

Laserowo-mechaniczne formowanie elementów cienkościennych

Forming of thin-walled elements using laser heating and mechanical load

PIOTR KURP
JACEK WIDŁASZEWSKI
ZYGMUNT MUCHA*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.2.30>

W niniejszym artykule autorzy przedstawiają założenia oraz wstępne wyniki badań doświadczalnych i symulacji numerycznych procesu formowania elementów cienkościennych z wykorzystaniem wiązki laserowej i obciążenia mechanicznego. Na podstawie założeń zaprojektowano i wykonano stanowisko do gięcia cienkościennych rur i dyfuzorów stożkowych stosowanych w budowie silników lotniczych. Metoda i stanowisko kształtowania, przetestowane w warunkach laboratoryjnych, a także wyniki analizy numerycznej procesu pokazują nowe możliwości formowania elementów cienkościennych.

SŁOWA KLUCZOWE: kształtowanie laserowe, obróbka laserowa, elementy cienkościenne, stopy niklu, metoda elementów skończonych

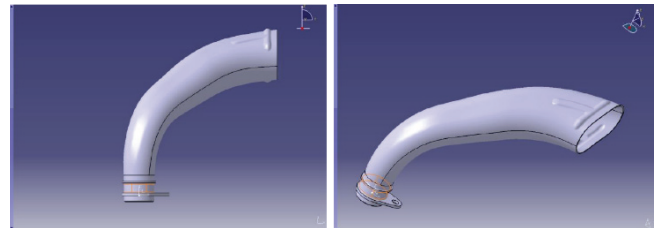
The paper presents assumptions and preliminary results of experimental investigations and numerical simulations of forming thin-walled elements using laser beam and mechanical load. An experimental stand, dedicated for bending thin-walled tubes and conical diffusers, which are used in aircraft engines, has been designed and built. The method and stand, which were tested in laboratory conditions, together with numerical analysis results show new possibilities of forming thin-walled elements.

KEYWORDS: laser forming, laser treatment, thin-walled elements, nickel alloys, finite element method

Prace badawcze nad wykorzystaniem wiązki laserowej do kontrolowanego wywoływania trwałych zmian kształtu tylko dzięki zjawisku rozszerzalności cieplnej – bez stosowania sił zewnętrznych – są prowadzone od lat 80. ub.w. [1–3]. Technologię tę można nazwać formowaniem przyrostowym [4] lub narastającym [5], ponieważ całkowite odkształcenie plastyczne jest zazwyczaj uzyskiwane poprzez sumowanie małych odkształceń wywołanych lokalnym oddziaływaniem wiązki promieniowania laserowego na obrabiany materiał. W przypadku formowania laserowego nie dochodzi do mechanicznego kontaktu pomiędzy narzędziem kształtującym a elementem obrabianym. Technika ta daje również możliwość zdalnego formowania elementów.

Omawiana metoda, opracowywana w ramach grantu badawczego NCBR nr PBS3/A5/47/2015, polega na hybrydowym cieplno-mechanicznym formowaniu profili przez jednoczesne działanie laserowego źródła ciepła i zewnętrznych sił. Celem tego projektu jest więc dodanie działania sił zewnętrznych do oddziaływania wiązki laserowej na materiał, a zwłaszcza opracowanie metody

kształtowania elementów cienkościennych, m.in. na potrzeby przemysłu lotniczego (rys. 1), wytwarzanych ze stopów żarowytrzymałych, takich jak: nadstopy niklu Inconel 625 i Inconel 718 oraz wysokostopowe stale martenzytyczne AISI 410 i AISI 325. Udane próby hybrydowego formowania płaskowników wykonanych z tych materiałów z wykorzystaniem obciążenia grawitacyjnego zostały przedstawione w pracy [6].



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

W celu zrealizowania tego zadania zostało powołane konsorcjum naukowe złożone z ośrodków naukowych, dobranych według ich doświadczenia i kompetencji w odpowiednich obszarach badawczych. Konsorcjantami zostali: Politechnika Świętokrzyska (lider projektu), Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Instytut Obróbki Plastycznej oraz Politechnika Rzeszowska.

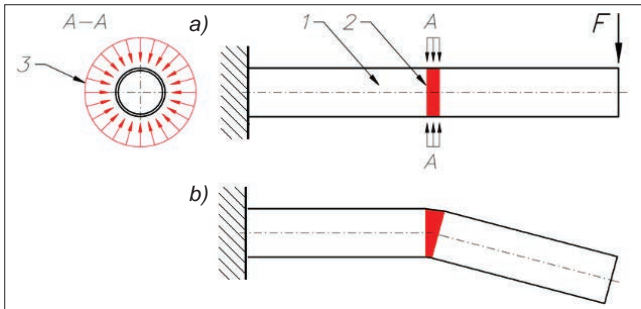
Założenia

Rozważano gięcie prostoliniowego odcinka rury na zadany kąt gięcia α oraz promień gięcia R . W przypadku gięcia mechanicznego siły zewnętrzne zazwyczaj wywołują naprężenie o znacznej wartości i odkształcenie plastyczne na dużym obszarze kształtowanego elementu. Natomiast w przypadku gięcia laserowego deformacja jest zlokalizowana w pobliżu trajektorii wiązki laserowej na formowanym elemencie. Podejście hybrydowe (tj. formowanie z udziałem sił zewnętrznych i nagrzewania laserowego) daje możliwość przyrostowego wywoływania odkształcenia plastycznego lokalnie, w wybranych i dobrze określonych strefach kształtowanych elementów.

Koncepcja procesu formowania laserowo-mechanicznego opiera się na założeniu, że gięciu podlega tylko ta część elementu, która w danej chwili jest poddana działaniu wiązki laserowej. Wiązka laserowa podgrzewa wybrany obszar elementu do zadanej temperatury, co poprawia właściwości plastyczne w tym obszarze. Na skutek przyłożenia siły zewnętrznej F dochodzi do uplastycznienia i deformacji obszaru o odpowiedniej temperaturze. Pozostała część formowanego elementu, która ma niższą temperaturę, nie ulega odkształceniu, a w danej fazie procesu

* Dr inż. Piotr Kurp (pkurp@tu.kielce.pl), dr hab. Zygmunt Mucha prof. PŚk (pkurp@tu.kielce.pl) – Politechnika Świętokrzyska, Katedra Inżynierii Eksploatacji i Przemysłowych Systemów Laserowych; dr inż. Jacek Widłaszewski (jacek.widlaszewski@ippt.pan.pl) – Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk

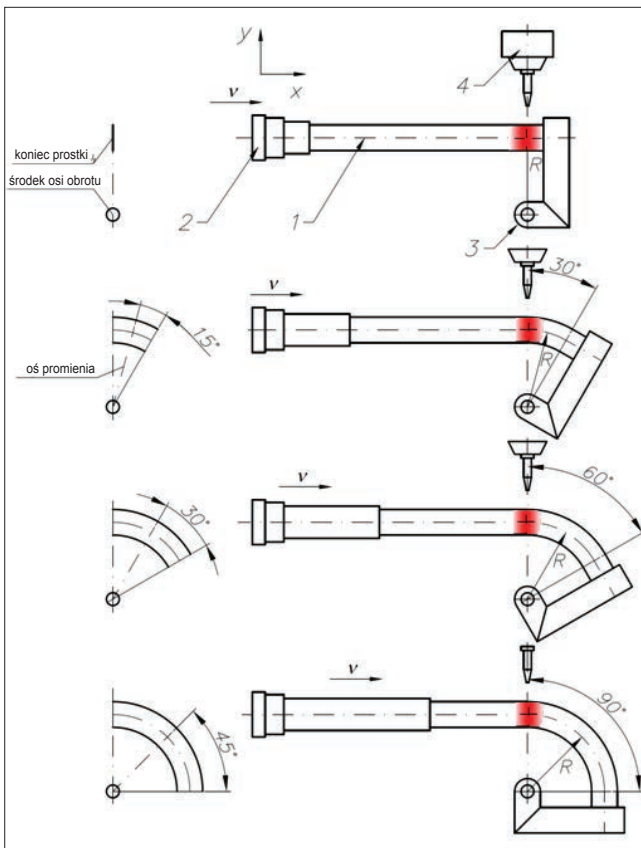
deformacji plastycznej podlega tylko cienki pasek elementu. Szerokość tego paska zależy od średnicy, mocy i prędkości ruchu wiązki laserowej padającej na powierzchnię elementu. Schemat koncepcji kształtowania według tych założeń przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat kształtowania laserowo-mechanicznego: a) element w trakcie nagrzewania, b) element po gięciu. Oznaczenia: 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

Koncepcja

W trakcie prac powstało kilka koncepcji realizacji procesu. Do dalszych prac wybrano koncepcję z tzw. swobodnym ramieniem gnącym (rys. 3). Według tej koncepcji element 1, przeznaczony do obróbki, zostaje zainstalowany pomiędzy siłownikiem pchającym 2 a swobodnym ramieniem gnącym 3. Głowica laserowa 4 nagrzewa element po obwodzie w płaszczyźnie gięcia, zawierającej trajektorię wiązki laserowej i oś przegubu ramienia gnącego.

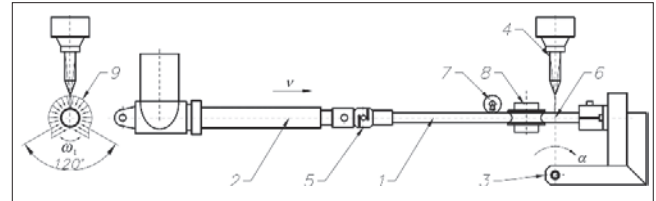


Rys. 3. Poszczególne etapy kształtowania elementu według koncepcji ze swobodnym ramieniem gnącym (schemat): 1 – rurowy element podlegający gięciu, 2 – siłownik pchający, 3 – swobodne ramię gnące, 4 – głowica laserowa

Jednocześnie siłownik 2 napiera na element 1 z siłą F . Na skutek uplastycznienia element rurowy ulega zgięciu na promień R , określony odległością osi rury od osi obrotu ramienia 3. Ta koncepcja zakłada, że napędzany będzie wyłącznie siłownik 2, a ruch ramienia gnącego 3 będzie ruchem wynikowym (swobodne ramię gnące).

Projekt

Na podstawie wybranej koncepcji wykonano projekt techniczny urządzenia. Biorąc pod uwagę możliwości techniczne i potrzeby badawcze, najpierw stworzono rozwinięcie koncepcji w postaci przedstawionej na rys. 4.

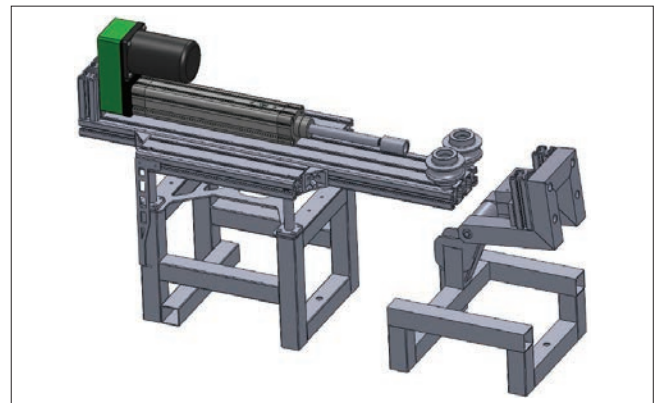


Rys. 4. Schemat głównych podzespołów urządzenia: 1 – obrabiany element, 2 – siłownik pchający, 3 – swobodne ramię gnące, 4 – głowica laserowa, 5 – czujnik siły, 6 – płaszczyzna gięcia, 7 – rolka reakcji, 8 – rolka prowadząca, 9 – trajektoria nagrzewania w płaszczyźnie gięcia

Dane techniczne zaprojektowanego urządzenia:

- siłownik pchający DSV5030-200-03 i czujnik siły o zakresie pomiarowym $0 \div 1000$ N,
- 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°).

Koncepcyjny projekt urządzenia zaprezentowano na rys. 5.

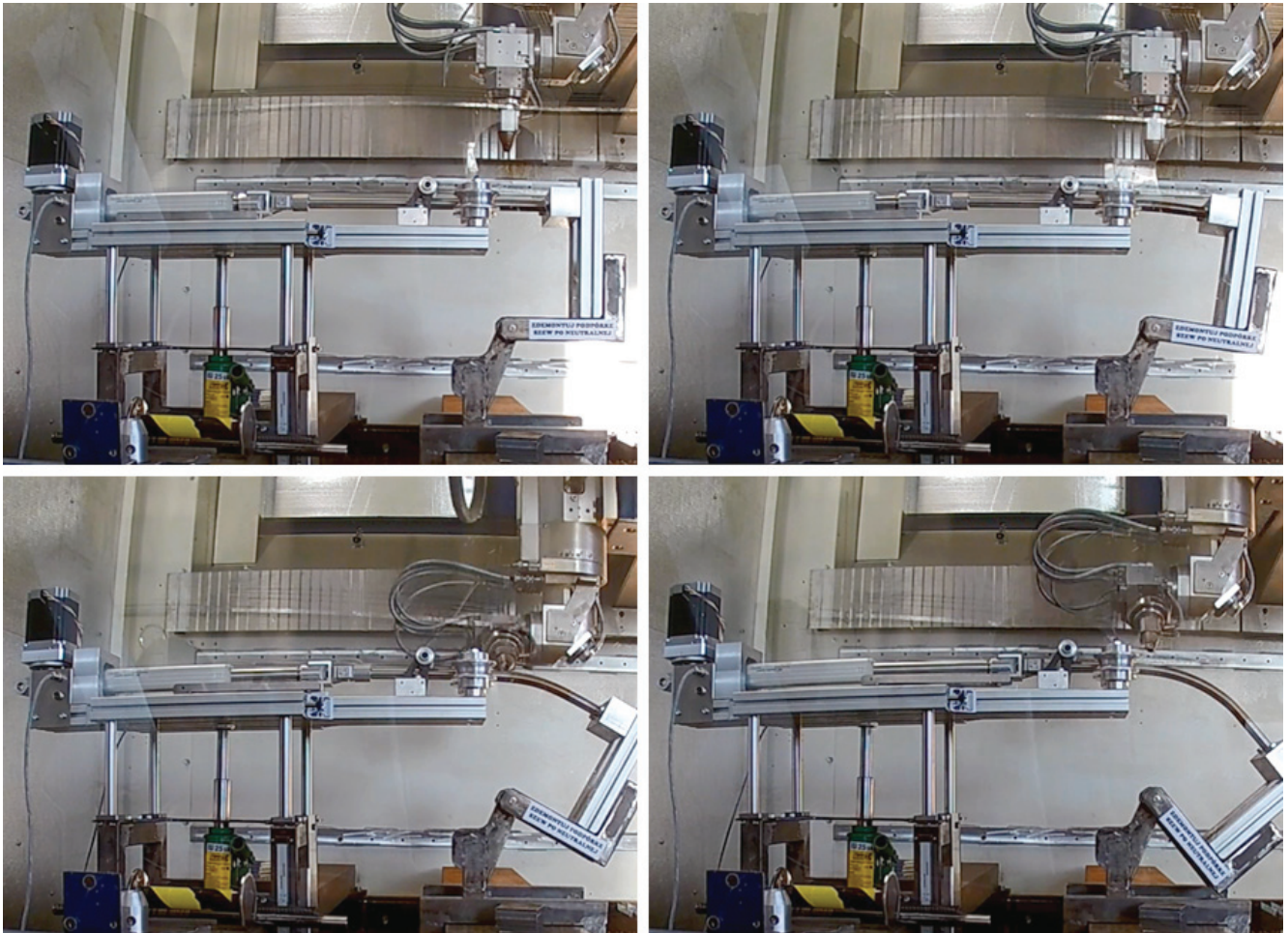


Rys. 5. Koncepcyjny projekt urządzenia – główne elementy

Bazując na projekcie technicznym, zbudowano urządzenie i zmontowano stanowisko badawcze.

Badania

Przeprowadzono badania doświadczalne dotyczące procesu gięcia elementu rurowego o średnicy 20 mm i grubości ścianki 1 mm, wykonanego ze stali kwasoodpornej X5CrNi18-10. Promień gięcia R wynosił 215 mm. Początek elementu rurowego sztywno zamocowano w uchwycie ramienia gnącego.

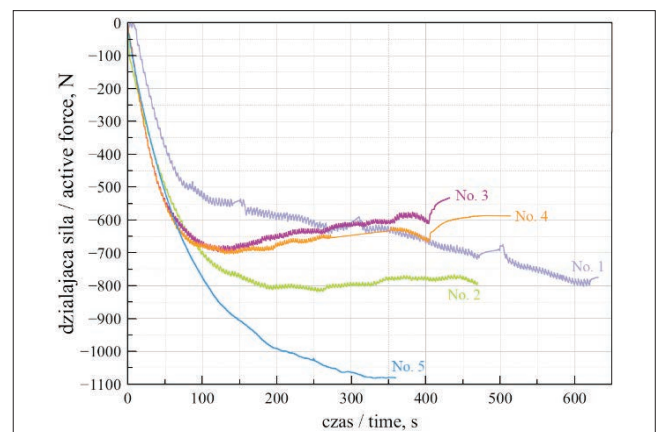


Rys. 6. Poszczególne etapy procesu gięcia

Zamocowaną rurę nagrzewano wiązką laserową, przemieszczaną oscylacyjnie w płaszczyźnie gięcia. Zadana trajektoria wiązki na powierzchni materiału była uwarunkowana możliwym do wykorzystania zakresem ruchu głowicy laserowej na pięcioosiowym laserowym centrum obróbkowym TRUMPF LaserCell 1005. Parametry pracy stosowanego lasera CO₂ były następujące: moc $P = 400$ W, prędkość liniowa ruchu plamki laserowej na powierzchni materiału $\omega_1 = 4000$ mm/min (66,7 mm/s). Jednocześnie z nagrzewaniem na kształtowany element rurowy działała siła pochodząca od siłownika pchającego. Prędkość posuwu siłownika ustalono na $v = 20$ mm/min (0,33 mm/s). Przy maksymalnym dopuszczalnym wysuwie siłownika $l = 195$ mm uzyskiwano kąt gięcia $\alpha = 50^\circ$. Na rys. 6 przedstawiono poszczególne fazy gięcia omawianego elementu rurowego. Gotowe elementy oraz wykresy sił gięcia pokazano na rys. 7 i 8.



Rys. 7. Gotowe elementy

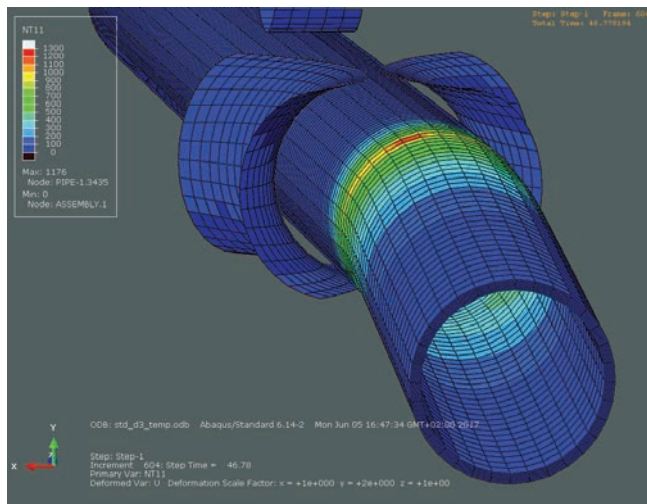


Rys. 8. Wykres zarejestrowanej siły naporu siłownika

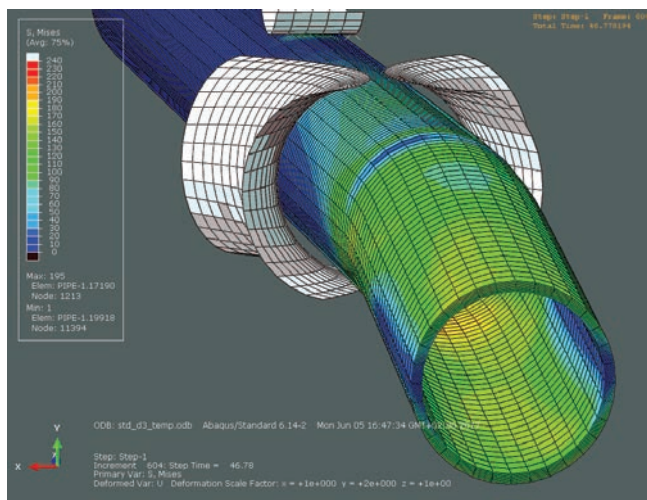
Symulacje numeryczne

Na podstawie założeń, zrealizowanej koncepcji oraz wykonanych eksperymentów przeprowadzono symulację numeryczną procesu. Pola temperatury, naprężenia i odkształcenia podczas ciepło-mechanicznego obciążenia rur zostały wyznaczone w ramach analizy termomechanicznej sprzężonej sekwencyjnie. W pierwszej kolejności było wyznaczane pole temperatury generowane przez ruchomą wiązkę laserową, przyjętą jako powierzchniowe źródło ciepła. Następnie to pole temperatury było wykorzystywane jako obciążenie termiczne w quasi-statycznej analizie mechanicznej z uwzględnieniem zewnętrznego obciążenia mechanicznego. Szczegóły dotyczące modelu numerycznego zostały opisane w [7].

Na rys. 9 przedstawiono przykład wyznaczonego w symulacji rozkładu temperatury na powierzchni zginanej rury. Korespondujący rozkład naprężenia ekwiwalentnego HMM zaprezentowano na rys. 10. Wyniki symulacji numerycznych pokazują zlokalizowane oddziaływanie termiczne wiązki laserowej na kształtowany element. Na rozkładzie naprężenia ekwiwalentnego widać efekt lokalnego obniżenia granicy plastyczności materiału w obszarze ścieżki laserowej, co wywołuje pożądaną deformację plastyczną w ograniczonym obszarze elementu w danej chwili czasowej.



Rys. 9. Rozkład temperatury podczas hybrydowego gięcia rury



Rys. 10. Rozkład naprężenia ekwiwalentnego (według hipotezy HMM) podczas hybrydowego gięcia rury

Wnioski

Opracowana koncepcja kształtowania laserowo-mechanicznego została przetestowana na specjalnie zaprojektowanym i zbudowanym stanowisku roboczym. Efekt gięcia rur uzyskano przy stosunkowo niewielkiej mocy wiązki laserowej. Dalsze obniżenie potrzebnej mocy wiązki można uzyskać poprzez wykorzystanie lasera emitującego wiązkę o krótszej długości fali niż wiązka lasera CO₂ (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. Dalsze badania pozwolą na określenie parametrów technicznych i możliwości kształtowania zaproponowanym sposobem elementów o innym kształcie wyjściowym.

Opracowana metoda oraz urządzenie do hybrydowego kształtowania profili cienkościennych zostały zgłoszone do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej (zgłoszenie z dnia 10 maja 2017 r., numer zgłoszenia PL421537).

Przedstawione w niniejszym artykule badania są finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach grantu nr PBS3/A5/47/2015.

LITERATURA

1. Deacon D.L. "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, 1984.
2. Scully K. "Laser line heating". *Journal of Ship Production*. 3, 4 (1987): s. 237–246.
3. Frąckiewicz H., Mucha Z., Trąmpczyński W., Baranowski A., Cybulski A. „Sposób gięcia przedmiotów metalowych”. Patent PL155358. Data zgłoszenia 26.11.1987.
4. Kumar Y., Kumar S. "Incremental Sheet Forming (ISF)". *Advances in Material Forming and Joining, Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering*, red. R.G. Narayanan, U.S. Dixit 29–46. India: Springer 2015.
5. Grosman F. „Rozwój procesów narastającego kształtowania plastycznego metali”. *Obróbka Plastyczna Metali*. 26, 1 (2015): s. 47–72.
6. Mucha Z., Widłaszewski J., Kurp P., Mulczyk K. "Mechanically assisted laser forming of thin beams". *Proc. of SPIE 10159, Laser Technology 2016: Progress and Applications of Lasers*. (2016): s. 101590U-1–101590U-10.
7. Widłaszewski J., Nowak M., Nowak Z., Kurp P. "Laser-assisted forming of thin-walled profiles". *Metal Forming*. XXVIII, 3 (2017): s. 183–198. ■