



Kształtowanie profili cienkościennych wspomagane laserowo

Laser-assisted forming of thin-walled profiles

(1) Jacek Widłaszewski^{*1}, (2) Marcin Nowak¹, (3) Zdzisław Nowak¹, (4) Piotr Kurp²

¹ Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, ul. Adolfa Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa, Poland

² Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Centrum Laserowych Technologii Metali, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, Poland

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 20.06.2017

Recenzja: 5.07.2017

Akceptacja: 29.09.2017

Wkład autorów

- (1) Współdział w formułowaniu koncepcji i założeń, przeprowadzenie symulacji i analiz numerycznych
- (2) Współdział w formułowaniu koncepcji i założeń, przeprowadzenie symulacji i analiz numerycznych
- (3) Współdział w formułowaniu koncepcji i założeń, przeprowadzenie symulacji i analiz numerycznych
- (4) Współdział w formułowaniu koncepcji i założeń, przeprowadzenie badań eksperymentalnych

Streszczenie

W ostatnich latach badane są procesy kształtowania plastycznego z wykorzystaniem lokalnego nagrzewania laserowego. Nagrzewanie ma na celu umożliwienie lub ułatwienie obróbki plastycznej materiałów, które wykazują niekorzystne właściwości, jak: kruchość, silne efekty umocnienia czy powrotnego odkształcenia sprężystego. Zaprezentowane badania dotyczą hybrydowego termo-mechanicznego kształtowania plastycznego elementów cienkościennych z użyciem lokalnego nagrzewania materiału wiązką laserową. Docelowo prace są nakierowane na formowanie elementów ze stopów wykorzystywanych w przemyśle lotniczym takich, jak nadstopy niklu Inconel 625, Inconel 718, a także wysokostopowe stale martenzytyczne AISI 410 i AISI 325. Wstępne badania przeprowadzono z użyciem stali nierdzewnej X5CrNi18-10. Prace eksperymentalne i symulacje numeryczne objęły zachowanie się płaskowników o grubości 1 mm, poddanych działaniu obciążenia mechanicznego w układzie wysięgnikowym i nagrzewanych wiązką lasera CO₂, przemieszczaną od swobodnego końca próbki do miejsca jej zamocowania. Doświadczalnie wykazano możliwość stosunkowo łatwego uzyskiwania dużych deformacji giętych dzięki zastosowaniu nagrzewania laserowego. Zweryfikowane eksperymentalnie symulacje numeryczne, które wykonano metodą elementów skończonych, ujawniły intensywne płynięcie plastyczne warstwy ogrzewanej wiązką laserową. Towarzystwo temu przemieszczanie się osi obojętnej przekroju. W kolejnym etapie badane było gięcie rur cienkościennych na specjalnie skonstruowanym stanowisku. Umożliwia ono kontrolowane wprowadzanie obciążenia mechanicznego, ogrzewanie materiału ruchomą wiązką laserową i wymuszanie zadanej deformacji zgodnie ze schematem kinematycznym urządzenia.

Słowa kluczowe: kształtowanie wspomagane laserowo, metoda elementów skończonych, konstrukcja cienkościenna

Article info

Received: 20.06.2017

Reviewed: 5.07.2017

Accepted: 29.09.2017

Authors' contribution

- (1) Participation in formulating concepts and assumptions, performing numerical simulations and analyzes
- (2) Participation in formulating concepts and assumptions, performing numerical simulations and analyzes

Abstract

Forming processes assisted by localised laser heating are studied in recent years. Heating is used to make it possible or facilitate forming of materials, which exhibit such adverse properties as: brittleness, effects of high work-hardening or a high elastic spring-back. The hereby presented investigations concern the hybrid thermo-mechanical forming of thin-walled parts using local heating of the material by the laser beam. The research is aimed at forming of parts from materials used in the aviation industry, such as the nickel-base super-alloys Inconel 625, Inconel 718, and also martensitic super-alloys AISI 410 and AISI 325. Preliminary investigations are conducted using X5CrNi18-10 (1.4301) stainless steel. Experimental study and numerical simulations cover the behaviour of thin beams 1 mm thick, subjected to mechanical load in the cantilever arrangement and heated by the CO₂ laser beam moving from the free end of the sample towards its fixture. The possibility of obtaining large bending deformations relatively easily due to

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 22 826 12 81 w. 320; e-mail: Jacek.Widlaszewski@ippt.pan.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 22 826 12 81 ext. 320; e-mail: Jacek.Widlaszewski@ippt.pan.pl

- (3) Participation in formulating concepts and assumptions, performing numerical simulations and analyses
- (4) Participation in formulating concepts and assumptions, performing experimental research

the application of laser beam is demonstrated experimentally. Experimentally verified finite element numerical simulations show the intense plastic flow of the material layer heated by the laser beam. It is accompanied by a shift of the cross-section neutral axis of the beam. Bending of thin-walled tubes in a specially designed device is studied in the next step. It allows introducing mechanical loading in a controlled manner, heating the material by a moving laser beam and forcing the required deformation according to the kinematic scheme of the device.

Keywords: laser-assisted forming, finite element method, thin-walled structure

1. WPROWADZENIE

Ze względu na rosnące zainteresowanie stosowaniem ultrawysokowytrzymałych stali, wysokowytrzymałych stopów aluminium, a także takich materiałów kruchych, jak stopy magnezu i stopy tytanu, w ostatnich latach rozwijane są procesy obróbki plastycznej z lokalnym podgrzewaniem kształtowanych przedmiotów. Wykorzystują one generalny spadek granicy plastyczności, a także zwiększenie płynięcia plastycznego tych materiałów w podwyższonej temperaturze. Termiczne wspomaganie obróbki plastycznej pozwala znacząco powiększać użytkowy zakres parametrów technologicznych, stosować mniejsze siły, z mniejszym zużyciem narzędzi kształtujących, a także z redukcją powrotnego odkształcenia sprężystego [1]. Obok stosowania innych źródeł ciepła, badane są także możliwości wykorzystania wiązki laserowej jako źródła precyzyjnie sterowanego pod względem intensywności oraz lokalizacji oddziaływania w czasie i w przestrzeni [2]. Obecnie używane są diody laserowe dużej mocy i lasery włóknowe.

Od lat 80. ubiegłego stulecia trwają prace badawcze nad wykorzystaniem wiązki laserowej do kontrolowanego wywoływania trwałych zmian kształtu bez stosowania sił zewnętrznych, a tylko dzięki zjawisku rozszerzalności termicznej [3–5]. Tego rodzaju obróbkę plastyczną można nazwać kształtowaniem przyrostowym [6] lub narastającym [7], ponieważ całkowite odkształcenie plastyczne jest zazwyczaj uzyskiwane poprzez sumowanie małych odkształceń wywołanych lokalnie oddziaływaniem wiązki laserowej. Jednak w przypadku kształtowania laserowego nie występuje mechaniczny kontakt pomiędzy narzędziem kształtującym a obrabianym

1. INTRODUCTION

With a growing interest in application of the ultra-high strength steel, the high strength aluminium alloys, as well as such brittle materials like magnesium and titanium alloys, the metal forming processes with local heating of the workpiece are under development in recent years. They exploit the general decrease of the yield stress value and an increase in plastic flow of these materials with the temperature increase. The thermal-assistance of metal forming processes offers the opportunity to enlarge significantly the usable range of technological parameters, to apply smaller forces, with reduced wear of forming tools, and also with the reduction of the spring-back effect [1]. Along with application of other heat sources, possibilities of using the laser beam as a source precisely controlled regarding its intensity and localisation in time and space are studied [2]. At present the large power laser diodes and fibre lasers are used.

Since the 80's of the last century, the research on using the laser beam to produce controlled permanent changes of shape without applying any external forces, and only due to the phenomenon of thermal expansion is continued [3–5]. This kind of metal forming can be called the incremental forming [6], [7], because the total plastic deformation usually is a sum of small deformations generated locally by the laser beam heating. However, in the case of laser forming processes there is no mechanical contact between the forming tool and the workpiece. Investigation of the method, which has its roots in the technique of forming and straightening by heating

przedmiotem. Badania nad metodą, która ma swoje źródła w technice kształtowania i prostowania przez nagrzewanie płomieniem palnika gazowego [8], dotyczą nie tylko makroskopowych zmian kształtu blach, płyt, rur i profili walcowanych wykonanych z materiałów metalicznych, ale także bardzo małych deformacji (o skali mikronowej lub mniejszej) [9], obiektów z materiałów ceramicznych [10], a nawet tworzyw sztucznych [11]. Dodanie sił zewnętrznych do lokalnego nagrzewania wiązką laserową może znacząco zwiększać efekty kształtowania [12–15].

Niniejszy artykuł prezentuje pierwszy etap badań nad hybrydowym termo-mechanicznym kształtowaniem plastycznym elementów cienkościennych z użyciem lokalnego nagrzewania materiału wiązką laserową. Docelowo prace są nakierowane na formowanie elementów ze stopów wykorzystywanych w produkcji silników lotniczych takich, jak nadstopy niklu Inconel 625, Inconel 718, a także wysokostopowe stale martenzytyczne AISI 410 i AISI 325. W badaniach wstępnych użyto stali nierdzewnej X5CrNi18-10.

Przeprowadzono badania doświadczalne i modelowanie teoretyczne zachowania się płaskowników i rur o przekroju kołowym pod obciążeniem mechanicznym i przy nagrzewaniu ruchomą wiązką laserową. Eksperymenty i symulacje numeryczne termoplastycznych deformacji płaskowników posłużyły do opracowania technik doświadczalnych, sposobów modelowania numerycznego i weryfikacji danych materiałowych na potrzeby badań termomechanicznego gięcia profili zamkniętych. W przypadku płaskowników stosowana była wiązka laserowa o przekroju prostokątnym, a w przypadku rur – o przekroju kołowym. Proces gięcia termomechanicznego został zamodelowany przy użyciu programu metody elementów skończonych ABAQUS. Uwzględniono dyssypację ciepła drogą promieniowania i konwekcji. Wyniki badań eksperymentalnych i modelowania teoretycznego pozwalają przeanalizować mechanizm deformacji i rolę parametrów oddziaływania na termoplastyczne zachowanie płaskowników i rur pod obciążeniem zewnętrznym i przy nagrzewaniu ruchomą wiązką laserową.

with a flame of a gas torch [8], is concerned not only with the macroscopic shape changes of sheet metals, plates, tubes and rolled profiles from metallic materials, but also deals with very small deformations (in a micrometer or sub-micrometer scale) [9], with objects made of ceramic materials [10], and even the plastics [11]. The addition of external loads to the local heating with the laser beam can significantly enhance the effects of forming [12–15].

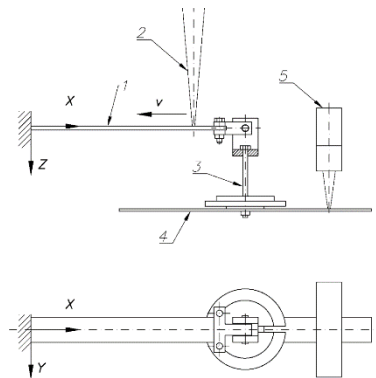
This article presents the first stage of investigations on the hybrid thermo-mechanical forming of thin-walled parts using local heating of the material with a laser beam. The studies are aimed at forming parts made of alloys used in manufacturing of aircraft engines, such as the nickel-base super-alloys Inconel 625, Inconel 718, and also a martensitic super-alloys AISI 410 and AISI 325. In preliminary investigations X5CrNi18-10 stainless steel is used.

Experimental investigations and theoretical modelling of the behaviour of thin beams and tubes with circular cross-section under mechanical loading and heated with a moving laser beam were performed. Experiments and numerical simulations of thermoplastic deformations of thin beams were used to study experimental techniques, numerical modelling methods and to verify material data for the study on thermo-mechanical bending of closed profiles. In the case of steel thin beams the laser beam with rectangular cross-section was applied, and in the case of tubes – the laser beam with circular cross-section. The process of thermo-mechanical bending was modelled by use of the finite element method program ABAQUS. Heat dissipation by radiation and convection was considered. Results of experimental investigations and theoretical modelling allow analysis of the deformation mechanism and the influence of processing parameters on thermoplastic behaviour of steel thin beams and tubes under external loading and heated with a moving laser beam.

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE LASEROWO WSPOMAGANEGO GIĘCIA PŁASKOWNIKÓW I RUR

2.1. Opis stanowiska do badań na płaskownikach

Doświadczalne badania termomechanicznego gięcia płaskowników zostały wykonane z użyciem próbek prostokątnych o grubości 1 mm i szerokości 20 mm, wykonanych ze stali nierdzewnej X5CrNi18-10 (1.4301). Próbki były mocowane i obciążane grawitacyjnie w układzie wysięgnikowym, jak pokazuje rys. 1.



Rys. 1. Układ do badania gięcia płaskowników pod obciążeniem mechanicznym i przy nagrzewaniu ruchomą wiązką laserową (1 – próbka, 2 – wiązka laserowa, 3 – zawieszce obciążników, 4 – płytka pomocnicza, 5 – odległościomierz laserowy)

Fig. 1. Experiment setup for laser bending of thin beams under mechanical load and heating with a moving laser beam (1 – sample, 2 – laser beam, 3 – holder of the weights, 4 – auxiliary plate, 5 – the optical displacement sensor)

Wstępne obciążenie mechaniczne pochodziło od ciężaru własnego próbki oraz od ciężaru Q obciążników mocowanych na jej swobodnym końcu, w odległości 175 mm od uchwytu. Przeprowadzono serię eksperymentów z różnymi wartościami obciążenia zewnętrznego Q w zakresie od 1,1 do 4 N.

Zastosowano wiązkę lasera TRUMPF TruFlow6000 CO₂ pracującego w trybie ciągłym (ang. *continuous wave*, CW) i emitującego promieniowanie o długości fali 10,6 mikrometra. Wiązka laserowa o przekroju w przybliżeniu prostokątnym 20 x 2 mm pokrywała całą szerokość próbki i była przemieszczana z prędkością $v = 200$ mm/min od pozycji $X = 150$ mm w stronę uchwytu ($X = 0$). Moc wiązki wynosiła 200 W. Dla zwiększenia stopnia przekazywania energii wiązki do materiału, czyli współczynnika absorpcji promieniowania, próbki były przed eksperymentami pokrywane czarną farbą.

2. EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE LASER-ASSISTED BENDING OF THIN BEAMS AND TUBES

2.1. Description of experimental setup for thin beams

Experimental investigations of thermo-mechanical bending of thin beams were conducted using rectangular samples with 1 mm thickness and 20 mm width, made of X5CrNi18-10 (1.4301) stainless steel. The samples were fixed in a cantilever arrangement and loaded due to the gravity as shown in Fig. 1.

The preliminary gravitational load of the sample originated from its own weight and from the weights (load Q) attached to its free end, at distance of 175 mm from the fixture. A series of experiments was conducted with different values of the external load Q in the range from 1.1 N to 4.0 N.

The beam of the TRUMPF TruFlow6000 CO₂ laser was applied, operating in the continuous wave (CW) mode and emitting radiance of 10.6 micrometers wavelength. Laser spot of approximately rectangular cross-section 20 mm x 2 mm covered the whole width of sample and was moving with velocity $v = 200$ mm/min from position $X = 150$ mm in the direction of beam fixture ($X = 0$). The power of laser beam was $P = 200$ W. In order to increase coupling of laser beam power to the material, i.e. the coefficient of radiation absorption, samples were coated with a black paint prior to experiments.

Deformacja próbki była mierzona przy użyciu laserowego odległościomierza triangulacyjnego MicroEpsilon LLT1700, który bezdotykowo mierzył pionowe przemieszczenie Z płytki pomocniczej (nr 4 na rys. 1) związanej z zawiesieniem obciążników. Przebieg tego przemieszczenia w czasie nagrzewania laserowego został użyty do weryfikacji poprawności numerycznego modelu procesu.

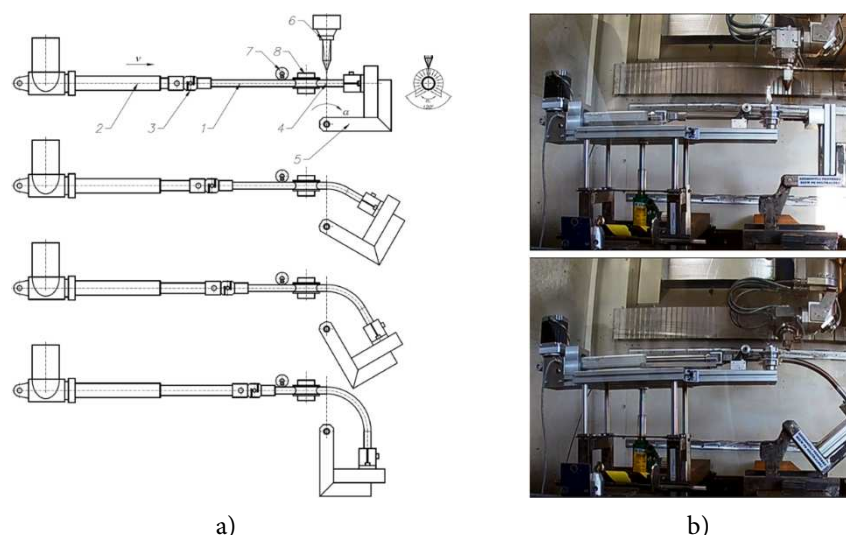
2.2. Opis stanowiska do badań na rurach

W Centrum Laserowych Technologii Metali Politechniki Świętokrzyskiej i Polskiej Akademii Nauk w Kielcach zostało zbudowane stanowisko do badań nad kształtowaniem profili cienkościennych z wykorzystaniem nagrzewania laserowego i sił zewnętrznych. Na rys. 2 przedstawiono schemat (a) i widok (b) układu eksperymentalnego, w którym zastosowano siłownik (2) napędzany elektrycznie, ramię (5) realizujące kinematyczne wymuszenie gięcia rury (1) i oscylacyjne nagrzewanie części obwodu rury w płaszczyźnie przechodzącej przez oś obrotu ramienia gnącego (5). Stanowisko badawcze zainstalowano w centrum obróbczym LaserCell 1005 zapewniającym możliwość 5-osiowego sterowania głowicą laserową (6).

The deformation of the sample was measured by use of the laser triangulation displacement meter MicroEpsilon LLT1700, which measured by a non-contact manner the vertical displacement Z of the auxiliary plate (no. 4 in Fig. 1), which was connected to the holder of weights. Time-runs of this displacement during laser heating were used to validate the numerical model of the process.

2.2. Description of the experimental setup for tubes

At the Centre for Laser Technologies of Metals of the Kielce University of Technology and Polish Academy of Sciences an experimental setup was built to investigate forming of thin-walled profiles with application of laser heating and external loads. Fig. 2 presents the scheme (a) and the view (b) of the setup with: an electric actuator (2), an arm (5) realizing kinematic enforcement of bending of the tube (1) and oscillatory heating of the part of the tube perimeter in the plane passing through the axis of rotation of the bending arm (5). The experimental setup was installed in LaserCell 1005 processing center, which provides 5-axis control of the laser head (6).



Rys. 2. a) Schemat procesu gięcia cienkościennej rury z użyciem wspomaganie laserowego (1 – rura, 2 – siłownik, 3 – czujnik siły, 4 – przekrój gięcia, 5 – ramię gnące, 6 – głowica lasera, 7 – rolka o osi poziomej, 8 – rolka o osi pionowej); (b) wybrane chwile czasowe z przebiegu eksperymentu

Fig. 2. a) A scheme of the laser-assisted process of bending of a thin-walled tube (1 – tube, 2 – actuator, 3 – force sensor, 4 – cross-section of bending, 5 – bending arm, 6 – laser head, 7 – roller with horizontal axis, 8 – roller with vertical axis); b) a view of the process at selected two time instants

Badania doświadczalne przeprowadzono na rurach o średnicy 20 mm i grubości ścianki 1 mm, wykonanych ze stali X5CrNi18-10. Powierzchnia poddana oddziaływaniu wiązki laserowej była w stanie surowym, to jest bez stosowania powłoki absorpcyjnej.

3. SYMULACJE NUMERYCZNE

3.1. Założenia

Pola temperatury, naprężenia i odkształcenia podczas termo-mechanicznego obciążania płaskowników i rur zostały wyznaczone w ramach analizy termo-mechanicznej sprzężonej sekwencyjnie. W pierwszej kolejności było wyznaczane pole temperatury generowane przez ruchomą wiązkę laserową przyjętą jako powierzchniowe źródło ciepła (HEAT TRANSFER STEP na konfiguracji początkowej). Następnie to pole temperatury było wykorzystywane jako obciążenie termiczne w quasi-statycznej analizie mechanicznej (STATIC GENERAL STEP), przy uwzględnieniu zewnętrznego obciążenia mechanicznego. Wpływ ciepła generowanego przy plastycznej deformacji materiału został pominięty wobec wielokrotnie większego ciepła dostarczanego przez wiązkę laserową. Pominięto także efekty dynamiczne pochodzące od siły bezwładności ze względu na powolność procesu deformacji. Obliczenia wykonano z użyciem komercyjnego programu ABAQUS opartego na metodzie elementów skończonych.

Przyjęto jednorodny rozkład powierzchniowej gęstości mocy na poprzecznym przekroju wiązki laserowej, to jest model profilu „top-hat”. Po przeprowadzeniu serii symulacji komputerowych laserowo wspomagane gięcia płaskowników ze stali nierdzewnej pokrytej absorberem stwierdzono, że dobrą zgodność wyników obliczeń z wynikami eksperymentów uzyskuje się, przyjmując wartość współczynnika absorpcji promieniowania wiązki laserowej przez obrabiany materiał wynoszącą 0,7.

Korzystając z prawa Kirchhoffa wiążącego ze sobą zdolność absorpcyjną ze zdolnością emisyjną powierzchni ciała, wartość współczynnika absorpcji dla powierzchni rury ze stali stopowej chromoniklowej w stanie dostawy, bez pokrycia

Experimental investigations were conducted on tubes having diameter 20 mm and thickness 1 mm, made of X5CrNi18-10 steel. The surface of the tube subjected to laser irradiation was in the as-delivered condition, i.e. without application of any absorptive coating.

3. NUMERICAL SIMULATION

3.1. Assumptions

The temperature, stress and deformation fields during thermo-mechanical loading of thin beams and tubes were determined in a sequentially coupled thermo-mechanical analysis. In the first step, the temperature field due to the heating by a moving laser beam was calculated (HEAT TRANSFER STEP on the initial configuration). Laser beam was modeled as a surface heat flux. This temperature field was then used as a thermal load in the STATIC GENERAL STEP, together with an external mechanical load. The effect of heat generation due to the plastic deformation of the material has been neglected against much higher heat input by the laser beam. Dynamic effects from inertial forces were also neglected during the quasi-static deformation process. Calculations were made using the commercial program ABAQUS based on the finite element method.

A homogeneous distribution of the surface power density over the transverse cross-section of the laser beam, i.e. the top-hat profile model, was assumed. After a series of computer simulations of laser-assisted bending of thin beams made of stainless steel covered with absorber it was concluded that a good agreement between calculations and experimental results is obtained using the absorption coefficient value 0.7.

Applying the Kirchhoff's law, which binds absorptivity with emissivity of the body surface, the absorption coefficient for the surface of a tube made of chromium-nickel alloy in as-delivered condition without absorptive layer and

absorberem i w podwyższonej temperaturze, oszacowano na 0,36 [16].

Przy modelowaniu termo-mechanicznego gięcia płaskowników wykorzystano symetrię obiektu, obciążenia i mocowania. W zagadnieniu termicznym zastosowano elementy skończone 8-węzłowe DC3D8, a w zagadnieniu mechanicznym kompatybilne elementy C3D8. Dla uzyskania jak najlepszej dokładności modelowania wpływu gradientu temperatury i deformacji zgięciowej model składał się z 10 warstw elementów na grubości obiektu i 141600 elementów ogółem.

Uwzględniono zależność od temperatury następujących parametrów materiałowych: współczynnika przewodzenia ciepła, ciepła właściwego, gęstości, współczynnika liniowej rozszerzalności termicznej, modułu Younga, współczynnika Poissona i naprężenia uplastycznienia. Dane opisujące termoplastyczne zachowanie stali nierdzewnej X5CrNi18-10 zostały przygotowane z wykorzystaniem funkcji zaproponowanej w pracy [17] i bazując na wartości granicy plastyczności 234 MPa w temperaturze 20°C [18]. W analizach dotyczących tej stali zastosowano sprężysto-plastyczny model materiału z izotropowym umocnieniem i hipotezę wyężeniową Hubera-Misesa-Hencky'ego (HMH).

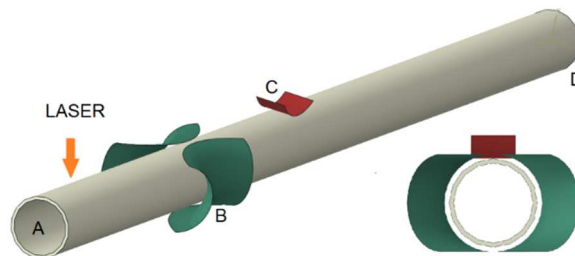
Numeryczny model procesu gięcia rury cienkościennej wykonany został w programie ABAQUS CAE 2016 z wykorzystaniem API (Application Programming Interface) dla języka PYTHON. Wygenerowany model geometryczny istotnych elementów stanowiska badawczego jest przedstawiony na rys. 3.

at elevated temperature was estimated to 0.36 [16].

Symmetry of the load, the object and boundary conditions was utilized in modelling of thermo-mechanical bending of thin beams. The 8-node compatible finite elements DC3D8 and C3D8 were used in heat transfer and thermo-mechanical simulations, respectively. The model consisted of 10 layers of elements over its thickness in order to achieve possibly best accuracy of modeling temperature gradient influence and the flexural deformation mode. The total number of elements was equal 141600.

Dependence of the following material parameters on temperature was respected: heat conduction, specific heat, density, linear expansion coefficient, Young's modulus, Poisson's ratio, and yield stress. Data describing the thermoplastic behavior of X5CrNi18-10 stainless steel were approximated using a function proposed in [17] and the yield strength 234 MPa at 20°C [18]. In numerical analysis concerning this steel, the elastic-plastic material model with isotropic hardening and a Huber-Mises-Hencky yield condition (HMH) were used.

Numerical model of thin-walled tube bending process was created in ABAQUS CAE 2016 using the API (Application Programming Interface) for PYTHON. The created geometric model of the relevant elements of the experimental setup is shown in Fig. 3.

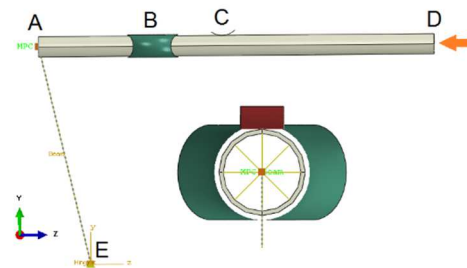


Rys. 3. Geometria opracowanego modelu numerycznego dla procesu termo-mechanicznego gięcia rury; punkty B i C oznaczają położenia rolek o osiach odpowiednio pionowej i poziomej, natomiast punkty A i D oznaczają odpowiednio początek i koniec rury; w prawym dolnym rogu rysunku przedstawiono widok rury i rolek prowadzących od strony czoła rury

Fig. 3. Geometry of the developed numerical model for thermo-mechanical tube bending; points B and C denote positions of the rollers with vertical and horizontal axes, respectively, while points A and D denote the beginning and the end of the tube, respectively; in the lower right corner of the picture there is a view of the tube and its rollers as seen from the front of the tube

Układ współrzędnych został przyjęty tak, aby oś z pokrywała się z osią zginanej rury natomiast osie x i y leżały w płaszczyźnie jej przekroju poprzecznego w konfiguracji początkowej. Długość modelu rury przyjęto równą 390 mm, co odpowiada odcinkowi łączącemu punkty mocowania rury z tłoczyskiem siłownika i w ramieniu gnącym. Ze względu na dużą sztywność ramienia gnącego w porównaniu do sztywności giętej rury, kształt geometryczny ramienia został pominięty w symulacji. Rolki modelowane jako nieruchome trójwymiarowe powierzchnie sztywne uproszczono do ich fragmentów w obszarze możliwych kontaktów z rurą. Kontakt między ciałami został zdefiniowany z użyciem procedury „GENERAL CONTACT” w oparciu o sformułowanie funkcji kary. W uproszczeniu kontaktu tocznego pomiędzy rurą a rolkami przyjęto model tarcia Coulomba o współczynniku tarcia równym 0,01.

Warunki brzegowe dla procesu zginania rury przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Warunki brzegowe dla procesu zginania rury (D – wymuszenie przemieszczeniowe, A – zadanie warunku MULTI-POINT CONSTRAINT wiążącego przemieszczenia z ruchem punktu, B – kontakt z rolką o osi pionowej, C – kontakt z rolką o osi poziomej, E – nieruchomy punkt obrotu)

Fig. 4. Boundary conditions for tube bending process (D – displacement enforcement, A – definition of MULTI-POINT CONSTRAINT condition which binds the displacement of the tube with motion of the cross section central point of the tube, B – contact between roller with vertical axis and the tube, C – contact between the roller with horizontal axis and the tube, E – fixed rotation center point)

Ruch tłoczyska siłownika został zamodelowany przez zadanie na przekroju poprzecznym rury w punkcie D przemieszczenia na kierunku osi z o wartości $u_z = -200$ mm. Pozostałe składowe wektora przemieszczenia w tym przekroju przyjęto jako zerowe. Proces modelowano numerycznie od chwili początkowej, w której rozpoczęła się wysuwanie tłoczyska siłownika ze stałą prędkością 0,33 mm/s, przy jednoczesnym włączeniu oscylacyjnego nagrzewania wiązką laserową o mocy 400 W. W chwili początkowej wiązka laserowa znajdowała się w odległości 50 mm od początku rury (A).

The coordinate system was oriented so as the z -axis coincided with the longitudinal axis of the tube to be bent. The x and y axes lay in the plane of the tube cross-section in the initial configuration. The tube length was assumed to be 390 mm which corresponds to the distance between the tube connection points with the actuator and with the bending arm. Because of the high stiffness of the bending arm as compared to the stiffness of the tube, the geometric shape of the arm was neglected in the simulation. The rollers, which were modeled as three-dimensional rigid surfaces, were simplified to their fragments in the area of possible contact with the tube. Contact between bodies was defined using the “GENERAL CONTACT” procedure based on the formulation of the penalty function. In the simplified model of rolling contact between the tube and rollers the friction coefficient value of 0.01 was used for Coulomb’s friction model.

The boundary conditions for the tube bending process are shown in Fig. 4.

Motion of the piston rod has been modeled as a change in the z -axis displacement of the tube cross-section at point D up to the value $u_z = -200$ mm. The other displacement components were assumed 0. The process was modeled from the initial time instant, when the piston rod motion with constant velocity 0.33 mm/s started, simultaneously with the beginning of oscillatory heating with a laser beam of power 400 W. At the initial time instant the laser beam was 50 mm from the front head of the tube (A).

W celu wymuszenia trajektorii ruchu początku (A) rury wynikającej z działania ramienia gnącego wykorzystano elementy typu „CONNECTOR”. Przemieszczenia punktów powierzchni czołowej rury zostały związane z ruchem punktu A znajdującego się na osi rury dzięki zastosowaniu procedury „MULTI-POINT CONSTRAINT”. Z punktem tym został połączony sztywny element belkowy, który mógł się obracać w płaszczyźnie yz względem nieruchomego punktu E. Element belkowy został połączony z punktem E przy użyciu elementu typu „HINGE”, który symuluje połączenie przegubowe.

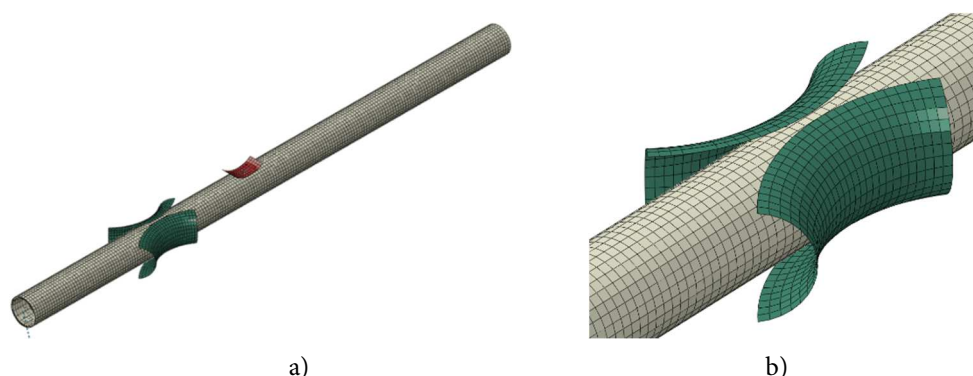
Poruszająca się po zewnętrznej powierzchni rury plamka laserowa modelowana była jako ruchome powierzchniowe źródło ciepła z użyciem dedykowanej procedury DFLUX dla programu ABAQUS/STANDARD. Trajektorią ruchu środka plamki wynikała z zadanej prędkości liniowej wysuwania tłoczyska oraz zadanej prędkości kątowej oscylacji głowicy lasera $\omega = \pm 6.67$ rad/s. Ze środkowym punktem plamki laserowej w procedurze DFLUX został związany kołowy obszar o średnicy równej średnicy plamki lasera, wynoszącej 3,5 mm.

Na rys. 5 jest przedstawiona siatka elementów skończonych dla omawianego modelu numerycznego. Rura została zdyskretyzowana z użyciem elementów typu C3D8R o wielkości $2,0 \times 2,0 \times 0,16$ mm. Do zamodelowania stalowych rolek o osi poziomej i pionowej zostały wykorzystane elementy powłokowe typu R3D4. Łączna liczba elementów i węzłów wynosiła odpowiednio 67870 i 103946.

In order to enforce the motion trajectory of the front end (A) of the tube in accordance to the bending arm action, finite elements of the type “CONNECTOR” were used. The cross-section displacement was associated with motion of the point A on the tube axis using the “MULTI-POINT CONSTRAINT” procedure. Point A was connected with point E using a rigid beam element, which could rotate in the yz plane about fixed point E. The beam element was connected with point E using the “HINGE”-type element.

The laser spot moving on the outer surface of the tube was modeled as a moving heat source using the dedicated DFLUX procedure for the ABAQUS/STANDARD program. The trajectory of the center of the laser spot was calculated according to the linear velocity of the piston rod and the specified angular velocity of the laser head oscillation $\omega = \pm 6.67$ rad/s. In the DFLUX procedure a circular area of diameter equal to a laser spot diameter of 3.5 mm was associated with the center point of the laser spot.

Fig. 5 shows a finite element mesh for the considered numerical model. The tube was digitized using C3D8R element of size $2.0 \times 2.0 \times 0.16$ mm. For the steel rollers with horizontal and vertical axis the R3D4 element was used. The total number of elements and nodes were 67870 and 103946, respectively.



Rys. 5. a) Siatka metody elementów skończonych; b) powiększony fragment siatki elementów skończonych rury i rolek o osi pionowej

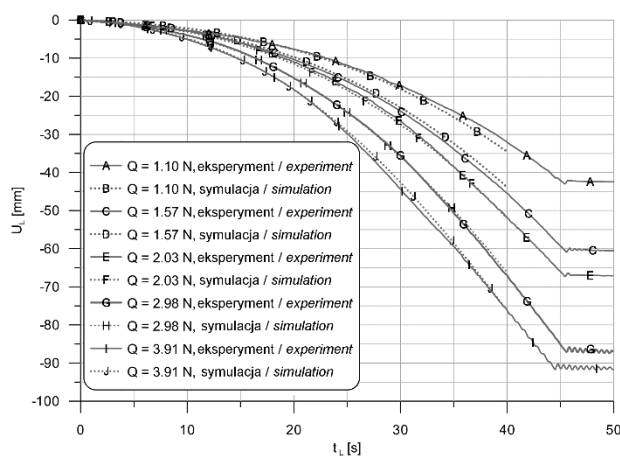
Fig. 5. a) A finite element mesh; b) an enlarged fragment of the finite element mesh of the tube and rollers having vertical axis

3.2. Wyniki symulacji numerycznych gięcia płaskowników

Rys. 6 przedstawia zarejestrowane i obliczone w symulacjach przebiegi czasowe ugięcia płaskowników wykonanych ze stali nierdzewnej, dla różnych wartości siły obciążenia zewnętrznego Q . Pokazane ugięcia U_L mierzono od konfiguracji równowagi w stanie obciążenia płaskownika siłą Q . Ujemne wartości ugięcia U_L oznaczają ugięcie w stronę przeciwną od kierunku działania wiązki laserowej. Czas t_L liczono od początku nagrzewania laserowego. Symulacje numeryczne obejmowały początkowe 40 s ruchu wiązki laserowej. Obliczenia równoległe realizowane na 12 rdzeniach procesorów Xeon X5650 taktowanych z częstotliwością 2,66 GHz trwały około 15 godzin. Przebiegi doświadczalne pokazują ugięcie wywołane przejściem wiązki laserowej aż do zamocowania płaskownika, a także wahania wywołane zakończeniem nagrzewania laserowego i towarzyszącym zanikiem gradientu temperatury na grubości próbki.

3.2. Results of the numerical simulation of thin beams

Fig. 6 shows the measured and calculated deflection time-runs for thin beams made of stainless steel with different values of the external load Q . The presented values of deflections U_L were measured from the equilibrium configuration of the beam loaded with force Q . The negative values of deflection U_L indicate that deflection is oriented in direction opposite to the incident laser beam. Time t_L was counted since the beginning of laser heating. Numerical simulations were performed for the initial 40 s of laser beam motion. Parallel computing on 12 cores of Xeon X5650 processors clocked at 2.66 GHz of this process took about 15 hours. Experimental results show deflections caused by the laser beam passage from the free end of the cantilever up to its fixture, followed by the fluctuations caused by the termination of laser heating and disappearance of the temperature gradient on the specimen thickness.



Rys. 6. Porównanie wyników doświadczalnych i numerycznych symulacji termo-mechanicznego gięcia płaskowników ze stali nierdzewnej

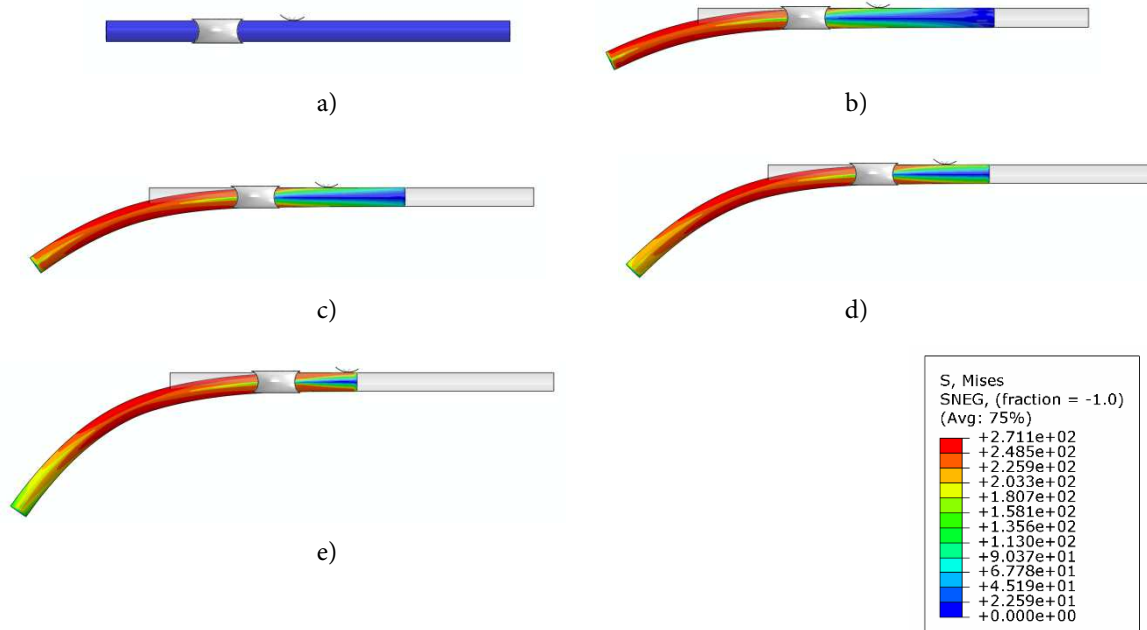
Fig. 6. A comparison of experimental and numerical results of thermo-mechanical bending of stainless steel thin beams

Uzyskana wysoka zgodność wyników symulacji numerycznych i pomiarów doświadczalnych potwierdza poprawność przyjętych założeń modelowych i danych materiałowych. Widoczne niewielkie rozbieżności przebiegów można przypisać nieuniknionemu brakowi powtarzalności warunków eksperymentów, a w szczególności rozrzutowi własności powłok absorpcyjnych na poszczególnych próbkach.

The good agreement between results of numerical simulations and experimental measurements confirms correctness of the applied model assumptions and material data. The visible minor discrepancy in the obtained results can be explained by an inevitable lack of repeatability of experimental conditions, in particular – by the scatter of the absorption coating properties for the individual samples.

3.3. Wyniki symulacji numerycznych gięcia rur

W pierwszej kolejności wykonana została symulacja gięcia rury na zimno, to jest bez nagrzewania laserowego. Poszczególne etapy deformacji rury z rozkładem naprężenia ekwiwalentnego HMM zostały przedstawione na rys. 7. Całkowity czas trwania procesu wynosił 600 s.



Rys. 7. Rozkłady naprężenia ekwiwalentnego HMM (Mises); kolejne etapy gięcia stalowej rury na zimno dla a) $t = 0,0$ s, b) $t = 300,0$ s, c) $t = 400,0$ s, d) $t = 500,0$ s, e) $t = 600,0$ s

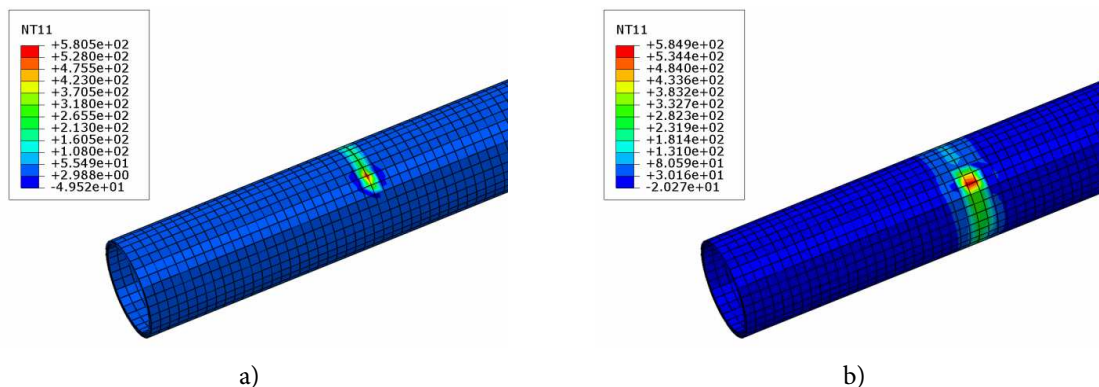
Fig. 7. Distribution of Mises (HMM) equivalent stress; the following stages of the tube bending without laser assistance a) $t = 0.0$ s, b) $t = 300.0$ s, c) $t = 400.0$ s, d) $t = 500.0$ s, e) $t = 600.0$ s

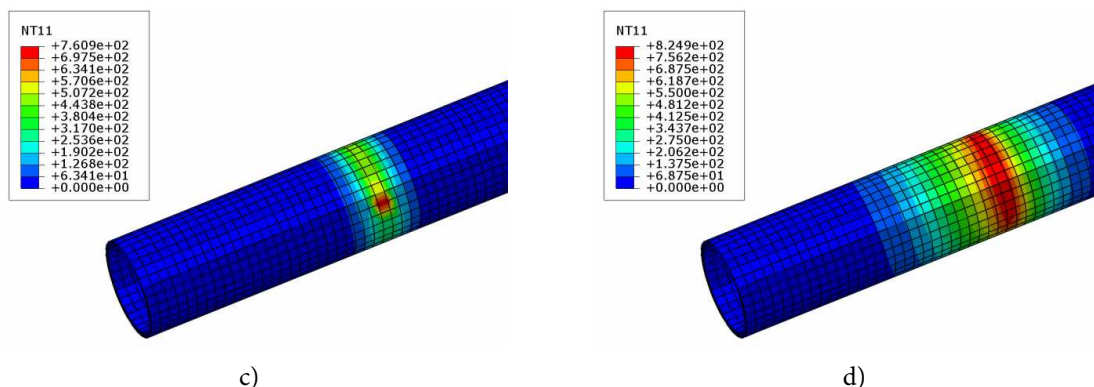
Kolejnym krokiem było wykonanie symulacji przepływu ciepła generowanego przez poruszającą się wiązkę lasera. Wyniki tej analizy zostały przedstawione na rys. 8. Pole temperatury zostało wyznaczone dla początkowych 50 s procesu.

3.3. Results of the numerical simulations of tube bending

In the first step, the simulation of bending process without laser heating was performed. The individual stages of deformation of the tube with corresponding distribution of the HMM equivalent stress are shown in Fig. 7. The total process time was 600 s.

The next step was to simulate numerically the heat transfer generated by the moving laser beam. The results of this analysis are shown in Fig. 8. The temperature field was determined for the initial 50 s of the process.





Rys. 8. Rozkład temperatury w stopniach Celsjusza na powierzchni zewnętrznej rury dla kolejnych chwil czasowych: a) $t = 1$ s, b) $t = 3$ s, c) $t = 20$ s, d) $t = 50$ s

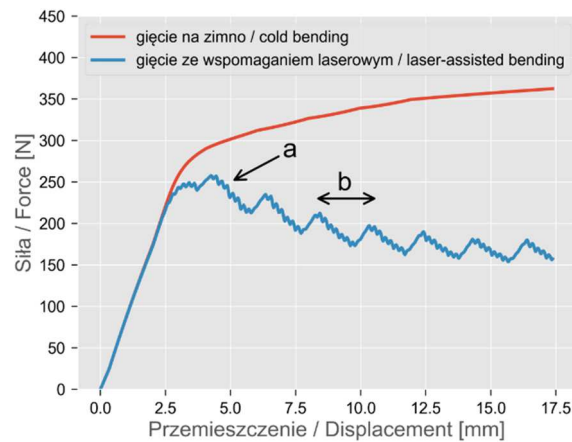
Fig. 8. The temperature distribution in Celsius degrees on the outer surface of tube for the time instants: a) $t = 1$ s, b) $t = 3$ s, c) $t = 20$ s, d) $t = 50$ s

Tak określone pole temperatury zostało wykorzystane w symulacji hybrydowego termo-mechanicznego gięcia rury. Porównanie symulacji gięcia na zimno oraz gięcia z uwzględnieniem poruszającej się wiązki laserowej zostało przedstawione na wykresie siły naporu tłoczyska siłownika na rurę w funkcji przemieszczenia tłoczyska (rys. 9). W procesie zastosowano wymuszenie kinematyczne przemieszczeniem tłoczyska, a siła na tłoczysku była wielkością wynikową. Na rys. 9 widać wyraźnie, że lokalne nagrzewanie laserowe powoduje prawie dwukrotny spadek siły potrzebnej do zagięcia rury.

Na krzywej siła–przemieszczenie dla przypadku gięcia ze wspomaganie laserowym można wyróżnić dwa typy oscylacji. Pierwsze z nich oznaczone literą a wynikają z oscylacyjnego ruchu głowicy laserowej. Oscylacje tego typu obserwowane są również podczas eksperymentów fizycznych. Drugi typ oznaczony literą b ma charakter czysto numeryczny i związany jest z wielkością elementu skończonego. Redukcja tych oscylacji wymaga zagęszczenia siatki elementów skończonych, co jednak wiąże się ze znacznym zwiększeniem czasu obliczeń. Wykonanie symulacji numerycznych hybrydowego gięcia rury trwało około 120 godzin przy wykorzystaniu 6 rdzeni taktowanych z częstotliwością 2,66 GHz.

The obtained temperature field was used to simulate thermo-mechanical bending of the tube. A comparison of the pure mechanical bending with a laser-assisted one is shown in Fig. 9. The figure shows the thrust force as a function of the displacement of the piston rod. The process of tube bending was controlled by the displacement of the piston rod, while the thrust force was the resulting value. It can be clearly seen in Fig. 9 that the local laser heating results in almost two times lower value of the force needed to bend the tube.

On the force-displacement curve for the case of laser-assisted bending two types of oscillations can be distinguished. The first one, marked with the letter a, results from the oscillatory motion of the laser head. Such oscillations were also observed during experiments. The second type of oscillations, which are marked with the letter b, are purely numerical and are related to the size of the finite element. The reduction of these oscillations requires a denser finite element mesh, but that is associated with a significant increase in time of calculations. Numerical simulation of the hybrid tube bending took about 120 hours using 6 processor cores clocked at 2.66 GHz.



Rys. 9. Wykres zależności siły naporu tłoczyska dla przypadku gięcia rury na zimno oraz ze wspomaganie laserowym
 Fig. 9. The thrust force as a function of the piston rod displacement for the mechanical and laser-assisted bending of the tube

4. PODSUMOWANIE

Zweryfikowane doświadczalnie symulacje numeryczne wykazały, iż w analizowanym termo-mechanicznym gięciu płaskowników mechanizm deformacji polega na intensywnym płynie plastycznym warstwy poddawanej nagrzewaniu laserowemu. W konsekwencji położenie osi obojętnej przekroju ulega przesunięciu w kierunku powierzchni, która nie jest nagrzewana bezpośrednio wiązką laserową. Z wyjątkiem krótkiego okresu początkowego, pole temperatury może być w uproszczeniu przyjmowane jako ustalone w układzie odniesienia związanym z poruszającym się źródłem ciepła (wiązką laserową).

Opracowany model numeryczny gięcia rury ze wspomaganie laserowym pozwala przeanalizować wpływ lokalnego nagrzewania rury na jej deformację w zastosowanym układzie kinematycznym i obciążenia. Stwierdzono, iż pole temperatury generowane przez wiązkę laserową zmniejsza prawie dwukrotnie siłę potrzebną do otrzymania zadanego zagięcia rury.

PODZIĘKOWANIA

Badania przedstawione w niniejszym artykule zostały dofinansowane w ramach grantu badawczego Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (Nr PBS3/A5/47/2015).

4. SUMMARY

The experimentally verified numerical simulations showed that the deformation mechanism in thermo-mechanical bending of thin beams is based on the intense plastic flow of the material in the layer subjected to laser heating. As a consequence, the position of the neutral axis of the cross-section is shifted towards the surface not heated directly by the laser beam. With the exception of the short period of time at the beginning of the process, the temperature field can be for simplicity assumed as a steady one in the reference system associated with a moving heat source (laser beam).

The developed numerical model of the laser-assisted tube bending allows analysis of the influence of local heating of the tube on its deformation under the applied kinematic scheme and loading system. It has been found that the temperature field generated by the laser beam reduces almost twice the force required to obtain the desired bending of the tube.

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] Duflou J.R., R. Aerens. 2006. „Force reduction in bending of thick steel plates by localized preheating”. *Annals of the CIRP* 55 (1): 237–240.
- [2] Gisaro A., M. Barletta, S. Venettacci, F. Veniali. 2015. „Laser-assisted bending of sharp angles with small fillet radius on stainless steel sheets: Analysis of experimental set-up and processing parameters”. *Laser Manuf. Mater. Process.* 2: 57–73.
- [3] 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.
- [4] Scully K. 1987. „Laser line heating”. *Journal of Ship Production* 3 (4): 237–246.
- [5] Frąckiewicz H., Z. Mucha, W. Trąmpczyński, A. Baranowski, A. Cybulski. 1987. „Sposób gięcia przedmiotów metalowych”. Patent PL155358. Data zgłoszenia 26.11.1987.
- [6] Kumar Y., S. Kumar. 2015. Incremental Sheet Forming (ISF). W *Advances in Material Forming and Joining, Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering*, pod red. R.G. Narayanan, U.S. Dixit 29–46. India: Springer.
- [7] Grosman F. 2015. „Rozwój procesów narastającego kształtowania plastycznego metali”. *Obróbka Plastyczna Metali* 26 (1): 47–72.
- [8] Arnoldy R.F. 1947. „Method of controlling distortion, straightening distorted objects and/or altering the shape of metal objects”. United States Patent Office, Patent nr 2 428 825.
- [9] Folkersma K.G.P. 2015. *Laser forming for sub-micron adjustment. With application to optical fiber assembly. Dissertation*. University of Twente (15.12. 2015).
- [10] Tam A.C., C.C. Poon, L. Crawforth. 2001. „Laser bending of ceramics and application to manufacture magnetic head sliders in disk drives”. *Anal. Sci.* 17 (special issue): 419–421.
- [11] Okamoto Y., Y. Uno, Y. Namba. 2005. „Deformation characteristics of high density polyethylene in YAG laser forming”. W *Proceedings of the IWOTE'05, 1st International Workshop on Thermal Forming*, pod red. Vollertsen F., Seefeld T.: 47–54. Bremer Institute für angewandte Strahltechnik GmbH (BIAS).
- [12] Vollertsen F., M. Rödle. 1994. „Model for Temperature Gradient Mechanism of Laser Bending”. W *Proceedings of the 26th International CIRP Seminar on Manufacturing Systems – LANE '94 (Laser Assisted Net Shape Engineering)*, pod red. M. Geiger, F. Vollertsen, 371–378. Bamberg: Meisenbach-Verlag.
- [13] Yanjin G., S. Sheng, Z. Guoqun, L. Yiguo. 2003. „Finite element modeling of laser bending of pre-loaded sheet metals”. *J. of Materials Processing Technology* 142: 400–407.

REFERENCES

- [1] Duflou J.R., R. Aerens. 2006. “Force reduction in bending of thick steel plates by localized preheating”. *Annals of the CIRP* 55 (1): 237–240.
- [2] Gisaro A., M. Barletta, S. Venettacci, F. Veniali. 2015. “Laser-assisted bending of sharp angles with small fillet radius on stainless steel sheets: Analysis of experimental set-up and processing parameters”. *Laser Manuf. Mater. Process.* 2: 57–73.
- [3] 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.
- [4] Scully K. 1987. “Laser line heating”. *Journal of Ship Production* 3 (4): 237–246.
- [5] Frąckiewicz H., Z. Mucha, W. Trąmpczyński, A. Baranowski, A. Cybulski. 1987. “Sposób gięcia przedmiotów metalowych”. Patent PL155358. Data zgłoszenia 26.11.1987.
- [6] Kumar Y., S. Kumar. 2015. Incremental Sheet Forming (ISF). In *Advances in Material Forming and Joining, Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering*, ed. by R.G. Narayanan, U.S. Dixit 29–46. India: Springer.
- [7] Grosman F. 2015. “Rozwój procesów narastającego kształtowania plastycznego metali”. *Obróbka Plastyczna Metali* 26 (1): 47–72.
- [8] Arnoldy R.F. 1947. “Method of controlling distortion, straightening distorted objects and/or altering the shape of metal objects”. United States Patent Office, Patent nr 2 428 825.
- [9] Folkersma K.G.P. 2015. *Laser forming for sub-micron adjustment. With application to optical fiber assembly. Dissertation*. University of Twente (15.12. 2015).
- [10] Tam A.C., C.C. Poon, L. Crawforth. 2001. “Laser bending of ceramics and application to manufacture magnetic head sliders in disk drives”. *Anal. Sci.* 17 (special issue): 419–421.
- [11] Okamoto Y., Y. Uno, Y. Namba. 2005. “Deformation characteristics of high density polyethylene in YAG laser forming”. In *Proceedings of the IWOTE'05, 1st International Workshop on Thermal Forming*, pod red. Vollertsen F., Seefeld T.: 47–54. Bremer Institute für angewandte Strahltechnik GmbH (BIAS).
- [12] Vollertsen F., M. Rödle. 1994. “Model for Temperature Gradient Mechanism of Laser Bending”. In *Proceedings of the 26th International CIRP Seminar on Manufacturing Systems – LANE '94 (Laser Assisted Net Shape Engineering)*, ed. by M. Geiger, F. Vollertsen, 371–378. Bamberg: Meisenbach-Verlag.
- [13] Yanjin G., S. Sheng, Z. Guoqun, L. Yiguo. 2003. “Finite element modeling of laser bending of pre-loaded sheet metals”. *J. of Materials Processing Technology* 142: 400–407.

-
- [14] Yao Z., H. Shen, Y. Shi, J. Hu. 2007. „Numerical study on laser forming of metal plates with pre-loads”. *Computational Materials Science* 40: 27–32.
- [15] Roohi A.H., M.H. Gollo, H.M. Naeini. 2012. „External force-assisted laser forming process for gaining high bending angles”. *Journal of Manufacturing Processes* 14: 269–276.
- [16] Augustyniak W., T. Burakowski, J. Giziński. 1989. *Termometria przemysłowa w obróbce cieplnej stali. Poradnik*. Warszawa: Instytut Mechaniki Precyzyjnej.
- [17] Chen J., B. Young. 2006. „Stress–strain curves for stainless steel at elevated temperatures”. *Engineering Structures* 28: 229–239.
- [18] Sędek P. 2000. *Problemy naprężeń i odkształceń spawalniczych. Seria Inżynieria Materiałowa, nr 22*. Warszawa: Wyd. Biuro Gamma.
- [14] Yao Z., H. Shen, Y. Shi, J. Hu. 2007. “Numerical study on laser forming of metal plates with pre-loads”. *Computational Materials Science* 40: 27–32.
- [15] Roohi A.H., M.H. Gollo, H.M. Naeini. 2012. “External force-assisted laser forming process for gaining high bending angles”. *Journal of Manufacturing Processes* 14: 269–276.
- [16] Augustyniak W., T. Burakowski, J. Giziński. 1989. *Termometria przemysłowa w obróbce cieplnej stali. Poradnik*. Warszawa: Instytut Mechaniki Precyzyjnej.
- [17] Chen J., B. Young. 2006. “Stress–strain curves for stainless steel at elevated temperatures”. *Engineering Structures* 28: 229–239.
- [18] Sędek P. 2000. *Problemy naprężeń i odkształceń spawalniczych. Seria Inżynieria Materiałowa, nr 22*. Warszawa: Wyd. Biuro Gamma.

