

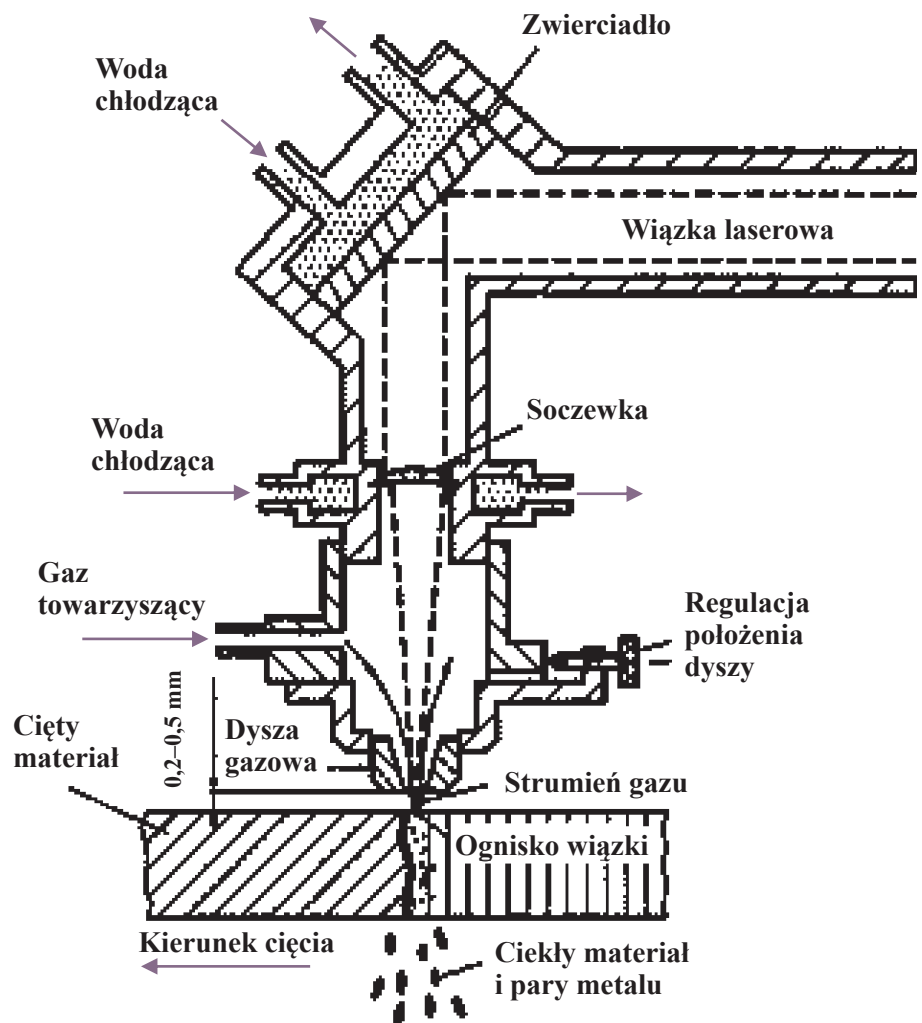
Wybrane zagadnienia technologii cięcia laserem

PAWEŁ ADAMCZYK, MAŁGORZATA SŁOMION, ANDRZEJ WOJCIECHOWSKI,
MACIEJ MATUSZEWSKI, OLEG POLISHCHUK

W artykule przedstawiono technologię cięcia laserem. W szczególności scharakteryzowano uwarunkowania technologiczne determinujące efektywność technologii. Wskazano najważniejsze zalety i wady cięcia laserem.

Wprowadzenie

Technologia cięcia laserem jest klasyfikowana jako niekonwencjonalna metoda cięcia [5]. Związana jest głównie ze zjawiskiem cieplnego wpływu światła lasera na materiały nieprzezroczyste. Nieprzezroczystość oraz nie odbijanie światła są bardzo ważnymi cechami ciętego materiału. W przeciwnym wypadku wiązka świetlna lasera, może zostać rozproszona lub odbita, co spowoduje niekontrolowane efekty, a w konsekwencji pogorszenie jakości ciętej powierzchni. Generowana wiązka fotonów doprowadzana jest za pomocą zwierciadeł, w tym przypadku – soczewki (rys. 1). Skupia ona wiązkę, która stanowi liniowe źródło ciepła, topiące materiał, natomiast doprowadzany gaz obróbkowy wyrzuca stopiony materiał ze szczeliny oraz jednocześnie ochrania zespół optyczny lasera. Współczynnik absorbowania energii świetlnej wiązki jest wprost proporcjonalny do rosnącej temperatury materiału. Istotną rolę pełni gęstość mocy wiązki, która aby uzyskać całkowite przepalenie powinna wynosić ponad $10^4 \div 10^5 \text{ W/mm}^2$, w zależności od rodzaju ciętego materiału [2].



Rys. 1. Schemat procesu cięcia laserem [2]

* Inż. Paweł Adamczyk, mgr inż. Małgorzata Słomion, dr hab. inż. Maciej Matuszewski – Politechnika Bydgoska, Wydział Zarządzania, mgr inż. Andrzej Wojciechowski – Ośrodek Doskonalenia Kadr SIMP, ODEKA Bydgoszcz, prof. Oleg Polishchuk – Narodowy Uniwersytet Techniczny, Chmielnicki, Ukraina.

Ze względu na ciepły charakter obróbki, można z tego względu wyróżnić kilka jej etapów [1, 2]:

- pochłanianie i przekazanie energii siatce krystalicznej materiału – oddziaływanie na materiał ściśle związane z energetycznym strumieniem lasera, przenikającym w jego głąb,
- nagrzewanie materiału obrabianego bez efektu niszczącego – w wyniku zmiany energii świetlnej w ciepło, następuje nagrzewanie się materiału, które może spowodować zmiany fazowe, chemiczne reakcje powstające na powierzchni warstwy wierzchniej, aktywizowanie się procesu dyfuzji jak i powiększenie się wymiarów geometrycznych,
- topienie i usuwanie materiału – zachodzący proces parowania ośrodka, poprzez zamianę wydzielanej przez laser energii cieplnej w nagrzewanie warstw, przy czym temperatura maksymalna odnotowana jest w kolejnych warstwach materiału licząc od jego wierzchu,
- stygnięcie materiału – obszar oddziaływania promieniowania laserowego, znajdujący się pod warstwą wierzchnią, nawet po zakończeniu impulsu nagrzewa się oraz zwiększa się strefa wpływu ciepła, obszar ten stygnie znacznie później niż powierzchnia materiału.

Podstawowe parametry cięcia laserem są następujące [5]:

- gęstość mocy wiązki laserowej w W/mm^2 ,
- średnica ogniska wiązki w mm,
- długość ogniskowej w mm,
- rodzaj gazu obróbkowego oraz jego ciśnienie w kPa,
- prędkość cięcia w m/min.

Obróbka wiązką świetlną lasera jest prowadzona wyłącznie metodą zautomatyzowaną lub zrobotyzowaną. Umożliwia to szczegółową kontrolę parametrów cięcia i ich sterowanie. Dzięki temu, otrzymuje się cięte elementy o dużej dokładności kształtowo-wymiarowej.

Uwarunkowania technologiczne cięcia laserem

Ważnym czynnikiem technologicznym, który wpływa na efekty cięcia laserem jest dobór gazu obróbkowego. Stosowane gazy, ze względu na swoje właściwości mają ściśle określone przez producentów zalecenia dotyczące użycia uwzględniające rodzaj ciętego materiału (Tabela 1).

gazu obróbkowego, argonu niesie za sobą konieczność zwiększenia mocy wiązki lasera, ze względu na tworzącą się plazmę nad obszarem cięcia, powodującą częściową stratę energii. Stosuje się go do obróbek materiałów trudnotopliwych oraz reaktywnych, co również jest powodem koniecznego zwiększenia mocy wiązki. Ciśnienie gazu obróbkowego mieści się w zakresie od kilku do 800 kPa, w zależności

Tabela 1. Zalecane stosowanie gazów obróbkowych w zależności od rodzaju ciętego materiału [2]

| Rodzaj gazu towarzyszącego | Rodzaj ciętego materiału |
|----------------------------|---|
| Powietrze | aluminium tworzywo sztuczne drewno materiały kompozytowe tlenek glinu szkło guma kwarc |
| Tlen | stale węglowe stale niskostopowe stale odporne na korozję miedź |
| Azot | stale odporne na korozję aluminium stopy niklu |
| Argon | stale specjalne, wysokostopowe stopy niklu aluminium i jego stopy tytan tantal cyrkon |

Tlen lub powietrze, oprócz wyrzucania ciekłego materiału z rejonów cięcia, zwiększają dostarczaną ilość ciepła dzięki występującej reakcji egzotermicznej tlenu z żelazem, a w konsekwencji zwiększają prędkość cięcia. Powietrze, jako gaz obróbkowy, znalazło największe zastosowanie przy cięciu laserowym ze względu na najmniejsze koszty stosowania. Używa się go przy obróbce stali węglowych, niskostopowych oraz materiałów niemetalicznych oraz w przypadkach gdy jakość ciętej powierzchni nie musi być duża. Tlen znalazł zastosowanie w przypadkach gdy jest wymagana bardzo duża dokładność. Azot stosowany najczęściej jest do cięcia laserowego stali odpornych na korozję, aluminium oraz stopów niklu do grubości materiału wynoszącej 3,0 mm. Użycie, jako

od rodzaju i grubości ciętego materiału [2, 4].

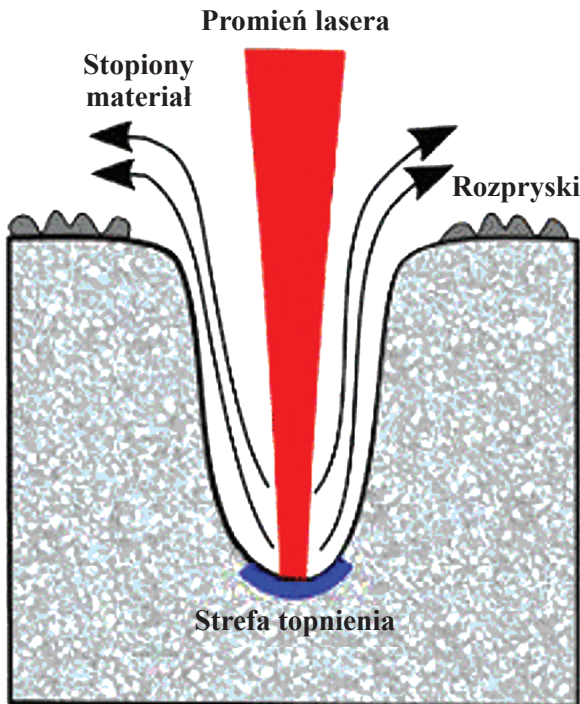
Podczas cięcia wiązką światła laserowego dąży się do tego, aby szczelina cięcia była możliwie jak najwęższa. Efekt ten uzyskuje się poprzez odpowiedni dobór dyszy gazowej. Średnica dyszy zazwyczaj zawiera się między 0,75 ÷ 3,0 mm. Istotnym czynnikiem jest jej poprawne ustawienie – koncentrycznie wraz z wiązką lasera. Zalecany jest dobór dyszy, o jak największym stosunku długości do średnicy. Zapewnia to laminarny przepływ gazu obróbkowego. Na jakość i precyzję obróbki wpływa odległość dyszy od obrabianego materiału. Zwykle ma ona wartość zbliżoną do średnicy dyszy, wynosi więc od 0,5 do 3,0 mm. Obie te wielkości są ściśle powiązane z gru-

bością materiału oraz są do siebie wprost proporcjonalne [1, 4].

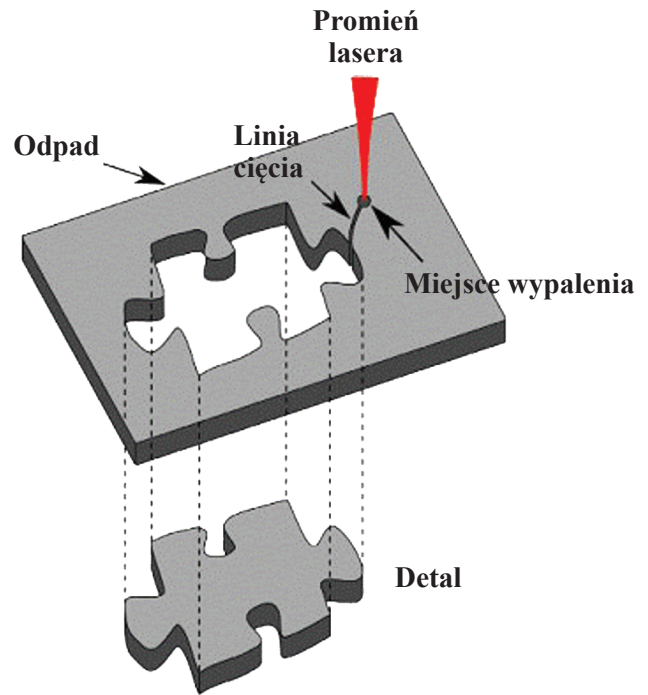
Kolejne parametry, które wpływają na efektywność cięcia to ogniskowa oraz moc wiązki. Ogniskowa decyduje o głębokości ogniska oraz średnicy wiązki. Dla metali o stosunkowo małej grubości – do 3,0 mm, zalecana jest ogniskowa rzędu

Nie ma za to takowych przez wymianę ciepła z otoczeniem lub jest ona pomijalnie mała. Następnie występuje etap intensywnego parowania ośrodka. Temperatura materiału znacznie wzrasta, co przekłada się na etap jego topienia, przy czym osiąga maksimum nie tuż przy powierzchni ($z=0$), a w pewnej od niej odległości. Gaz towarzyszący obróbce

Z uwagi na punktowy kontakt wiązki lasera z powierzchnią, podczas tworzenia się krateru, materiał wyrzucony jest w każdym dostępnym kierunku, co jest kolejnym powodem wyboru lokalizacji punktu wpalenia. Dodatkowo, z powodu prędkości cięcia, która w chwili przebicia wynosi $v_c=0$, następuje poszerzenie strefy wpływu ciepła



Rys. 2. Schemat wpalenia podczas cięcia laserem [3]



Rys. 3. Schemat przedstawiający przykładową lokalizację miejsca wpalenia w materiale [3]

65 mm, pozwalająca przyspieszyć proces cięcia automatycznie zwężając szczelinę. Dla grubości powyżej 10,0 mm zalecana długość ogniskowej to 200÷250 mm. Wzrastająca długość ogniskowej korzystnie wpływa na jakość krawędzi ciętej powierzchni. Natomiast moc wiązki podczas cięcia laserowego mieści się w przedziale 400÷6000 W i determinuje grubość ciętego materiału oraz prędkość procesu ciecienia [1, 6].

Ważnym elementem przy cięciu laserem jest miejsce rozpoczęcia cięcia, czyli punkt przebicia. Główne czynniki wpływające na czas przebicia materiału to długość wiązki oraz jej moc, a także rodzaj i ciśnienie gazu towarzyszącego procesowi. Podczas kontaktu z powierzchnią materiału, strumień częściowo jest odbijany lub pochłonięty przez metal, co jest powodem małych strat energetycznych.

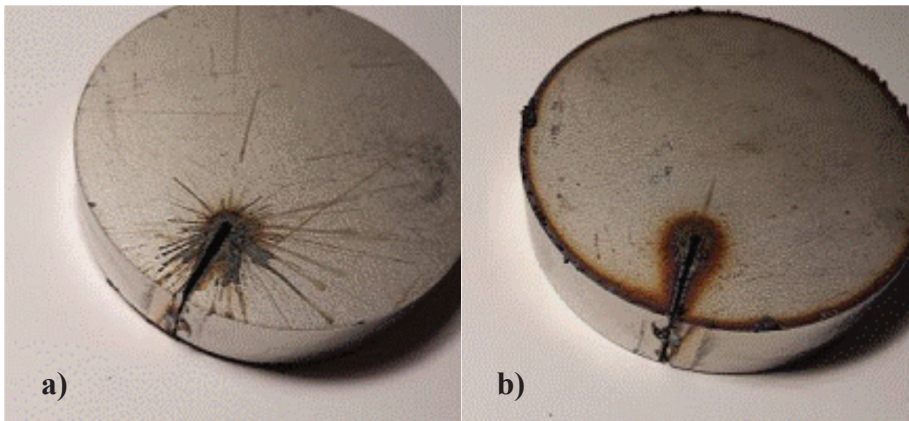
wyrzuca ciekły metal z miejsca przebicia, co przy termicznym charakterze obróbki należy nazwać miejscem wpalenia (rys. 2). Etapowi temu towarzyszy rozbrzyg wyrzuconego na powierzchnię materiału stopionego. Zjawisko to występuje do momentu całkowitego przecięcia materiału. Dopóki nie nastąpi całkowite przecięcie, stopiony materiał nie ma innego ujścia i jest wydmuchiwany przez doprowadzany do strefy obróbki gaz [1, 3].

Wiązka lasera nie przebija się przez materiał bezpośrednio na linii cięcia (rys. 3), ponieważ wpłynęłoby to na pogorszenie jakości powierzchni z uwagi na mechanizm wpalenia. Powstające rozpryski mogłyby przywierać do powierzchni. Dodatkowo znajdują się one na drodze pracy głowicy, a więc występuje ryzyko kolizji dyszy z resztkami wyrzuconego ze strefy wpalenia stopionego metalu.

(SWC), która jest szczególnie widoczna od spodu ciętego materiału (rys. 4). Jest ona zależna od grubości ciętego materiału, parametrów obróbkowych – głównie prędkości cięcia, oraz od kształtu elementu. Strefa ta uwidacznia się w narożach, przy znacznych nawrotach lub zmianach kierunku cięcia. Najbardziej jest jednak widoczna w miejscu wpalenia i wyjścia wiązki z linii cięcia kończącej proces. Jest to kolejny powód, dla którego ten początkowy etap cięcia powinien znajdować się poza obrysem detalu.

Na prędkość cięcia mają wpływ następujące czynniki:

- moc generowanej wiązki,
- rodzaj i grubość ciętego materiału,
- średnica dyszy.



Rys. 4. Punkt wpalenia wiązki lasera (a) oraz strefa wpływu ciepła (b)

Z racji wykorzystywanej przy cięciu energii cieplnej miejscami krytycznymi są nagłe zmiany kierunku ruchu wiązki, co prowadzi do chwilowego zmniejszenia prędkości cięcia. W miejscach takich zwiększa się SWC w materiale. Ze względu na ograniczoną moc wiązki przedział możliwych grubości blach ciętych to zwykle 1÷25 mm. Dodatkowym wyznacznikiem określającym efektywność obróbki jest parametr wydajności cięcia S . Bierze się w nim pod uwagę prędkość cięcia v , grubość materiału t , szerokość powstałej szczeliny k oraz chropowatość powierzchni R . Wielkości te powiązane są wzorem [1]:

$$S = v \cdot t \cdot k \cdot R \quad (1)$$

Obserwując powierzchnię po cięciu ze względu na jej jakość można zidentyfikować w niej trzy strefy (rys. 5).

Pierwsza strefa charakteryzuje się dobrą jakością. Powierzchnia jest jednolita

z typową dla tej obróbki fakturą. Wiązka lasera tnie materiał z dużą dokładnością. W głąb ciętego arkusza zauważalne jest przejście w strefę II. Wiąże się to najprawdopodobniej z długością ogniskowej – w ognisku następuje skumulowanie energii wiązki. Powoduje to znaczne pogorszenie jakości powierzchni – jest ona zdecydowanie bardziej chropowata. Występują podobne rysy obróbkowe jak w strefie I, lecz z większą częstością. W strefie III natomiast rysy te są bardzo zauważalne, a wykończenie powierzchni jest zdecydowanie najgorsze. Stopiony materiał wyrzucony przez towarzyszący gaz pogarsza jakość. Ciepła energia topnienia również się do tego przyczynia.

W celu uzyskania większej dokładności i precyzji cięcia laserem używa się foli pokrywającej powierzchnię ciętą, aby zmniejszyć współczynnik odbijania światła. Wiązka skupia się wtedy

głównie na punktowym miejscu cięcia, przy czym większość energii zużywana jest w samym procesie cięcia. Eliminuje się w ten sposób refleksyjność materiałów takich na przykład jak tytan.

Podsumowanie

Dzięki skupieniu wiązki oraz skondensowanej energii, technologia cięcia laserem zdecydowanie przewyższa pozostałe metody niekonwencjonalnego cięcia materiałów, przede wszystkim pod względem szybkości obróbki. Nawet przy dużej złożoności elementu czas cięcia jest bardzo krótki. Przedmiot wycięty laserem, mimo strefy wpływu ciepła oraz innych drobnych pozostałości obróbkowych, ma ostre krawędzie, dokładny kształt i dobrą jakość uzyskanej powierzchni. Uzyskana dokładność kształtowo-wymiarowa pozwala uniknąć dalszych procesów obróbkowych, szczególnie przy mniejszych grubościach ciętego materiału.

Literatura

[1] Borkowski P.J.: *Podstawy wysoko-ciśnieniowych technologii hydrostrumieniowych. Monografie – Politechnika Koszalińska*; nr 174, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2010.

[2] Klimpel A.: *Spawanie, zgrzewanie i cięcie metali*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2009.

[3] Pacorni J. i in.: *Dynamic laser piercing of thick section metals. Optics and Laser in Engineering*, Vol. 100, 2018.

[4] Pessoa D.F. i in.: *Influence of surface condition due to laser beam cutting on the fatigue behavior of metastable austenitic stainless steel AISI 304. Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 185, 2017.

[5] Styp-Rekowski M.: *Techniki wytwarzania skoncentrowaną wiązką energii – hybrydowe i niekonwencjonalne metody obróbki. Obróbka Metalu nr 2/2014*.

[6] Zimny J.: *Laserowa obróbka stali. Monografie – Politechnika Częstochowska*; nr 67, Wydaw. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1999. ■



Rys. 5. Powierzchnia po cięciu laserem