

Układ optyczny do prowadzenia wiązki lasera CO₂ wzdłuż ramienia robota spawalniczego

DR INŻ. **Robert Barbucha** (BROBERT@IMP.GDA.PL), ZAKŁAD ZASTOSOWAŃ TECHNIKI PLAZMOWEJ I LASEROWEJ, OŚRODEK TECHNIKI PLAZMOWEJ I LASEROWEJ, INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH PAN IM. ROBERTA SZEWAŁSKIEGO W GDAŃSKU

W artykule zaprezentowano projekt i testy układu optycznego do prowadzenia wiązki lasera CO₂ wzdłuż ramienia robota przemysłowego. Obecnie w przemyśle dużą popularnością cieszą się lasery światłowodowe dużej mocy (rzędu kilku kW), które z łatwością można zaadaptować na końcówce roboczej robota przemysłowego. Możliwa jest wtedy obróbka elementów trójwymiarowych wykonanych z metali. Okazuje się jednak, że w przypadku tworzyw sztucznych najlepsze parametry obróbki otrzymuje się przy zastosowaniu lasera gazowego CO₂ [1]. Pomimo iż istnieją drogie światłowody (wykonane ze szkła germanowego) do transmisji promieniowania o dużej mocy, straty promieniowania na takim światłowodzie mogą sięgać nawet 50% [2]. Z tego powodu dla laserów CO₂ najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie układu ruchomych zwierciadeł kierujących wiązkę laserową do głowicy roboczej. Opracowana konstrukcja została zintegrowana z tanim robotem spawalniczym.

Laseryowa obróbka tworzyw sztucznych polega zazwyczaj na topieniu materiału. Dlatego bardzo często stosuje się lasery CO₂, których długość fali promieniowania wynosi 10,6 μm i jest bardzo dobrze absorbowana przez materiały polimerowe [3]. Zalety laserowej obróbki tworzyw sztucznych to przede wszystkim: możliwość cięcia skomplikowanych kształtów, możliwość programowania produkcji taśmowej, możliwość obróbki różnych materiałów, brak konieczności wykańczania brzegów (np. jak to ma miejsce w przypadku obróbki mechanicznej) oraz zminimalizowanie strat materiałowych (laser usuwa mini-

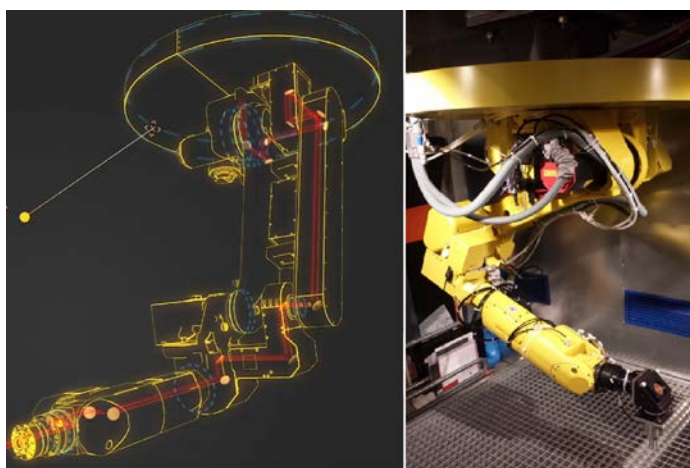
malną część materiału w porównaniu do obróbki mechanicznej). Ponadto stosowanie laserów w obróbce tworzyw sztucznych daje możliwości zmiany koloru, w celu wykonania trwałych napisów (promieniowanie laserowe wchodzi w interakcje z pigmentami zawartymi w tworzywie, powodując reakcję chemiczną skutkującą zmianą koloru).

Możliwe jest także zastosowanie obróbki laserowej w tworzywach wytwarzanych techniką termoformowania, polegającą na równomiernym nagrzananiu płyty polimerowej lub folii powyżej temperatury mięknięcia, a następnie jej odkształcenia pod wpływem ciśnienia zewnętrznego, odwzorowując kształt

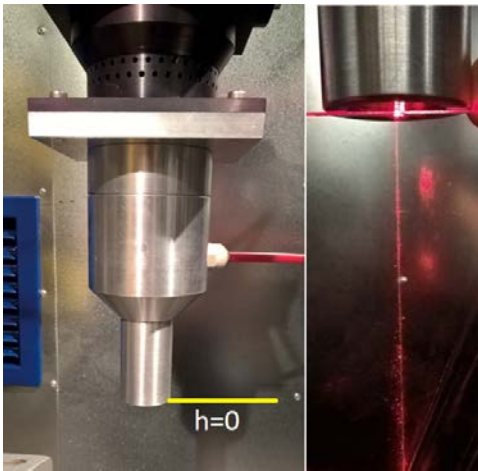
formy [4]. Technologia termoformingu wykorzystywana jest głównie tam, gdzie nie można zastosować technologii wtryskowej, czyli przy wytwarzaniu wyrobów o bardzo małej grubości ścianek i znacznych gabarytach (rzędu kilku m²). Jednakże przy tej technologii nie można wytłoczyć gotowego produktu od razu. Konieczne jest jego wykrwanie (wycięcie z większej formy), które z wielu względów jest problematyczne przy zastosowaniu metody mechanicznej. Zastosowanie w tym celu zrobotyzowanego systemu laserowego daje duże możliwości obróbki, jak również wysoką precyzję cięcia (rzędu ±10 μm) i dobrą jakość brzegów. Laserem moż-



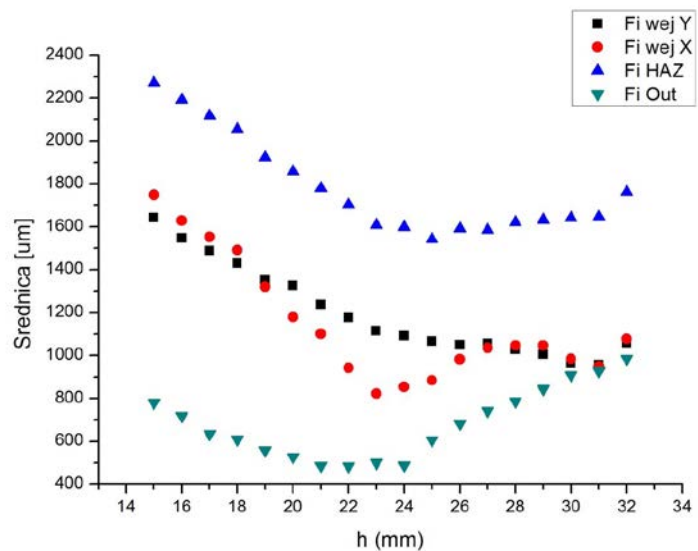
Rys. 1. Gotowa prototypowa konstrukcja podwieszonego robota spawalniczego zintegrowanego z laserem CO₂ na drugiej osi



Rys. 2. Robot z układem 17 zwierciadeł przymocowanych na przegubach



Rys. 3. Głowica tnąca z zaznaczoną pozycją $h = 0$ mm oraz wiązka lasera pilotującego propagująca w płycie z pleksiglasu



Rys. 4. Geometria otworów w zależności od położenia płytki pleksi

na także wykonać dodatkowe otwory, gdyż w procesie termoformingu nie jest możliwe ich wykonanie.

Doprowadzenie wiązki z lasera do ruchomej głowicy roboczej robota przemysłowego jest technicznie skomplikowane. Zazwyczaj realizuje się to poprzez zastosowanie elastycznych światłowodów prowadzących wiązkę laserową. Jednakże takie rozwiązanie uniemożliwia stoso-

wanie laserów CO₂ o stosunkowo dużej mocy średniej (rzędu 500 W). Stosowanie światłowodów powoduje, że jakość wiązki laserowej (profil wiązki, rozkład modów poprzecznych TEM, minimalny rozmiar ogniska wiązki laserowej) zostaje znacząco zdeformowany. Pomimo że istnieją drogie światłowody (wykonane ze szkła germanowego) do transmisji promieniowania o dużej mocy, straty

promieniowania na takim światłowodzie mogą sięgać nawet 50% [2]. Z tego powodu w przypadku laserów CO₂ najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie układu ruchomych zwierciadeł kierujących wiązkę laserową do głowicy roboczej. Wymaga to jednak wykorzystania robota przemysłowego o specjalnej konstrukcji dostosowanego do prowadzenia wiązki laserowej w ten sposób. ❖

❖ W artykule zaprezentowano układ optyczny, który będzie mógł być zamocowany na dowolnym typie robota. Jednakże, ze względu na popularność robotów spawalniczych oraz ich niższy koszt zakupu w porównaniu do innych robotów, opracowany układ został zamontowany na 6-osiowym robocie spawalniczym (model Fanuc M-20iA).

Układ optyczny

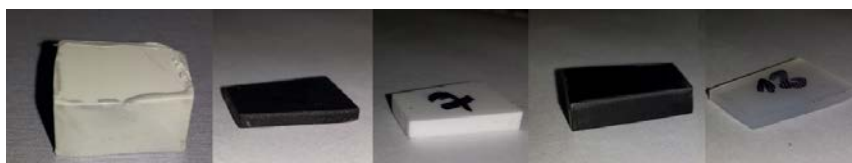
Układ optyczny został zaadaptowany do robota podwieszonego w pozycji odwrotnej. Ma to na celu zwiększenie przestrzeni roboczej robota oraz umożliwienie dotarcia do każdej strony detalu pod odpowiednim kątem. Układ optyczny składa się z maksymalnie 17 zwierciadeł chłodzonych wodą. Zwierciadła są przymocowane do robota w taki sposób, że umożliwiają jego dowolny ruch. Wiązka trafia w środku zwierciadeł, więc podczas obrotu danej osi robota nie następuje przesunięcie wiązki względem osi obrotu. Jest to układ, który pozwoli na wykorzystanie dowolnego źródła laserowego na dowolnie wybranym robocie przemysłowym. W obecnym etapie istnieją dwie możliwości integracji lasera CO₂ z robotem poprzez układ optyczny:

- montaż lasera CO₂ o mniejszej mocy (rzędu 100-200 W) na drugiej osi robota (rys. 1),
- montaż lasera CO₂ o większej mocy (do 6 kW) poza robotem (rys. 2).

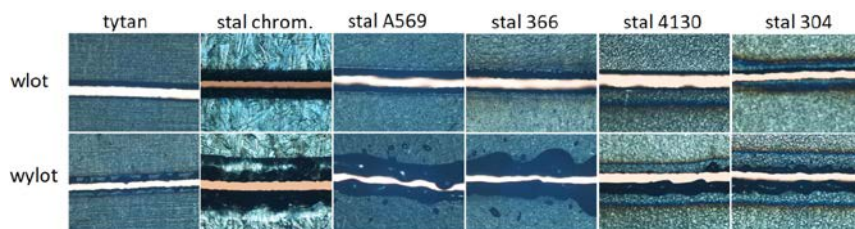
W pierwszym przypadku zmniejsza się liczba zwierciadeł chłodzonych wodą (9 sztuk), dzięki czemu układ jest bardziej kompaktowy. Poza tym istnieje możliwość montażu robota w pozycji normalnej, przez co nie jest wymagana specjalnie wzmocniona kabina robota. Jeżeli natomiast zależy nam na szybkości działania lub konieczna jest obróbka tworzyw grubszych niż 1 cm, to istnieje możliwość druga. Wtedy wiązka lasera jest wprowadzana przez otwór centralny w podstawie robota i następnie trafia na 17 zwierciadeł aż do głowicy tnącej z nadmuchiemy azotu (w celu zabezpieczenia soczewki skupiającej wiązkę lasera).

Badanie jakości wiązki laserowej

W celu przetestowania układu optycznego złożonego z 17 zwierciadeł wykonano test jakości wiązki laserowej za soczewką skupiającą na gło-



Rys. 5. Próbkę tworzyw sztucznych wyciętych zrobotyzowanym systemem laserowym (po kolei od lewej: żywica polimerowa, polichlorek winylu, akryl biały, poliwęglan czarny, polipropylen mleczny)



Rys. 6. Powiększone zdjęcia po cięciu laserowym w wlocie wiązki laserowej w materiał i na wylocie

wicy tnącej robota. Mierzono średnicę otworów wykonanych laserem CO₂ w płytce z plexiglasu na różnych odległościach od pozycji $h = 0$ mm zaznaczonej na rys. 3. Położenia płytki zmieniano w zakresie od 15 mm do 32 mm. Następnie zmierzono geometrię powstałych otworów. Otwory wejściowe były eliptyczne, dlatego zmierzono oddzielnie długość i którąś z półosi otworów. Otwory wyjściowe były okrągłe, dlatego zmierzono ich średnicę. Zmierzono także średnicę obszaru HAZ (*Heat Affected Zone* – strefa wpływu ciepła) na powierzchni wejściowej, w którym pleksi została roztopiona. Wyniki przedstawiono na wykresie na rys. 4.

Z pomiarów wynika, że przewężenie wiązki znajduje się w odległości około $h = 23$ mm. Pomiar średnicy otworu w osi XZ (Fi wej X) i w osi Y (Fi wej Y) wykazują lekką rozbieżność eliptyczną w ognisku (rys. 5). Uzyskana średnica wiązki w ognisku zawiera się od 1,5 mm na wejściu do 0,6 mm na wyjściu. W przypadku obróbki tworzyw sztucznych są to wartości akceptowalne. Początkowo obawiano się, że wielokrotne odbicie wiązki laserowej od zwierciadeł spowoduje sporą jej deformację w ognisku, jednakże zauważono jedynie lekką eliptyczność (800 nm – półoś mała, 1200 nm – półoś wielka), która zanikała 3 mm pod i nad punktem przewężenia.

Testy cięcia laserowego

Wykonano badania laserowej obróbki tworzyw sztucznych oraz metali. Przetestowano cięcie bardzo wielu rodza-

jów tworzyw sztucznych występujących w przemyśle chemicznym, m.in.: żywicy polimerowej, polichloroku winylu, akrylu białego, poliwęglanu czarnego, polipropylenu. Wykonane badania pozwoliły przede wszystkim określić parametry lasera przy cięciu tworzyw sztucznych, jak również ukazały problemy związane z cięciem grubszych tworzyw. Na rys. 5 przedstawiono kilka przykładowych detali z tworzyw sztucznych wykonanych opracowanym systemem laserowym.

Grubość materiałów wynosiła odpowiednio: 1 cm dla żywicy polimerowej, 1,5 mm dla polichloroku winylu i dla akrylu, 4 mm dla akrylu białego i dla poliwęglanu czarnego oraz 1,8 mm dla polipropylenu mlecznego. W przypadku prezentowanych tworzyw wystarczyła moc 165 W lasera CO₂ przy prędkości liniowej cięcia 10 cm/s. Przetestowano także cięcie mniej popularnych tworzyw, takich jak: UHMW, Nylatron, acetal, GPO-3, teflon, włókno węglowe oraz włókno szklane.

W przypadku metali przetestowano cięcie następujących próbek wykonanych z: tytanu o grubości 0,5 mm, stali chromowanej o grubości 0,4 mm, stali A569 o grubości 1,7 mm, stali 366 o grubości 0,6 mm, stali 4130 o grubości 0,6 mm oraz stali 304 o grubości 2 mm. Na rys. 6 zaprezentowano powiększone zdjęcia po cięciu laserowym wymienionych próbek w wlocie wiązki laserowej w materiał i na wylocie.

Zaobserwowano powstawanie struktur zastygłej fazy ciekłej wokół rzazu nacięcia oraz przebarwienie powierzchni materiałów w obszarze HAZ. Za-

obserwowano, że wielkość tych struktur i stopień przebarwień zwiększa się ze wzrostem mocy średniej wiązki laserowej. Próbkę testowano przy mocach od 300 do 600 W.

Podsumowanie

Testy układu optycznego wykazały niewielką eliptyczność zogniskowanej wiązki laserowej, jednakże nie ma to znaczenia przy cięciu materiałów rzędu kilku milimetrów. Wyniki cięcia tworzyw sztucznych przeprowadzono dla reprezentatywnej grupy tworzyw. Najbardziej popularne tworzywa w przemyśle to PV, PCV oraz akryl. Najlepsze parametry cięcia (duża prędkość, dobra jakość krawędzi cięcia) można było zauważyć dla materiałów akrylowych. Bardzo trudne w obróbce okazało się UHMW (*ultra-high-molecular-weight polyethylene*). Zostało przecięte dopiero przy prędkości 1 cm/s. Bardzo trudny okazał się także w obróbce poliwęglan, w przypadku którego podczas cięcia wytwarza się kwas solny w postaci gazowej.

Na podstawie wyników badań cięcia elementów metalowych uzyskano prób-

ki o zróżnicowanej jakości w zależności od danego materiału. Stal chromowana charakteryzowała się stosunkowo wysoką jakością krawędzi cięcia w porównaniu np. do tytanu, w przypadku którego była widoczna strefa wpływu ciepła (tzw. strefa HAZ - *Heat Affected Zone*). Charakteryzuje się ona przebarwieniem metalu w okolicy krawędzi cięcia o mniej więcej stałej szerokości po obu stronach krawędzi. W przypadku tytanu strefa HAZ była mocno zauważalna od strony wierzchniej, natomiast na stronie spodniej można było zauważyć grudki osadzonego i przyspawanego materiału usuniętego ze szczeliny cięcia. Dla każdej z badanych próbek określono optymalną prędkość cięcia w stosunku do stałej mocy lasera CO₂. Prędkość ta odnosiła się do sytuacji, w której jakość krawędzi cięcia była najlepsza w stosunku do pozostałych wyników oraz materiał został w całości przecięty. Najlepsze krawędzie cięcia charakteryzowały się małą strefą HAZ z obu stron, równomierną krawędzią cięcia oraz niewielką liczbą grudek materiału, który mógł się osa-

dzić przy krawędzi od strony spodniej materiału. W tym przypadku najlepsze wyniki osiągnięto dla stali chromowanej o grubości 0,4 mm. □

Badania zrealizowano w ramach projektu INNOTECH-K2/IN2/87/182010/NCBR/13.

Piśmiennictwo

1. Atanasov P., Baeva M.: *CW CO₂ laser cutting of plastics. Proc. SPIE 3092*. „XI International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High-Power Laser Conference”, 772, Edinburgh 1997.
2. Ballato J., Hawkins T., Foy P., Yazgan-Koquoz B., Stolen R., McMillen C., Hon N.K., Jalali B.: *Rice, Glass-clad single-crystal germanium optical fiber*. „Optics Express 8029”, Vol. 17, No. 1011, May 2009.
3. Brown M., Craig A.: *Fundamentals of Laser-Material Interaction and Application to Multiscale Surface Modification, chapter 4*. „Springer Series in Materials Science”, 135, s. 91-117, 2010.
4. *Plastic Thermoforming, Fundamental Manufacturing Processes Study Guide*. „SME Training Programs”, 2015.
5. Kovacic P., Kyriakis A.: *Polymerization of benzene to p-polyphenyl*, „Tetrahedron Letters”, 3 (11), s. 467-469, 1962.