these materials are used in the construction of turboprop engine subassemblies. For economic reasons, tests were performed on X5CrNi18-10 acid-resistant austenitic steel. The hybrid method presented in the paper (assumptions, concept, design) was validated under laboratory conditions. The forces required to obtain plastic strains in the element and bending angle were measured, and the temperature of the process was determined. Temperature control throughout the process is an important innovation. It makes it possible to preserve the steel's initial structure and thus maintain the product's strength properties. Based on the tests performed, it is planned to conduct numerical simulations of the process and perform metallographic examinations of ready components. Moreover, the research conducted indicates the direction of further action. This is shown by, among other things, continuous modification of the design and the process itself. The presented test results are discussed. Based on obtained effects, further work on the hybrid laser-mechanical method of forming thin-walled elements will be planned.*

**Keywords:** laser forming, laser treatment, diffusers, turboprop engines

## 1. WSTĘP

Kształtowanie laserowe to metoda polegająca na bezstykowym nadawaniu pożądanych kształtów elementom przy użyciu oddziaływania wiązki laserowej. Metoda ta jest rozwijana od początku lat 80. ubiegłego wieku m.in. w Centrum Laserowych Technologii Metali Politechniki Świętokrzyskiej i Polskiej Akademii Nauk [1–3]. Można stwierdzić, że podstawowym mechanizmem pozwalającym na zmiany kształtu elementów jest rozszerzalność cieplna materiału. Odpowiednie nagrzewanie elementu (po zaprogramowanych ścieżkach, z odpowiednio dobraną temperaturą itp.) pozwala na uzyskanie zaplanowanych kształtów. W przypadku kształtowania laserowego nie dochodzi do mechanicznego kontaktu pomiędzy narzędziem kształtującym a elementem obrabianym. Technika ta daje również możliwość zdalnego (tj. na odległość) formowania elementów. Obecnie technologia ta znalazła zastosowanie w takich obszarach, jak np. elektromechanika, mechanika precyzyjna, mikropozycjonowanie i inne. Niestety metoda ta jest mało efektywna. Przy zmianie kształtu elementów wielkogabarytowych metoda jest bardzo energo- oraz czasochłonna, co eliminuje ją z zastosowań przemysłowych. Dlatego powstała koncepcja metody hybrydowej, tzw. kształtowania laserowego ze wspomaganiami mechanicznymi lub też krócej – hybrydowej metody laserowo-mechanicznej.

W 2015 r. Politechnika Świętokrzyska (PŚk) nawiązała współpracę z Instytutem Obróbki Plas-

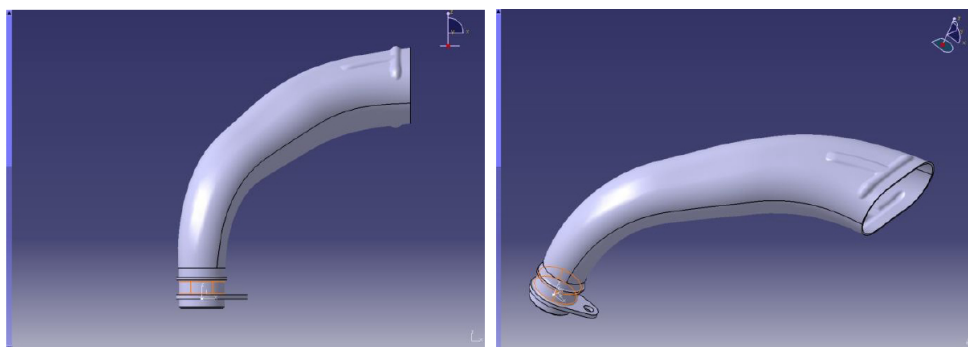
## 1. INTRODUCTION

*Laser forming is a method involving contactless shaping of elements by means of a laser beam. This method has been developed since the early 1980s, including at the Center for Laser Technology of Metals at the Kielce University of Technology and the Polish Academy of Sciences [1–3]. It can be stated that the basic mechanism allowing for shape change of elements is the material's thermal expansion. Proper heating of an element (along programmed paths, with properly selected temperature, etc.) makes it possible to obtain the planned shapes. In the case of laser forming, there is no mechanical contact between the forming tool and the formed object. This technique also enables remote (i.e., at a distance) forming of elements. Currently, this technology has found applications in such fields as, e.g., electromechanical engineering, precision mechanics, micro-positioning and others. Unfortunately, this method is not very effective. When the shape of large-sized elements is changed, the method is very energy- and time-consuming, which rules out its industrial applications. This is why the concept of a hybrid method was created, so-called mechanically assisted laser forming, or more concisely, the laser-mechanical hybrid method.*

*In 2015, Kielce University of Technology (PŚk) initiated collaboration with the Metal Forming Institute in Poznań (INOP), Institute of Funda-*

tycznej w Poznaniu (INOP), Instytutem Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk (IPPT PAN) oraz Politechniką Rzeszowską (PRz) dotyczącą badań nad powyższym tematem. Tak zawiązane konsorcjum przystąpiło do realizacji projektu pt. „Laserowe formowanie cienkościennych profili wspomagane mechanicznie” (akronim: LaMeForm), finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach prowadzonego grantu numer PBS3/A5/47/2015. Celem użytkowym projektu jest w szczególności opracowanie metody kształtowania elementów cienkościennych, m.in. na potrzeby przemysłu lotniczego (przykład na rys. 1), wytwarzanych ze stopów żarowytrzymałych takich, jak nadstopy niklu Inconel 625, Inconel 718, a także wysokostopowe stale martenzytyczne AISI 410 i AISI 325.

*mental Technological Research Polish Academy of Sciences (IPPT PAN) and Rzeszów University of Technology (PRz) involving research of the subject discussed above. The consortium established in this way undertook the project titled “Mechanically assisted laser forming of thin-walled profiles” (acronym: LaMeForm), financed by the National Centre for Research and Development under grant number PBS3/A5/47/2015. The project’s utilitarian objective is, in particular, to develop a method of forming thin-walled elements, among other things, for the purposes of the aviation industry (example in Fig. 1), manufactured from high-temperature creep-resistant alloys such as Inconel 625, Inconel 718 nickel superalloys as well as AISI 410 and AISI 325 highly alloyed martensitic steels.*



Rys. 1. Dyfuzor silnika turbośmigłowego, obecnie wykonywany metodami tradycyjnymi: wytłoczenie z blachy dwóch połówek i ich zespawanie

*Fig. 1. Diffuser of turboprop engine, currently made using traditional methods: drawing of two halves from sheet and welding them together*

W ramach prowadzonych badań PŚk oraz INOP przeprowadzają doświadczenia kształtowania elementów cienkościennych z zastosowaniem opracowywanej metody. IPPT PAN wykonuje analizy numeryczne procesu, natomiast PRz prowadzi badania materiałowe gotowych elementów.

Udane próby hybrydowego formowania płaskowników wykonanych z wymienionych materiałów z wykorzystaniem obciążenia grawitacyjnego zostały przedstawione w pracy [6]. Natomiast próby formowania elementów cienkościennych w postaci rur z materiału X5CrNi18-10 przy użyciu ruchomej wiązki laserowej o przekroju okrągłym, omiatającej cały element po jego obwodzie przedstawiono w pracy [7]. Próby gięcia dyfuzorów zostały przeprowadzone przez

*As part of this research, PŚk and INOP are conducting experiments of forming thin-walled elements with the application of the method under development. IPPT PAN is performing numerical analyses of the process, while PRz is conducting material tests of ready elements.*

*Successful attempts at hybrid forming of flat bars made from the aforementioned materials by utilizing gravity load are presented in paper [6]. Meanwhile, attempts at forming thin-walled elements in the form of pipes made of X5CrNi18-10 material using a moving laser beam with a round cross-section, passing over the entire element on its circumference, are presented in paper [7]. Attempts to bend diffusers were performed by the INOP and are presented in [8], among other pa-*

INOP i zaprezentowane m.in. w [8]. W niniejszym artykule zostaną przedstawione wyłącznie wyniki badań prowadzone przez PŚk przy użyciu nieruchomej wiązki laserowej o przekroju prostokątnym.

## 2. ZAŁOŻENIA, KONCEPCJA ORAZ REALIZACJA STANOWISKA DO HYBRYDOWEGO LASEROWO-MECHANICZNEGO KSZTAŁTOWANIA ELEMENTÓW

Na wstępie rozważamy gięcie elementu cienkościennego (np. rury) na zadany kąt gięcia  $\alpha$  oraz promień gięcia  $R$ . Elementem wyjściowym niech będzie prostoliniowy odcinek rury o odpowiedniej długości. W przypadku mechanicznego gięcia elementu przykładane siły zewnętrzne zazwyczaj wywołują naprężenie o znacznej wartości i odkształcenia plastyczne w dużym obszarze kształtowanego elementu. Ponadto wymagane jest użycie stempla oraz matrycy do odwzorowania kształtu (bądź innych narzędzi mechanicznych). Z kolei w przypadku gięcia laserowego deformacja będzie zlokalizowana w pobliżu trajektorii wiązki laserowej, na formowanym elemencie, tam, gdzie na skutek działania temperatury granica plastyczności będzie lokalnie niższa. Podejście hybrydowe, czyli formowanie z udziałem sił zewnętrznych i nagrzewania laserowego, daje możliwość przyrostowego wywoływania odkształcenia plastycznego lokalnie, w wybranych i precyzyjnie określonych strefach elementów kształtowanych.

Koncepcja hybrydowej metody kształtowania laserowo-mechanicznego opiera się na założeniu, że gięciu podlega tylko ta część elementu, która w danej chwili poddana jest działaniu wiązki laserowej. Wiązka laserowa podgrzewa wybrany obszar elementu do pewnej, zadanej temperatury, co powoduje polepszenie właściwości plastycznych w tym obszarze. Na skutek przyłożenia siły zewnętrznej  $F$  dochodzi do uplastycznienia i deformacji obszaru o podwyższonej temperaturze. Pozostała część formowanego elementu, która ma niższą temperaturę, nie ulega odkształceniu, a w danej fazie procesu deformacji plastycznej podlega tylko cienki „pasek” elementu. Szerokość tego „paska” uzależniona jest od średnicy, mocy i prędkości ruchu

*pers. This paper presents solely the results of research conducted by PŚk using an immobile laser beam with a rectangular cross-section.*

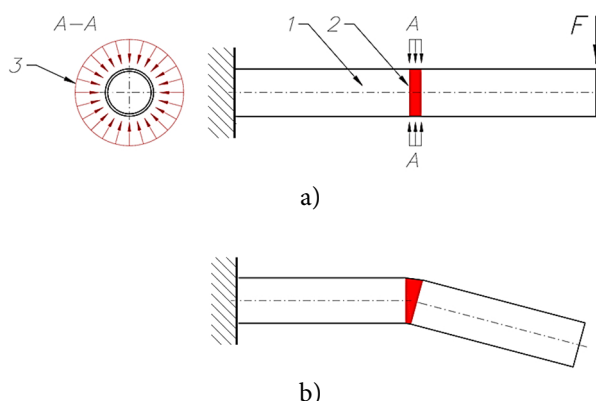
## 2. ASSUMPTIONS, CONCEPT AND EXECUTION OF TEST STAND FOR HYBRID, LASER-MECHANICAL FORMING OF ELEMENTS

*Firstly, let us consider bending of a thin-walled element (e.g. pipe) to a set bending angle  $\alpha$  and bending radius  $R$ . Let the starting element be a straight segment of pipe with the appropriate length. In the case of mechanical bending of the element, external forces applied usually generate stress of a significant value and plastic strains over a large area of the formed element. Moreover, it is required to use a punch and die (or other mechanical tools) to impress the shape. In turn, in the case of laser bending, deformation will be located near the laser beam's trajectory on the formed element, where the yield point will locally be lower due to temperature. The hybrid approach, i.e. forming with the involvement of external forces and laser heating, provides the ability to incrementally induce plastic deformation locally in selected and precisely defined zones of the formed elements.*

*The concept of the hybrid laser-mechanical method is based on the assumption that only the part of the element subjected to the laser beam's action at a given instant of time is bent. The laser beam heats the selected area of the element up to a certain, set temperature, which improves plastic properties in this area. As a result of the application of external force  $F$ , the area with elevated temperature is plasticized and deformed. The remaining part of the formed element, which has lower temperature, is not deformed, and in a given phase of the process, only a thin "strip" of the element undergoes plastic deformation. The width of this "strip" depends on the diameter, power and travel speed of the laser beam falling on the surface of the element. A diagram*

wiązki laserowej padającej na powierzchnię elementu. Schemat koncepcji kształtowania według powyższych założeń przedstawiono na rys. 2.

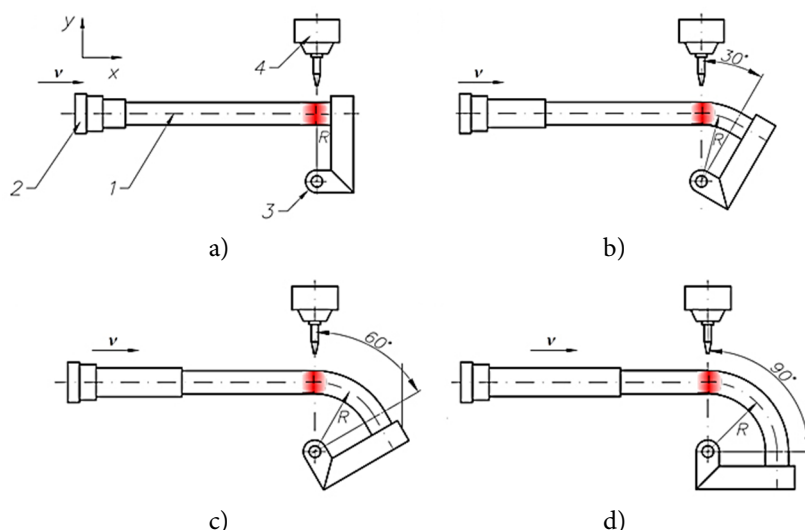
of the concept of forming according to the assumptions described above is presented in Fig. 2.



Rys. 2. Schemat kształtowania laserowo-mechanicznego: 1 – rurowy element podlegający gięciu, 2 – podgrzany laserowo do danej temperatury obszar wokół przekroju A-A elementu, 3 – przykład jednorodnego nagrzewania elementu rurowego na jego obwodzie,  $F$  – przyłożona siła zewnętrzna; a) element w trakcie nagrzewania, b) element po gięciu  
 Fig. 2. Diagram of laser-mechanical forming: 1 – pipe element being bent, 2 – area around cross-section A-A of the element, laser heated up to a given temperature, 3 – example of uniform heating of pipe element on its circumference,  $F$  – applied external force; a) element during heating, b) element after bending

W ramach prowadzonego grantu badawczego zespół opracował kilka koncepcji prowadzenia procesu. Ze względu na złożoność, ograniczenia technologiczne i inne do dalszych prac została wybrana koncepcja z tzw. swobodnym ramieniem gnącym, w której to metodzie nie są stosowane żadne narzędzia w postaci stempla i matrycy. Metoda ta została zobrazowana na rys. 3.

As part of the research grant being realized, the team developed several concepts of conducting the process. Due to complexity, technological limitations and other issues, the concept with a so-called free bending arm was selected for further work, and in this method, no tools like punches and dies are used. This method is illustrated in Fig. 3.



Rys. 3. Poszczególne etapy kształtowania elementu według koncepcji ze swobodnym ramieniem gnącym – schemat: 1 – element podlegający gięciu, 2 – siłownik pchający, 3 – ramię gnące swobodne, 4 – głowica laserowa

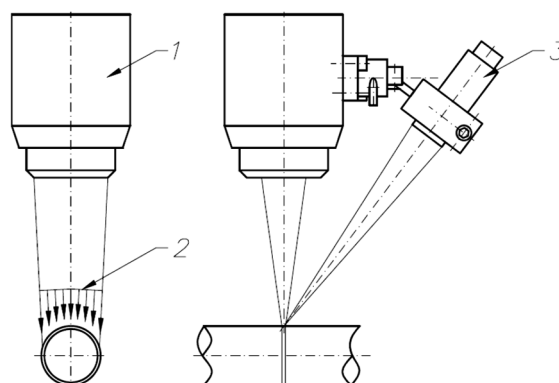
Fig. 3. Individual stages of forming the element according to the concept with the free bending arm – diagram: 1 – element being bent, 2 – pushing actuator, 3 – free bending arm, 4 – laser head

Konceptja ta przewiduje, że element 1 przeznaczony do obróbki jest zainstalowany na sztywno pomiędzy siłownikiem pchającym 2 a ramieniem gnącym swobodnym 3. Głowica laserowa 4 nagrzewa element wiązką prostokątną od góry w płaszczyźnie gięcia. Jednocześnie siłownik 2 oddziałuje na element 1 siłą  $F$  skierowaną w kierunku  $X$ . Na skutek polepszenia właściwości plastycznych w miejscu nagrzewania laserem element ulega zgięciu na promień  $R$  określony odległością osi rury od osi obrotu ramienia 3. Konceptja ta zakłada, że napędzany będzie wyłącznie siłownik 2, a ruch ramienia gnącego 3 będzie ruchem wynikowym (swobodne ramię gnące), natomiast głowica laserowa będzie nieruchoma.

W pierwszym etapie urządzenie przetestowano dla ruchomej głowicy laserowej generującej wiązkę o przekroju okrągłym. W tym przypadku głowica obiegała element po obwodzie. Wyniki badań zaprezentowano w [7]. Ponadto, ponieważ temperatura procesu powinna być kontrolowana i stała, rozbudowano stanowisko, dodając moduł kontroli mocy lasera w czasie rzeczywistym w zależności od wskazań pirometru. Pozwoli to na ustalenie stałej temperatury procesu w płaszczyźnie gięcia. Kontrolowanie temperatury jest niezwykle ważne, gdyż pozwala na kontrolowanie przemian fazowych w materiale. W kolejnym etapie prac zdecydowano się na użycie wiązki laserowej o przekroju prostokątnym. Schemat nagrzewania przedstawiono na rys. 4.

*This concept provides that element 1, which is intended for forming, is installed rigidly between pushing actuator 2 and free bending arm 3. Laser head 4 heats the element with a rectangular beam from the top on the bending plane. At the same time, actuator 2 acts on element 1 with force  $F$  oriented in direction  $X$ . As a result of the improvement of plastic properties in the area heated by the laser, the element is bent to a radius of  $R$  determined by the distance of the pipe's axis to the axis of rotation of arm 3. This concept assumes that only actuator 2 will be driven, and the motion of bending arm 3 will be resultant motion (free bending arm), while the laser head will be immobile.*

*In the first stage, the machine was tested with a mobile laser head generating a beam with a round cross-section. In this case, the head traveled along the element's circumference. Test results are presented in [7]. Moreover, since the temperature of the process should be controlled and constant, the stand was expanded by adding a real-time laser power control module depending on the readings of a pyrometer. This will make it possible to set a constant temperature of the process on the bending plane. Temperature control is extremely important, as it allows for controlling phase transformations in the material. In the next stage of work, it was decided to use a laser beam with a rectangular cross-section. A diagram of heating is presented in Fig. 4.*

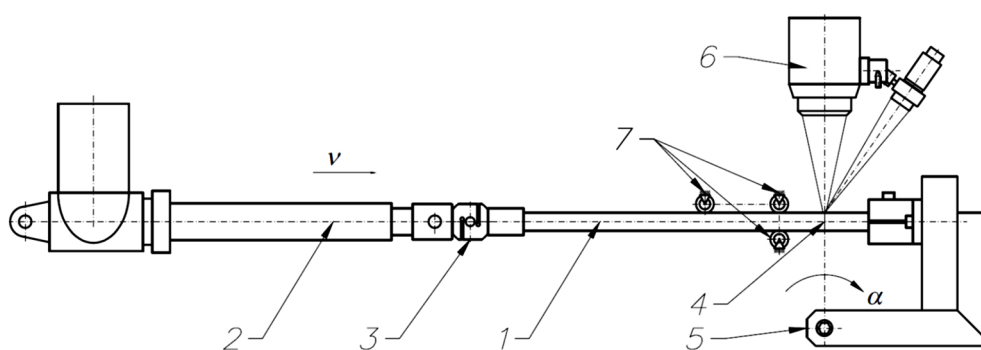


Rys. 4. Schemat sposobu nagrzewania elementu głowicą nieruchomą, generującą wiązkę prostokątną:  
1 – głowica laserowa generująca wiązkę prostokątną 20x1 mm, 2 – obszar padania wiązki laserowej,  
3 – pirometr do kontroli temperatury powierzchni elementu w płaszczyźnie gięcia

Fig. 4. Diagram of the method of heating the element with an immobile head generating a rectangular beam:  
1 – laser head generating a 20x1 mm rectangular beam, 2 – area illuminated by laser beam,  
3 – pyrometer for temperature control of the element's surface on the bending plane

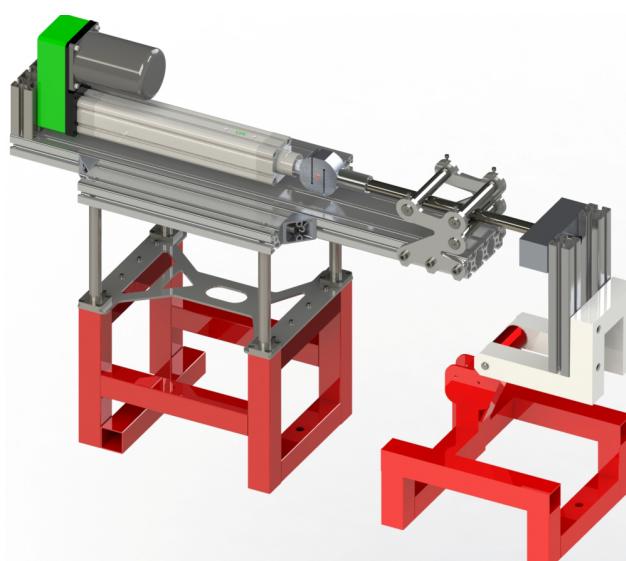
Na podstawie zaprezentowanej koncepcji wykonano projekt techniczny urządzenia, modyfikując manipulator użyty w pierwszych etapach badania procesu hybrydowego kształtowania laserowo-mechanicznego. Modyfikacji uległ system prowadzenia elementu, który pozwala na kształtowanie nie tylko rur, ale i elementów o innej geometrii (np. stożków będących wyjściowym kształtem dla dyfuzorów). Schemat urządzenia zaprezentowano na rys. 5. Natomiast koncepcyjny projekt urządzenia zaprezentowano na rys. 6.

A technical design of the machine was created based on the presented concept, modifying the manipulator used in the first stages of testing the hybrid, laser-mechanical forming process. The element guiding system was also modified to allow for forming of not only pipes but also elements of different geometries (e.g. cones being the initial shape of diffusers). A diagram of the machine is presented in Fig. 5. The concept design of the machine is shown in Fig. 6.



Rys. 5. Schemat urządzenia do kształtowania elementów cienkościennych przy pomocy hybrydowej metody laserowo-mechanicznej: 1 – formowany element, 2 – siłownik elektryczny, 3 – czujnik siły, 4 – płaszczyzna gięcia, 5 – ramię gnące swobodne z zainstalowanym inklinometrem, 6 – głowica laserowa z systemem kontroli temperatury procesu, 7 – system rolek

Fig. 5. Diagram of machine for forming thin-walled elements using the hybrid, laser-mechanical method: 1 – formed element, 2 – electrical actuator, 3 – force sensor, 4 – bending plane, 5 – free bending arm with installed inclinometer, 6 – laser head with process temperature control system, 7 – roller system



Rys. 6. Koncepcyjny projekt urządzenia – główne elementy

Fig. 6. Concept design of machine – main components

Na podstawie projektu technicznego wykonano urządzenie i zmontowano stanowisko badawcze o następujących parametrach technicznych:

- siłownik pchający DSV5030-200-03 i czujnik siły o zakresie pomiarowym 0–1000N,
- maksymalna siła pchająca – 5000 N,
- minimalna średnica giętego elementu – bez ograniczeń,
- maksymalna średnica giętego elementu – 50 mm,
- maksymalny kąt gięcia – 90°,
- minimalny promień gięcia – 50 mm,
- maksymalny promień gięcia – 127 mm (przy kącie maksymalnym 90°),
- maksymalny promień gięcia – 229 mm (przy kącie maksymalnym 50°).

## 2. PRZEPROWADZENIE EKSPERYMENTU

Na tak przygotowanym stanowisku zostały wykonane badania doświadczalne procesu gięcia cienkościennych elementów: rurowych o średnicy 20 mm oraz dyfuzora stożkowego wykonanych ze stali kwasoodpornej X5CrNi18-10 o grubości 1 mm. Promień gięcia  $R$  wynosił 215 mm.

Zamocowany element nagrzewano wiązką o przekroju prostokątnym w płaszczyźnie gięcia zgodnie ze schematem z rys. 4 i 5. Doświadczenie zostało wykonane na 5-osiowym laserowym centrum obróbczym Trumpf LaserCell 1005. Parametry pracy użytego lasera CO<sub>2</sub> TruFlow 6000 były następujące: temperatura powierzchni nagrzewanego elementu  $T = 800^{\circ}\text{C}$  oraz  $T = 1000^{\circ}\text{C}$  (moc lasera była dobierana w czasie rzeczywistym na podstawie wskazań pirometru), wiązka prostokątna 20x1 mm nieruchoma. Jednocześnie z nagrzewaniem na kształtowany element działała siła pochodząca od siłownika pchającego. Prędkość posuwu siłownika ustalono na  $v = 20$  mm/min – dla rur, a także  $v = 10$  mm/min – dla dyfuzora. Przy maksymalnym dopuszczalnym wysuwie siłownika  $l = 190$  mm uzyskiwano kąt gięcia  $a = 50^{\circ}$ . Na rys. 7 przedstawiono poszczególne fazy gięcia na przykładzie elementu rurowego.

*The machine was built and a test stand with the following technical specifications was assembled based on the technical design:*

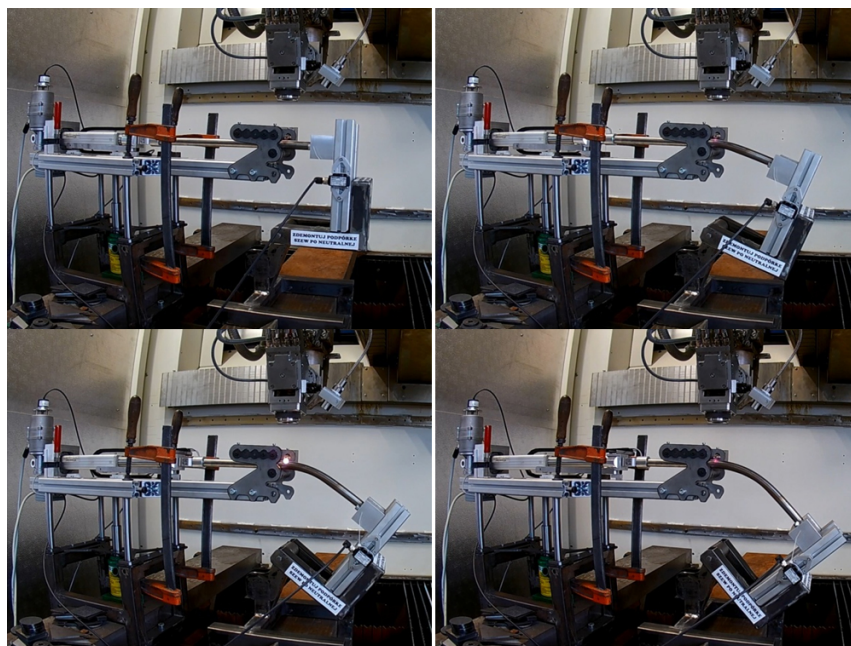
- *pushing actuator DSV5030-200-03 and force sensor with measuring range 0–1000N,*
- *maximum pushing force – 5000 N,*
- *minimum diameter of bent element – unlimited,*
- *maximum diameter of bent element – 50 mm,*
- *maximum bending angle – 90°,*
- *minimum bending radius – 50 mm,*
- *maximum bending radius – 127 mm (at maximum angle 90°),*
- *maximum bending radius – 229 mm (at maximum angle 50°).*

## 2. PERFORMANCE OF EXPERIMENT

*This test stand was used to perform experimental tests of the process of bending thin-walled elements: pipe 20 mm in diameter and conical diffuser made from X5CrNi18-10 acid-resistant steel with a thickness of 1 mm. Bending radius  $R$  was equal to 215 mm.*

*The fastened element was heated using a beam with a rectangular cross-section on the bending plan according to the diagram shown in Fig. 4 and 5. The experiment was performed with the application of a Trumpf LaserCell 1005 5-axial laser machining center. The working parameters of the TruFlow 6000 CO<sub>2</sub> laser that was used were as follows: surface temperature of heated element  $T = 800^{\circ}\text{C}$  and  $T = 1000^{\circ}\text{C}$  (laser power was adjusted in real time based on pyrometer readings), immobile, 20x1 mm rectangular beam. Force originating from the pushing actuator also acted on the formed element simultaneously with heating. The actuator's speed of advance was set to  $v = 20$  mm/min – for pipe, and  $v = 10$  mm/min – for diffuser. At the maximum extension of the actuator,  $l = 190$  mm, a bending angle of  $a = 50^{\circ}$  was obtained. Fig. 7 presents individual phases of bending on the example of a pipe element.*



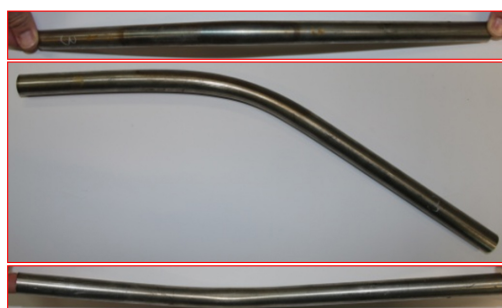


Rys. 7. Etapy procesu gięcia elementu rurowego z użyciem nieruchomej wiązki prostokątnej

*Fig. 7. Stages of the process of bending a pipe element using an immobile, rectangular beam*

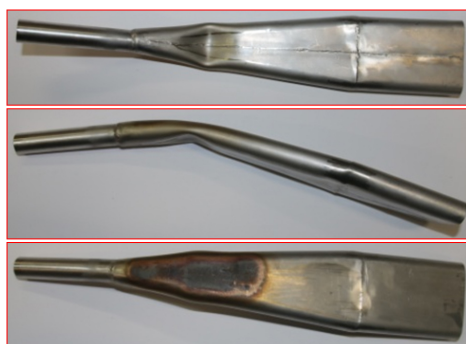
Przykłady wykonanych elementów rurowych i dyfuzora zostały przedstawione na rys. 8 i 9. Na rys. 10 i 11 przedstawiono przykładowe, zbiorcze wykresy sił gięcia, temperatury procesu i kąta gięcia w funkcji przemieszczenia siłownika.

*Examples of ready pipe and diffuser elements are presented in Fig. 8 and 9. Fig. 10 and 11 present examples of cumulative charts of bending forces, process temperature and bending angle as a function of the actuator's displacement.*



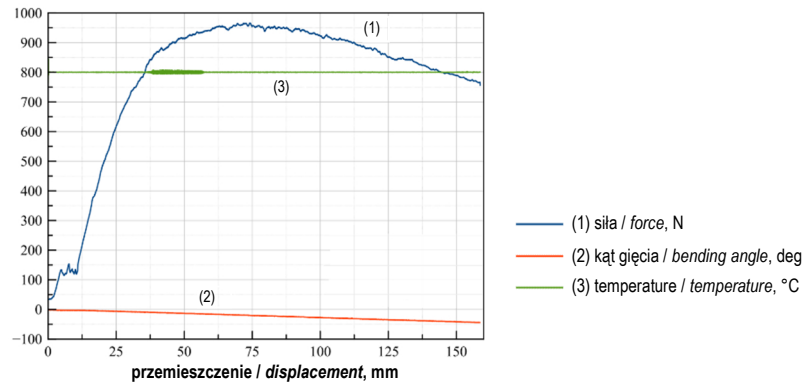
Rys. 8. Cienkościenny element rurowy po hybrydowym kształtowaniu laserowo-mechanicznym

*Fig. 8. Thin-walled pipe element after hybrid, laser-mechanical forming*

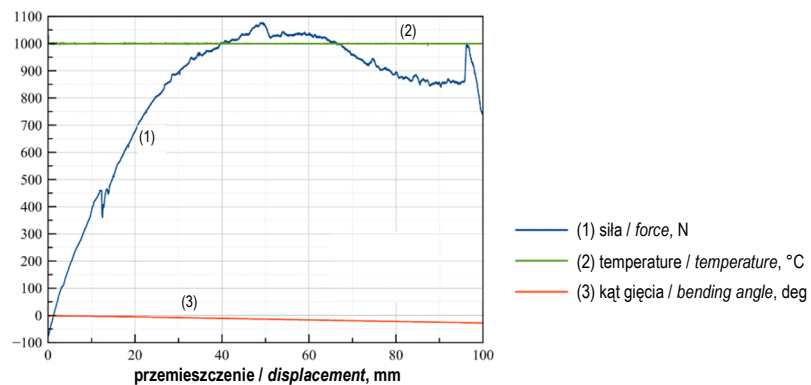


Rys. 9. Cienkościenny element w postaci dyfuzora stożkowego po hybrydowym kształtowaniu laserowo-mechanicznym

*Fig. 9. Thin-walled element in the form of a conical diffuser after hybrid, laser-mechanical forming*



Rys. 10. Zmiana siły gięcia  $F$ , temperatury procesu  $T$ , kąta gięcia  $\alpha$  dla cienkościennego elementu rurowego  
 Fig. 10. Change of bending force  $F$ , process temperature  $T$ , bending angle  $\alpha$  for thin-walled pipe element



Rys. 11. Zmiana siły gięcia  $F$ , temperatury procesu  $T$ , kąta gięcia  $\alpha$  dla cienkościennego elementu postaci dyfuzora stożkowego  
 Fig. 11. Change of bending force  $F$ , process temperature  $T$ , bending angle  $\alpha$  for thin-walled element in the form of a conical diffuser

#### 4. DYSKUSJA WYNIKÓW ORAZ WNIOSKI

Opracowana koncepcja hybrydowego kształtowania laserowego wspomaganego mechanicznie została przetestowana na specjalnie zaprojektowanym i zbudowanym stanowisku roboczym. System kontroli temperatury sprawdza się bardzo dobrze, co sugeruje, że w materiale zostanie zachowana struktura wyjściowa (planowane są dodatkowe badania materiałowe). Ma to wpływ na właściwości mechaniczne gotowego elementu. Przy zastosowaniu opisywanej metody uzyskano efekt gięcia rur. Obniżenie potrzebnej mocy wiązki można uzyskać poprzez wykorzystanie lasera emitującego wiązkę o krótszej długości fali niż wiązka lasera CO<sub>2</sub> (długość fali 10,6 μm). Energia wiązki laserów diodowych, Nd:YAG czy włóknowych, o długości fali ok. 1 μm, jest znacznie lepiej pochłaniana przez materiały metaliczne.

#### 4. DISCUSSION OF RESULTS AND CONCLUSIONS

The developed concept of hybrid, mechanically assisted laser forming was tested on a specially designed and built test stand. The temperature control system works very well, which suggests that the initial structure will be preserved in the material (additional material tests are planned). This has an influence on the mechanical properties of the ready element. Pipe bending was achieved with the application of the described method. The required beam power can be reduced by using a laser emitting a beam with a shorter wavelength than the CO<sub>2</sub> laser beam (wavelength 10.6 μm). The beam energy of diode, Nd:YAG or fiber lasers, with a wavelength of approx. 1 μm, is absorbed to a much greater extent by metallic materials.

Przeprowadzone badania wskazują, że istnieje możliwość formowania tą metodą elementów wyjściowych w postaci stożków. Technologię wytwarzania takich elementów należy jednak dopracować ze względu na pojawienie się załamania elementu po stronie ściskanej. Autor uważa, że można temu zapobiec poprzez nagrzewanie elementu na całym obwodzie (nie tylko po stronie rozciąganej). Jednakże dysponując obecnie posiadanym parkiem maszynowym, wykonanie takiego nagrzewania będzie bardzo trudne. Należałoby zastosować inne urządzenie, np. posiadające kilka głowic laserowych, które będą wykonywały zaprogramowane ruchy. W przypadku braku możliwości całkowitego wyeliminowania zagięcia po stronie ściskanej należy rozważyć wykończenie gotowego elementu poprzez zastosowanie np. technologii hydroformowania.

Jak wynika z zaprezentowanych wykresów, siła gięcia zmienia się wraz z przemieszczeniem siłownika. Rośnie do pewnej wartości, a następnie zaczyna nieznacznie spadać. Jest to najprawdopodobniej spowodowane samym momentem gnącym, który zmienia się w zależności od uzyskanego kąta gięcia elementu. Nasuwa to wniosek, że samo ramię gnące powinno być również niezależnie napędzane. Pomiar siły na ramieniu pozwoli na projektowanie procesu kształtowania. Ponadto w trakcie badań zauważono, że konstrukcja nie jest dostatecznie sztywna na prowadnicach pionowych, co skutkuje mniejszą dokładnością kształtu wykonanych elementów. W związku z powyższym została zaprojektowana nowa, ulepszona konstrukcja, która na dzień obecny jest w trakcie budowy.

Założenia oraz koncepcje hybrydowej metody laserowo-mechanicznej kształtowania elementów cienkościennych były prezentowane na konferencjach krajowych i zagranicznych. Na tej podstawie zespół z PŚk dnia 10.05.2017 r. dokonał zgłoszenia patentowego do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej wynalazku pt. „Sposób i urządzenie do jednopłaszczyznowego gięcia profili cienkościennych”, zgłoszenie nr PL421537. Decyzją z dnia 04.06.2018 r. otrzymano patent udzielony przez Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej.

*Conducted research indicates that it is possible to form conical starting elements by means of this method. However, the technology of manufacturing such elements must still be fine-tuned due to crumpling of the element on the compressed side. The author believes that this can be prevented by heating the element on its entire circumference (not only on the side subjected to tension). However, the machine park currently available makes it very difficult to execute such heating. A different machine, e.g. one with several laser heads that would perform programmed motions, would have to be applied. In the case where it is not possible to eliminate the bend on the compressed side entirely, finishing of the ready element by means of, e.g. hydroforming technology, should be considered.*

*As the presented charts show, bending force changes with the actuator's displacement. It grows up to a certain value, then begins to fall slightly. This is most probably caused by the bending moment itself, which changes depending on the obtained angle of bending of the element. This suggests that the bending arm itself should also have an independent drive. Force measurement on the arm will make it possible to design the forming process. Moreover, during tests, it was observed that the structure is not sufficiently rigid on vertical guides, which results in lower shape accuracy of the formed elements. In relation to the above, a new and improved structure will be designed, and is currently under construction.*

*The assumptions and concepts of the hybrid, laser-mechanical method of forming thin-walled elements have been presented at domestic and foreign conferences. On this basis, on 10.05.2017, the team from Kielce University of Technology filed a patent application at the Patent Office of the Republic of Poland for the invention titled Method and machine for single-plane bending of thin-walled profiles, patent application no. PL421537. By the decision of 04.06.2018, a patent was granted by the Patent Office of the Republic of Poland.*

**PODZIĘKOWANIA**

Przedstawione w niniejszej publikacji wyniki badań są finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach prowadzonego grantu numer PBS3/A5/47/2015.

**ACKNOWLEDGEMENTS**

*The research reported herein was supported by a grant from the National Centre for Research and Development (No. PBS3/A5/47/2015).*

**LITERATURA**

- [1] Deacon D.L. 1984. *Material Degradation in Heavy Steel Plates Caused by Bending with a Laser*. Praca magisterska. Cambridge, USA: Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Ocean Engineering.
- [2] Scully K. 1987. „Laser line heating”. *Journal of Ship Production* 3 (4): 237–246.
- [3] Namba Y. 1986. „Laser Forming in Space”. W *Proceedings of the International Conference on Lasers’85, Las Vegas, Nevada*, 403–407.
- [4] Namba Y. 1987. „Laser Forming of Metals and Alloys”. W *Proceedings of Laser Advanced Materials Processing, Anaheim, CA*, 601–606.
- [5] Frąckiewicz H., Z. Mucha, W. Trąmpczyński, A. Baranowski, A. Cybulski. 1987. *Sposób gięcia przedmiotów metalowych*. Patent PL155358. Data zgłoszenia 26.11.1987.
- [6] Mucha Z., J. Widłaszewski, P. Kurp, K. Mulczyk. 2016. „Mechanically assisted laser forming of thin beams”. W *Proceedings of SPIE, Laser Technology 2016: Progress and Applications of Lasers, Szczecin–Świnoujście, Poland, 25–29 September, 2016*, 1–10.
- [7] Widłaszewski J., M. Nowak, Z. Nowak, P. Kurp. 2017. „Kształtowanie profili cienkościennych wspomaganie laserowo”. *Obróbka Plastyczna Metali* 28 (3): 183–198.
- [8] Gądek T., Ł. Nowacki. 2017. „Kształtowanie elementów cienkościennych z zastosowaniem strefowego podgrzewania laserowego”. *Obróbka Plastyczna Metali* 28 (3): 171–182.

**REFERENCES**

- [1] Deacon D.L. 1984. *Material Degradation in Heavy Steel Plates Caused by Bending with a Laser*. Master’s thesis. Cambridge, USA: Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Ocean Engineering.
- [2] Scully K. 1987. “Laser line heating”. *Journal of Ship Production* 3 (4): 237–246.
- [3] Namba Y. 1986. “Laser Forming in Space”. In *Proceedings of the International Conference on Lasers’85, Las Vegas, Nevada*, 403–407.
- [4] Namba Y. 1987. “Laser Forming of Metals and Alloys”. In *Proceedings of Laser Advanced Materials Processing, Anaheim, CA*, 601–606.
- [5] Frąckiewicz H., Z. Mucha, W. Trąmpczyński, A. Baranowski, A. Cybulski. 1987. *Sposób gięcia przedmiotów metalowych*. Patent PL155358. Date of application 26.11.1987.
- [6] Mucha Z., J. Widłaszewski, P. Kurp, K. Mulczyk. 2016. “Mechanically assisted laser forming of thin beams”. In *Proceedings of SPIE, Laser Technology 2016: Progress and Applications of Lasers, Szczecin–Świnoujście, Poland, 25–29 September, 2016*, 1–10.
- [7] Widłaszewski J., M. Nowak, Z. Nowak, P. Kurp. 2017. “Laser-assisted forming of thin-walled profiles”. *Obróbka Plastyczna Metali* 28 (3): 183–198.
- [8] Gądek T., Ł. Nowacki. 2017. “Shaping thin-walled elements using zone laser heating”. *Obróbka Plastyczna Metali* 28 (3): 171–182.