

Laserowe formowanie powłok o zadanym kształcie powierzchni rozwijalnej

Laser forming of shells with prescribed developable surface

ZYGMUNT MUCHA
JACEK WIDŁASZEWSKI*

Przedstawiono metodę laserowego kształtowania powłok o powierzchniach rozwijalnych. Materiałem wyjściowym była blacha lub płyta bez naprężeń własnych. W pracy omówiono wyznaczenie rozkładu ścieżek laserowych na powierzchni materiału w ten sposób, aby po jednej sekwencji skanowania płyta przyjęła pożądaną kształt. Opisano przykłady planowania dla powłok o powierzchniach rozwijalnych z kierownicami: paraboliczną, eliptyczną, kołową i wielomianową. Dobór parametrów laserowej obróbki zapewnia spełnienie warunku nieprzekraczania zadanej temperatury materiału, np. unikanie nadtopienia powierzchni.

SŁOWA KLUCZOWE: kształtowanie laserowe, gięcie laserowe, gięcie termiczne, powierzchnia rozwijalna, kształtowanie powłok

A method of forming of shells with developable surface using laser beam is presented in the paper. It is assumed that initially the sheet metal or plate is flat and free from residual stresses. The method enables design of forming strategy and processing parameters to produce developable shells in a sequence of laser scanning. Examples of the process planning for shells with developable surfaces having parabolic, elliptic, circular and polynomial directrices are described. Processing parameters are calculated so as to not exceed any undesirable material temperature level, e.g. the melting temperature.

KEYWORDS: laser forming, laser bending, thermal bending, developable surface, forming of shells

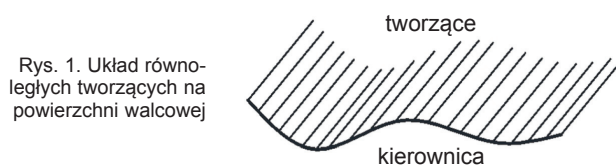
Pochłanianie energii wiązki laserowej przez materiały metaliczne zachodzi w warstwie o grubości rzędu dziesiątek nanometrów, dlatego oddziaływanie wiązki często jest traktowane jako działanie powierzchniowego źródła ciepła. Podczas przemieszczania się plamki laserowej po powierzchni materiału czy nagrzewania impulsowego można uzyskać znacznie podwyższenie temperatury obszaru w pobliżu plamki w stosunku do reszty materiału. Chłodniejszy obszar ogranicza swobodę termicznego rozszerzania się materiału o podwyższonej temperaturze, co może wywołać naprężenie termiczne sięgające granicy plastyczności. Ograniczenia swobody rozszerzalności termicznej mogą mieć charakter zewnętrzny (zewnętrzne więzy) lub wewnętrzny (gdy temperatura ma nieliniowy rozkład w dwóch lub trzech wymiarach). Trwała deformacja nastąpi, jeśli istnieje ograniczenie swobody rozszerzalności termicznej materiału i w trakcie nagrzewania jego maksymalna temperatura przewyższy temperaturę krytyczną, przy której naprężenie termiczne ma wartość granicy plastyczności. Dla stali niskowęglowej i typowych procesów spawania oraz termicznego prostowania (*heat straightening*) wartość temperatury krytycznej przyjmuje się od 600 °C [1] do 660 °C [2].

Poprzez skanowanie powierzchni materiału można realizować proces obróbki plastycznej bez użycia sił zewnętrz-

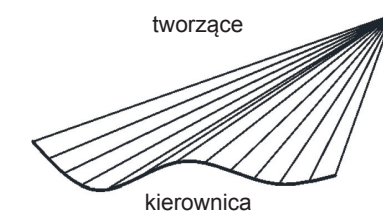
nych. Precyzyjnym i łatwym do sterowania nośnikiem ciepła dla procesów kształtowania termicznego jest wiązka laserowa. W przypadku deformacji giętej, która zachodzi w jednej płaszczyźnie, stosuje się termin gięcia laserowego. Zmianę kształtu blach i płyt uzyskuje się dzięki wykorzystaniu mechanizmów opartych na: gradiencie temperatury [3], termicznym wyboczeniu [4] lub termicznym spęczeniu [5]. W początkowej fazie działania mechanizmu gradientowego termiczne rozszerzanie się materiału w pobliżu plamki laserowej powoduje wygięcie blachy z wypukłością od strony wiązki. W obszarze o podwyższonej temperaturze występuje stan ściskania, zatem powstające odkształcenie plastyczne charakteryzuje się odkształceniem ściskania (ma wartość ujemną) w płaszczyźnie blachy i wzrostem jej grubości. Skurcz termiczny materiału podczas stygnięcia tego obszaru do temperatury początkowej powoduje plastyczne zagięcie blachy w kierunku, z którego padała wiązka laserowa. Z tego powodu w ogólnym przypadku kształtowania lub korygowania kształtu konieczny jest dostęp do materiału z obu stron. Także dla uzyskania czystego mechanizmu spęczeniowego (bez gradientu temperatury na grubości) wymagane jest ogrzewanie z obu stron. Stanowisko umożliwiające nagrzewanie z dwóch źródeł indukcyjnych umieszczonych na ramionach robotów przemysłowych zostało w ostatnich latach uruchomione w jednej ze stoczni japońskich [6]. W Polsce zainteresowanie zautomatyzowanym termicznym kształtowaniem blach poszycia wykazywała w latach 90. ubiegłego stulecia Stocznia Szczecińska, jednak nie doszło do uruchomienia odpowiedniego programu badawczego.

Powierzchnie rozwijalne są nakładalne na płaszczyznę i mogą powstawać przez zginanie powierzchni płaskiej. To oznacza, że istnieje takie wzajemnie jednoznaczne odwzorowanie punktów jednej powierzchni na drugą, przy którym nie zmieniają się długości odpowiadających sobie linii. Odwzorowanie zachowujące długość nazywamy odwzorowaniem izometrycznym.

Powierzchnie rozwijalne prostoliniowe to: powierzchnia walcowa (rys. 1), powierzchnia stożkowa (rys. 2), torsoid (powierzchnia utworzona przez styczne do krzywej przestrzennej), a także, formalnie rzecz ujmując, płaszczyzna.



Rys. 1. Układ równoległych tworzących na powierzchni walcowej



Rys. 2. Układ nierównoległych tworzących na powierzchni stożkowej

* Dr hab. Zygmunt Mucha, prof. PŚw (zmucha@tu.kielce.pl) – Centrum Laserowych Technologii Metali, Politechnika Świętokrzyska; dr inż. Jacek Widłaszeński (jacek.widlaszewski@ippt.pan.pl) – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Powierzchnia walcowa jest określona przez krzywą (zwaną kierownicą) i zbiór przechodzących przez nią prostych (tworzących) o jednakowym kierunku w przestrzeni. Powierzchnię stożkową zakreślają tworzące, które mają jeden wspólny punkt (wierzchołek) i przechodzą przez kierownicę.

Elementy konstrukcyjne o powierzchni rozwijalnej są szeroko stosowane w technice dzięki względnej łatwości kształtowania wyrobów z blach tradycyjnymi metodami mechanicznymi, takimi jak gięcie na prasach krawędziowych czy za pomocą walców. Metody te są opłacalne w przypadku produkcji wielkoseryjnej. Istnieją jednak przypadki prac naprawczych, produkcji pojedynczych wyrobów i produkcji krótkoseryjnej, gdzie kształtowanie termiczne jest uznawane za ekonomicznie uzasadnioną metodę obróbki plastycznej, np. przy wytwarzaniu prototypów w budowie statków morskich, pojazdów szynowych i statków powietrznych [7-9]. Podejmowane są zatem prace badawcze mające na celu wykorzystanie mechanizmów kształtowania ruchomym źródłem ciepła do formowania elementów konstrukcyjnych o powierzchni rozwijalnej.

Zaprojektowanie procesu kształtowania laserowego polega na określeniu parametrów i warunków obróbki, a przede wszystkim: mocy wiązki, wymiarów plamki na powierzchni materiału, prędkości ruchu plamki względem materiału oraz kształtu i rozkładu ścieżek nagrzewania.

Przy planowaniu rozkładu ścieżek dla powierzchni walcowej o kierownicy sinusoidalnej $y(x) = a \sin(bx)$ López i in. [10] wykorzystali uproszczoną zależność kąta zgięcia i długości łuku od krzywizny wyrażonej jako druga pochodna funkcji opisującej żądany kształt profilu powierzchni. W pracy Kim i Na [11] zaproponowano dwa algorytmy rozwiązania odwrotnego zadania kształtowania laserowego. Do opisu kierownicy powierzchni walcowej wykorzystano krzywe sklepane, złożone z łuków wielomianowych trzeciego stopnia. Algorytmy wyznaczania rozkładu ścieżek polegały na rekurencyjnym wpisywaniu (lub opisywaniu) łamanej w zadaną krzywą profilu powierzchni. Podobne podejście zostało zaproponowane do projektowania kształtowania płomieniowego powłok poszycia statku [12].

Liu i Yao [13] zastosowali metody optymalizacji do rozwiązywania odwrotnego zadania kształtowania laserowego. W przypadku powłoki o powierzchni rozwijalnej z tworzącymi równoległymi narzucali warunek stałej odległości pomiędzy ścieżkami nagrzewania lub rozkład odległości ścieżek zadany funkcją potęgową. W pracy Shi i in. [14] rozpatrywano formowanie powłoki z walcową powierzchnią rozwijalną i kierownicą sinusoidalną $y(x) = a \sin(bx)$. Wykorzystywano obszerną bazę wyników obliczeń numerycznych wiążących kąt zgięcia z prędkością przemieszczania wiązki laserowej. Odległości ścieżek wynikały z zadanego stałego przyrostu odciętej x .

Cheng i Yao [15] zastosowali algorytm genetyczny do projektowania procesu laserowego kształtowania powłok walcowych z kierownicą kołową lub paraboliczną. Callebaut i in. [16] dla podobnej powierzchni pokazali projektowanie rozkładu ścieżek laserowych z użyciem procedury CAD/CAM i specjalistycznego programu Rhinoceros NURBS.

Niemal wszystkie algorytmy projektowania przedstawione w przytoczonych pracach charakteryzują się tym, że wymagany kąt zgięcia w ogólności może być inny na każdej ścieżce grzania, co podwyższa wymagania dotyczące doboru parametrów technologicznych i precyzji sterowania procesem kształtowania. W jednym przypadku [11] algorytm jest oparty na stałej wartości kąta zgięcia, jednak ma inną niekorzystną cechę. Proponowany w tej i innych publikacjach eksperymentalny dobór parametrów technologicznych lub używanie do tego celu symulacji numerycznych pogarszają efektywność planowania procesu i jego dokładność.

W niniejszym artykule przedstawiono metodę termicznego kształtowania elementów o powierzchni rozwijalnej, polegającą na wykorzystaniu mechanizmu gradientu temperatury i wiązki laserowej jako źródła ciepła. Ścisła analiza deformacji wywołanych z wykorzystaniem mechanizmu gradientu temperatury wskazuje, że oprócz deformacji zgięciowej daje

on również składową błonową pola odkształcenia, jednak jej udział w końcowej deformacji jest mniejszy i w przedstawionym algorytmie został pominięty.

Kształtowanie elementu przestrzennego z płaskiej blachy jest operacją odwrotną do rozwijania kształtu docelowego na płaszczyźnie. Dla zadanej powierzchni trójwymiarowej należy więc znaleźć jej rozwinięcie na płaszczyźnie oraz rozkład odkształcenia, które należy wywołać w płaskim materiale wyjściowym, aby uzyskać pożądany kształt przestrzenny.

Zadana powierzchnia rozwijalna daje się – z pewną dokładnością – aproksymować zbiorem wybranych tworzących i segmentów łączących kolejne pary tworzących. Uzasadnione jest przyjęcie założenia, że taką powierzchnię można ukształtować przez dokonanie szeregu zagięć wzdłuż kolejnych tworzących. Naturalne wydaje się więc stosowanie prostoliniowych ścieżek nagrzewania. Ich położenie na płaskim materiale wyjściowym powinno się pokrywać z położeniem tworzących powierzchni docelowej, ale po jej rozwinięciu na płaszczyźnie. Przez dokonanie kolejnych zagięć na blasze, która w stanie początkowym była płaska, otrzymuje się pożądany kształt przestrzenny.

W pracy pokazano sposób wyznaczania rozkładu ścieżek laserowych na powierzchni płyt – tak aby po jednokrotnej sekwencji skanowania płyta przyjęła zadany kształt. Materiał wyjściowy w postaci płaskiej blachy lub płyty jest nagrzewany po prostoliniowych ścieżkach, których rozkład można wyznaczyć analitycznie lub numerycznie. Istotną cechą wyróżniającą tej metody jest jednakowy (z założenia) kąt zgięcia na wszystkich ścieżkach. W praktyce oznacza to duże ułatwienie sterowania procesem i utrzymywania jego powtarzalności dzięki korzystaniu z ustalonych parametrów obróbki, tj. mocy wiązki, rozmiarów plamki laserowej i prędkości przemieszczania wiązki. Wpływ fluktuacji rzeczywistych parametrów nagrzewania laserowego i własności materiału, zwłaszcza współczynnika absorpcji promieniowania, łatwiej można kompensować, wprowadzając poprawki do ustalonego zestawu parametrów obróbki.

Laserowe formowanie powłok o kształcie zadanej powierzchni walcowej

Zależność kąta zgięcia otrzymywanego po jednym przejściu wiązki laserowej (α_b) od parametrów obróbki i danych materiałowych dla wiązki o przekroju kołowym i prostokątnym została wyprowadzona odpowiednio w pracach [17] i [18].

Dla wiązki o przekroju kołowym uzyskano następujące rozwiązanie analityczne [17]:

$$\alpha_b = \frac{12}{\pi} \sqrt{\frac{2}{e}} \frac{\alpha_{th} AP \kappa}{\lambda v h^2} \left\{ \ln \theta_s - \sqrt{\frac{2\kappa d}{e v h^2}} [\theta_s - \ln(e \theta_s)] \right\} \quad (1)$$

$$\theta_s = \frac{T_s - T_0}{T_{pl} - T_0} = \frac{4AP}{\pi \lambda (T_{pl} - T_0)} \sqrt{\frac{\kappa}{v d^3}} \quad (2)$$

a dla wiązki o przekroju prostokątnym [18]:

$$\alpha_b = 6 \sqrt{\frac{2}{e \pi}} \frac{\alpha_{th} AP \kappa}{\lambda v h^2} \left\{ \ln \theta_s - \sqrt{\frac{2\kappa b}{e v h^2}} [\theta_s - \ln(e \theta_s)] \right\} \quad (3)$$

$$\theta_s = \frac{T_s - T_0}{T_{pl} - T_0} = \frac{2AP}{l \lambda (T_{pl} - T_0)} \sqrt{\frac{\kappa}{\pi v b}} \quad (4)$$

gdzie: θ_s – bezwymiarowa temperatura powierzchni nagrzewanej przez wiązkę laserową; T_s – temperatura powierzchni; T_{pl} – temperatura krytyczna; T_0 – temperatura początkowa płyty; P – moc wiązki laserowej; v – prędkość przemieszczania wiązki laserowej; d – średnica wiązki kołowej na powierzchni materiału; b – wymiar przekroju wiązki prostokątnej na kierunku jej ruchu; l – wymiar przekroju

wiązki prostokątnej na kierunku prostopadłym do jej prędkości; α_{th} – współczynnik termicznej rozszerzalności liniowej; A – współczynnik absorpcji promieniowania laserowego; λ – współczynnik przewodzenia ciepła materiału; κ – współczynnik wyrównywania temperatury; h – grubość materiału; $e \approx 2,71828$ – podstawa logarytmu naturalnego.

Kąt zgięcia otrzymywany dla jednokrotnego przejścia wiązki laserowej rośnie z mocą wiązki, a maleje, gdy rośnie prędkość skanowania. Równania (1) i (3) pozwalają dobierać parametry obróbki dla: zadanego materiału, dopuszczalnej maksymalnej temperatury i wartości kąta zgięcia α_b , pożądanej ze względu na wymaganą gładkość powierzchni.

Kształt powierzchni rozwijalnej o tworzących równoległych można, przedziałami, opisać funkcją $y=f(x)$. Opracowana metoda pozwala wyznaczyć rozkład ścieżek (krawędzi gięcia) na płaskim materiale wyjściowym, począwszy od punktu $x=0, y=0$ krzywej $y=f(x)$ w każdym przedziale umieszczonej tak, że jest ona w początku układu styczna do osi Ox . Odległości L_n ($n=1, 2, \dots, N$; N – liczba ścieżek) kolejnych ścieżek od początku lokalnego układu przedstawia następujące równanie:

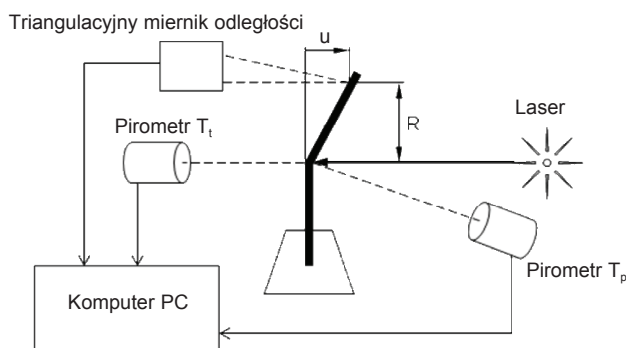
$$L_n = \int_0^{x_n} \sqrt{1 + [f'(x)]^2} dx \quad (5)$$

gdzie: $f'(x)$ – pochodna funkcji $y=f(x)$ opisującej kształt kierownicy docelowej powierzchni; x_n – rozwiązania następujących równań dla każdego numeru ścieżki n :

$$f'(x_n) = \operatorname{tg}(n\alpha_b) \quad (6)$$

Równanie (5) opisuje łukowe współrzędne punktów, w których zadana krzywa ma nachylenie równe kolejnym wielokrotnościom wybranego kąta α_b . W kolejnych przedziałach musi być spełniony warunek $n\alpha_b \leq \frac{\pi}{2}$ (dla kąta α_b wyrażonego w radianach), który narzuca ograniczenie na liczbę ścieżek w danym przedziale.

Aby zrealizować kształtowanie, należy zbudować układ pozwalający na precyzyjny pomiar kąta zgięcia otrzymywanego po przejściu wiązki laserowej po danym materiale wyjściowym. Dla zapewnienia jak najlepszej powtarzalności kształtowania układ pomiarowy powinien także realizować bieżący pomiar maksymalnej temperatury materiału w plamce laserowej i kontrolę temperatury początkowej materiału przed każdym przejściem wiązki. Pomiary temperatury materiału są potrzebne także do spełnienia warunku nieprzekroczenia temperatury dopuszczalnej ze względu na przemiany mikrostrukturalne lub inne. Schemat układu przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat układu do bezdotykowych pomiarów i kontroli kąta zgięcia, temperatury początkowej i bieżącej maksymalnej temperatury materiału

■ **Formowanie powłoki walcowej o kierownicy parabolicznej.** W celu przetestowania przedstawionego algorytmu opracowano parametry technologiczne potrzebne do kształtowania powłoki rozwijalnej walcowej o kierownicy opisanej funkcją paraboliczną $y=kx^2$, gdzie $k=0,25 \text{ cm}^{-1}$. Po wykorzystaniu zależności (5) i (6) otrzymamy następujący wzór

na odległości kolejnych ścieżek od punktu $x=0, y=0$, tj. na pozycje tych ścieżek na początkowo płaskim materiale leżącym na osi Ox :

$$L_n = \frac{\operatorname{tg}(n\alpha_b)}{\cos(n\alpha_b)} + \ln \frac{1 + \sin(n\alpha_b)}{\cos(n\alpha_b)} \quad (7)$$

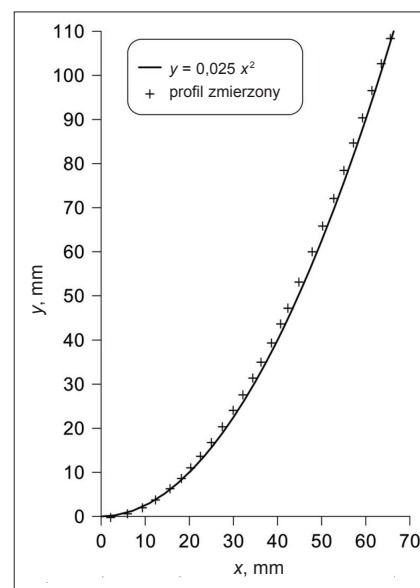
Kształtowanie zrealizowano z wykorzystaniem płytki o wymiarach $150 \times 50 \text{ mm}$ i grubości 2 mm , wykonanej ze stali nierdzewnej. Aby zapewnić powtarzalną i wysoką absorpcyjność dla promieniowania lasera CO_2 , powierzchnia płytki została utleniona przez wygrzewanie w piecu.

Wiązka laserowa była przemieszczana w poprzek próbki zamocowanej w pozycji pionowej. Deformację próbki mierzono bezdotykowo i w sposób ciągły, za pomocą laserowego triangulacyjnego miernika przemieszczeń. Kąt zgięcia próbki wyznaczano z zależności $\alpha_b = \operatorname{arctg}(u/R)$ na podstawie mierzonego przemieszczenia u i odległości R punktu pomiaru przemieszczenia od środka wiązki laserowej (rys. 3). Temperaturę próbki w plamce wiązki lasera CO_2 mierzono w sposób ciągły za pomocą pirometru oznaczonego T_p na rys. 3, którego zakres pomiarowy wyniósł $250 \div 1650 \text{ }^\circ\text{C}$. Pirometr ten był związany z wiązką i nacełowany w środek plamki laserowej. Pozwoliło to rejestrować maksymalną temperaturę próbki podczas nagrzewania laserowego. Do mierzenia początkowej temperatury materiału T_0 zastosowano pirometr oznaczony T_1 na rys. 3, o zakresie pomiarowym $50 \div 400 \text{ }^\circ\text{C}$, związany z próbką i stale wycelowany w jej środek na powierzchni tylnej.

Na rys. 4 przedstawiono laserowo ukształtowaną powłokę, a na rys. 5 – porównanie zmierzonego profilu laserowo ukształtowanej powłoki o kierownicy parabolicznej z kształtem zadanej paraboli. Kąt zgięcia przy każdym przejściu wiązki lasera CO_2 wynosił $\alpha_b = 3^\circ$.



Rys. 4. Laserowo ukształtowana powłoka o powierzchni rozwijalnej z równoległymi tworzącymi i o kierownicy parabolicznej



Rys. 5. Porównanie zadanego i otrzymanego kształtu profilu powłoki

■ **Formowanie powłoki walcowej o kierownicy eliptycznej.** Kształt elipsy, której najniższy punkt znajduje się w początku układu współrzędnych, można przedstawić w postaci parametrycznej:

$$\begin{aligned} x &= a \sin t \\ y &= b(1 - \cos t) \end{aligned} \quad (8)$$

gdzie a i b oznaczają odpowiednio dużą i małą półosi elipsy.

Równanie (5), służące do wyznaczania rozkładu ścieżek laserowych, w opisie parametrycznym ma postać:

$$L_n = \int_0^{t_n} \sqrt{[x'(t)]^2 + [y'(t)]^2} dt \quad (9)$$

gdzie t_n są rozwiązaniami równań:

$$\frac{y'(t_n)}{x'(t_n)} = \operatorname{tg}(n\alpha_b) \quad (10)$$

W omawianym przypadku kierownicy eliptycznej i opisu parametrycznego także przyjęto założenie, że przy każdym przejściu wiązki płytka ulega zgięciu o stały kąt α_b .

Po podstawieniu funkcji (8) do równań (9) i (10) otrzymamy:

$$L_n = a \int_0^{t_n} \sqrt{1 - \frac{a^2 - b^2}{a^2} \sin^2 t} dt \quad (11)$$

$$t_n = \operatorname{arctg}\left(\frac{a}{b} \operatorname{tg}(n\alpha_b)\right) \quad (12)$$

Po wykonaniu całkowania w równaniu (11) z granicą całkowania określoną przez związek (12) otrzymamy rozwiązanie zawierające całość eliptyczną:

$$L_n = aE(m, t_n) = aE\left[m, \operatorname{arctg}\left(\frac{a}{b} \operatorname{tg}(n\alpha_b)\right)\right] \quad (13)$$

gdzie: $E(m, t_n)$ jest całką eliptyczną niepełną drugiego rodzaju, mimośród elipsy $m = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$ spełnia warunki $0 < m < 1$, kąt t_n spełnia warunki $0 < t_n = \operatorname{arctg}\left(\frac{a}{b} \operatorname{tg}(n\alpha_b)\right) < \frac{\pi}{2}$.

Zależność (13) opisuje rozkład ścieżek laserowych w jednej ćwiartce elipsy.

W szczególnym przypadku, gdy $a = b = r$, kierownica jest łukiem okręgu, mimośród $m = 0$, a rozkład ścieżek będzie jednorodny, o stałym kroku $r\alpha_b$ (α_b w radianach):

$$L_n = nra_b \quad (14)$$

gdzie r jest promieniem kierownicy kołowej.

Na rys. 6 pokazano przykład laserowo ukształtowanego elementu o powierzchni rozwijalnej z równoległymi tworzącymi, złożonego z dwóch segmentów o kierownicach kołowych. Nagrzewanie ścieżek w obu segmentach powłoki było prowadzone na przeciwnych stronach materiału.



Rys. 6. Laserowo uformowana powłoka o powierzchni rozwijalnej z dwiema kierownicami kołowymi

Metoda laserowego kształtowania powłok o powierzchniach rozwijalnych z nierównoległymi tworzącymi

Zadanie projektowania ścieżek grzania potrzebnych do kształtowania powłok rozwijalnych o tworzących nierównoległych zaprezentowano na przykładzie kształtowania łopatki pompy. Zainteresowanie możliwościami nowej techniki okazała firma wiodąca na rynku pomp, a także światowy koncern z branży laserów przemysłowych.

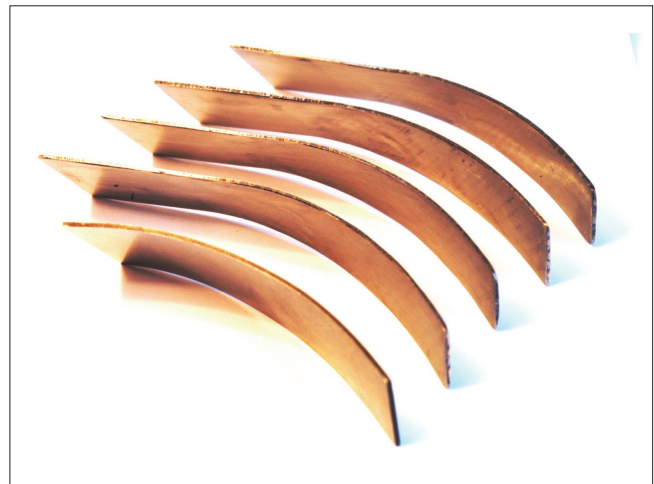
O ile kształt powierzchni o tworzących równoległych może być opisany kształtem kierownicy płaskiej i jednakowym położeniem kątowym wszystkich tworzących, to w przypadku tworzących nierównoległych należy określić przebieg zmienności położenia kątowych tworzących. Dlatego właśnie zaprojektowanie rozkładu ścieżek dla powierzchni z tworzącymi nierównoległymi wymagało modyfikacji omówionej wcześniej metodyki.

Na podstawie kształtu łopatki wzorcowej wyznaczono jej profile w wybranych dwóch płaszczyznach i dokonano rozwinięcia jej powierzchni na płaszczyźnie. Rozwinięcie to zostało wykorzystane do laserowego wycinania materiału wyjściowego do kształtowania.

Profile docelowej powierzchni poddano aproksymacji wielomianami potęgowymi. W omawianym przypadku wystarczyło zastosowanie wielomianów trzeciego stopnia. Przyjęto, że każda z tych funkcji może być traktowana jako opis kierownicy powierzchni. W procedurze numerycznej na podstawie zależności (3) i (4) wyznaczono położenia kolejnych punktów wspólnych krawędzi gięcia i linii profilu. Łącząc odpowiednie punkty z obu profili, wyznaczono położenie krawędzi gięcia, które są utożsamiane z tworzącymi powierzchni. Początkowo przyjęta stała wartość kąta zgięcia na każdej krawędzi została następnie skorygowana z uwagi na kąt pochylecia tworzącej względem kierownicy.

Kształtowanie łopatek ze stali nierdzewnej 1H18N9T o grubości 1 mm zostało zrealizowane na numerycznie sterowanym stanowisku z laserem Nd:YAG o mocy 150 W. Na rys. 7 pokazano łopatki: wzorcową (pierwsza od dołu) oraz cztery ukształtowane laserowo. Są one dłuższe od łopatki wzorcowej, ponieważ mają część chwytową służącą do mocowania materiału na stanowisku.

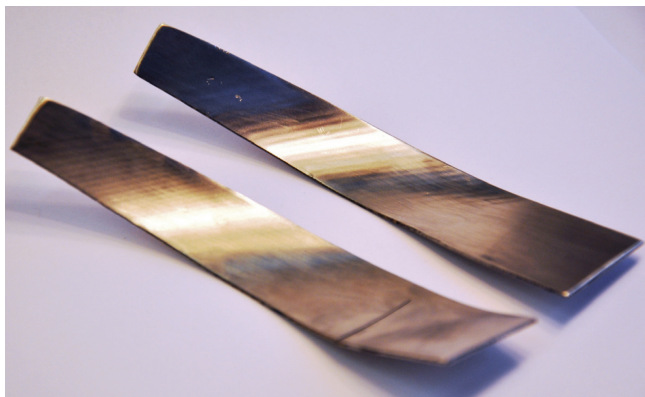
Kształtowanie jednej łopatki na uniwersalnym stanowisku badawczym trwało ok. 11 min. Czas ten można znacznie skrócić przez zastosowanie lasera o większej mocy i wydajnego układu chłodzenia materiału. Znaczną część czasu kształtowania zajmuje chłodzenie materiału. Dalszy wzrost efektywności procesu można więc uzyskać poprzez równoległe kształtowanie tą samą wiązką laserową większej liczby detali na raz, wykorzystując czas chłodzenia jednego detalu na nagrzewanie innych.



Rys. 7. Łopatka wzorcowa (pierwsza od dołu) i cztery łopatki ukształtowane laserowo

Falistość otrzymanych powierzchni zależy od gęstości rozłożenia krawędzi gięcia. Opracowany algorytm projektowania procesu pozwala elastycznie zmieniać tę gęstość i uzyskiwać dopuszczalną falistość powierzchni (rys. 8).

Dzięki skomputeryzowanemu sposobowi planowania i realizacji procesu kształtowania możliwe jest względnie szybkie przeprogramowanie produkcji przy niezmiennym oprzyrządowaniu stanowiska. Możliwość łatwego przeskalowania rozkładu ścieżek dla wyrobów o różnej wielkości pokazuje rys. 9.



Rys. 8. Dwie łopatki wykonane z różnym zagęszczeniem ścieżek nagrzewania



Rys. 9. Dwie łopatki wykonane z wykorzystaniem prostego przeskalowania rozkładu ścieżek laserowych

Podsumowanie

Przedstawiona metoda laserowego kształtowania powłok o powierzchniach rozwijalnych wyróżnia się wieloma cechami szczególnymi:

- Kształtowanie odbywa się w sposób bezdotykowy i może być prowadzone w miejscach niedostępnych lub trudno dostępnych dla narzędzi mechanicznych, w tym na materiałach będących w ruchu.
- Projektowanie i realizacja procesu mogą być w wysokim stopniu zautomatyzowane.
- Operacje kształtowania różnych wyrobów można wykonywać na jednym stanowisku i w połączeniu z innymi rodzajami obróbki laserowej.
- Można z równą łatwością kształtować materiały twarde, kłopotliwe w obróbce mechanicznej.
- Narzędzie obróbki, czyli wiązka laserowa, nie podlega zużyciu w takim sensie i wymiarze jak narzędzia mechaniczne (np. stemple i matryce).

Zaprezentowane podejście do projektowania procesu termicznego kształtowania pozwala na wyznaczanie parametrów technologicznych – tj.: mocy, wymiarów plamki laserowej, prędkości ruchu wiązki i rozkładu ścieżek laserowych – z wykorzystaniem podanych rozwiązań analitycznych dotyczących kąta zgięcia blachy ogrzewanej wiązką o przekroju kołowym lub prostokątnym. Podano przykładowe rozwiązania analityczne na rozkład trajektorii grzania laserowego dla kształtowania powłok rozwijalnych o kierownicy parabolicznej i eliptycznej. Omówiono sposób postępowania w ogólnym przypadku, gdy kierownicę można przedziałami opisać wielomianami i uzyskać rozkład ścieżek z zastosowaniem nieskomplikowanej procedury numerycznej.

Wykorzystanie stosunkowo prostych rozwiązań analitycznych lub numerycznych daje możliwość projektowania procesów optymalnych ze względu na dopuszczalną falistość powłoki i dopuszczalną temperaturę materiału w procesie kształtowania. Oparcie metodyki na założeniu ustalonej wartości kąta zgięcia na każdej ścieżce laserowej ułatwia sterowanie procesem i sprzyja uzyskiwaniu powtarzalnych jego wyników.

Kształtowanie termiczne jest od dawna stosowane w produkcji stoczniowej i innych obszarach wytwarzania krótkoseryjnego. Zaprezentowana metodyka projektowania procesów formowania powłok o powierzchni rozwijalnej może powiększyć zakres efektywnego wykorzystania kształtowania termicznego.

LITERATURA

1. Myśliwiec M. „Ciepłno-mechaniczne podstawy spawalnictwa”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1972.
2. Anderson R.J. „Experiments and simulation of line heating of plates”. Master’s Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1999.
3. Frąckiewicz H., Mucha Z., Trąmpczyński W., Baranowski A., Cybulski A. Sposób gięcia przedmiotów metalowych. Patent UP PRL nr 155 358, 1992.
4. Frąckiewicz H., Mucha Z., Gradoń R., Kalita W. Method of Bending Metal Objects with an Energy Beam. Patent US 5 719 374, 1998.
5. Vollertsen F. „Laserstrahlumformen. Lasergestützte Formgebung: Verfahren, Mechanismen, Modellierung”. Bamberg: Meisenbach Verlag, 1996.
6. Tango Y., Ishiyama M., Suzuki H., „»IHIMU-α«. A Fully Automated Steel Plate Bending System for Shipbuilding”. *IHI Engineering Review*. Vol. 44, No. 1 (2011).
7. Hashimoto T. „Line heating method – a new technique taking the place of smith work”. *60th Anniversary Series of the Society of Naval Architects of Japan*. Vol. 5 (1961): pp. 53+71.
8. „The National Shipbuilding Research Program Line Heating”. U.S. Department of Transportation, Maritime Administration, in cooperation with Todd Pacific Shipyards Corporation, USA, November 1982.
9. Yu G., Anderson R.J., Maekawa T., Patrikalakis N.M. „Efficient Simulation of Shell Forming by Line Heating”. *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 43, No. 10 (October 2001): pp. 2349+2370.
10. Lopez D., Dubslaff J., Hofling R., Aswendt P. „Application of a high-power diode laser for laser bending”. *Proc. SPIE*. Vol. 3097 (1997): pp. 692+697.
11. Kim J., Na S.J. „Development of irradiation strategies for free curve laser forming”. *Optics and Laser Technology*. 35 (2003): pp. 605+611.
12. Seong W.J., Ahn J.S., Na S.J. „A study on geometrical approach for solving inverse problem of 2D flame forming of ship hull plates”. *Proc. of IWOTE’08*, BIAS-Verlag, 2008: pp. 253+264.
13. Liu C., Yao Y.L. „Optimal and robust design of the laser forming process”. *Journal of Manufacturing Processes*. Vol. 4, No. 1 (2002): pp. 52+66.
14. Shi Y.J., Chen J., Qi Y.G., Yao Z.Q. „Processing strategy for laser forming of complicated singly curved shapes”. *Materials Science and Technology*. Vol. 25, No. 7 (2009): pp. 925+930.
15. Cheng J., Yao Y.L. „Process Synthesis of Laser Forming by Genetic Algorithms”. *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 44, No.15 (2004): pp. 1619+1628.
16. Callebaut B., Duflou Joost R., Kruth J.P. „Laser Forming Oriented CAD/CAM for Developable Surfaces”. *Key Engineering Materials*. Vol. 344 (2007): pp. 905+912.
17. Mucha Z., Widłaszewski J., Cabaj M., Gradoń R. „Surface temperature control in laser forming”. *Archives of Thermodynamics*. Vol. 24 (2003), No. 2: pp. 89+105.
18. Mucha Z. „Deformacje i naprężenia indukowane w materiałach pod działaniem poruszającej się wiązki lasera CO₂”. *Mechanik*. Nr 12 (2008): s. 1018+1021. ■