Andrzej Klimpel

Podstawy teoretyczne cięcia laserowego metali

Theoretical basis of laser cutting of metals

Streszczenie

Opisano podstawy techniczne oraz mechanizm procesu cięcia laserowego metali i techniki cięcia laserowego w stanie ciekłym metalu szczeliny, w stanie odparowanym oraz z wykorzystaniem ciepła reakcji egzotermicznej spalania metalu szczeliny cięcia. Podano teoretyczne zależności określające wpływ mocy wiązki laserowej, współczynnika absorpcji promieniowania laserowego oraz właściwości cieplno-fizycznych ciętego metalu na prędkość cięcia.

Abstract

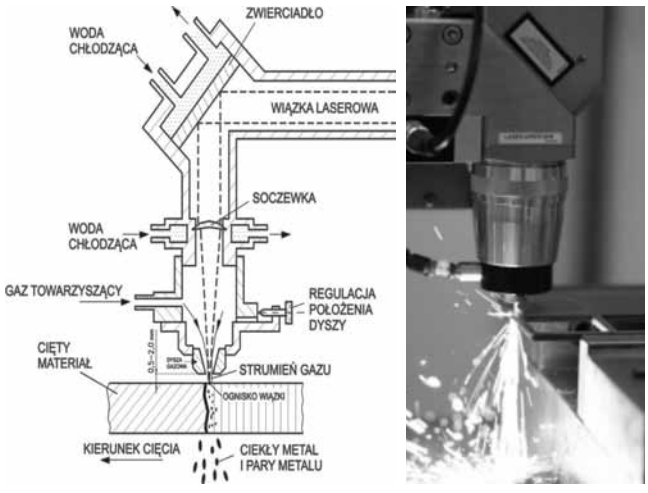
The paper presents theoretical basis and process mechanism of laser cutting of metals. Moreover, the technique of laser cutting of metals in liquid-tight, in fluid-tight and with exothermal heat reaction of burning metal in tight. The theoretical functions about energy density of laser beam, absorption coefficient and heat-mechanical properties of cut metal on the cutting velocity.

Wstęp

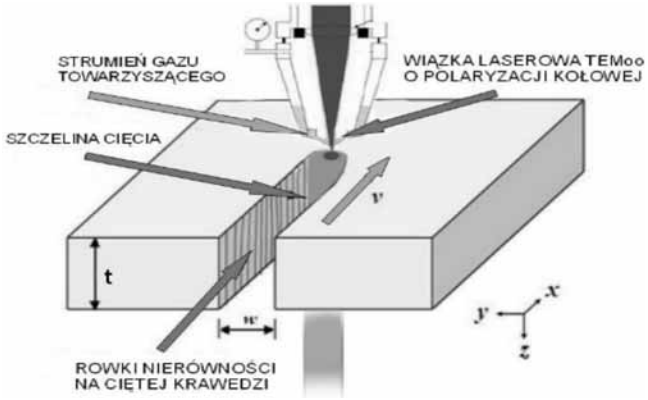
Cięcie laserowe jest procesem, w którym energia wiązki laserowej, ciągłej lub impulsowej powoduje stopienie ciętego materiału w szczelinie cięcia lub jednoczesne stopienie i odparowanie oraz stopienie i spalanie ciętego materiału: metalicznego, cermetalowego, ceramicznego czy tworzyw sztucznych, a nawet drewna [1÷19]. W procesie cięcia laserowego konieczny jest jednoczesny, współosiowy z wiązką laserową przepływ gazu, zwanego gazem towarzyszącym (ang. *assist gas* – gdyż „towarzyszy" procesowi cięcia), obojętnego lub reaktywnego chemicznie względem ciętego materiału, którego zadaniem jest wydmuchanie ze szczeliny cięcia powstałych produktów (ciekłego i odparowanego materiału), co przedstawiono na rysunkach 1 i 2. Cięcie laserowe jest stosowane również do przebijania otworów (perforacji, wiercenia) większości znanych materiałów inżynierskich. W stosunku do klasycznego procesu cięcia laserowego, przebijanie otworów wymaga ciągłego, impulsowego lub udarowego dostarczania energii wiązki laserowej, o znacznie większej gęstości mocy, w zakresie $10^4 \div 10^{11}$ W/mm^2 w zależności od rodzaju ciętego metalu [4÷9].

Prof. dr hab. inż. Andrzej Klimpel – Politechnika Śląska.

Pierwsze urządzenie emitujące koherentną i monochromatyczną wiązkę promieniowania elektromagnetycznego, której podstawy teoretyczne opisał Albert Einstein – LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), zbudował w 1960 r. dr T. H. Maiman, pompując światłem białym pręt z kryształu rubinu [1]. Dało to początek wszystkim nowoczesnym laserom na ciele stałym. Przemysł światowy produkuje obecnie urządzenia laserowe gazowe CO_2, lasery na ciele stałym Nd:YAG, Yb:YAG, Nd:YVO_4, lasery włóknowe Yb:YAG, lasery tarczowe Yb:YAG



Rys. 1. Schemat budowy głowicy laserowej do cięcia oraz widok procesu cięcia laserowego [7]
Fig. 1. Laser cutting head, cutting tight scheme and view of the cutting process [7]



Rys. 2. Schemat procesu cięcia laserowego; w – szerokość szczeliny cięcia, t – grubość ciętego przedmiotu, v – prędkość cięcia
Fig. 2. Laser cutting scheme; w – tight thickness, t – cut metal thickness, v – cutting velocity

(zwane również dyskowymi) oraz lasery półprzewodnikowymi (zwykle diodowe), o mocach wiązki laserowej udarowej lub ciągłej, dochodzących nawet do 90÷100 kW. Światowe ośrodki naukowe prowadzą intensywne prace badawcze nad budową laserów gazowych ekscymerowych oraz laserów na ciele stałym, emitujących wiązkę promieniowania laserowego w zakresie długości fal 440÷560 nm (światło niebieskie i światło zielone, tzw. *lasery niebieskie* i *zielone*) [7].

Pierwsze próby cięcia stali laserem gazowym CO_2 zademonstrowano już w 1967 r. [2, 3], a postęp w budowie urządzeń laserowych i badaniach technologii cięcia laserowego sprawił, że jest ona jedną z podstawowych technologii cięcia materiałów inżynierskich, zapewniających wysoką dokładność i jakość ciętych krawędzi o bardzo wąskiej SWC, często niewykrywalnej klasyczną metalografią.

Mechanizm cięcia laserowego

Jak już wspomniano, cięcie laserowe polega na bezpośrednim oddziaływaniu energii wiązki laserowej na obszar szczeliny cięcia (rys. 1 i 2). Procesowi stopienia i/lub odparowania metalu w szczelinie cięcia towarzyszyć musi jednoczesne oddziaływanie strumienia gazu współosiowego z wiązką laserową, którego zadaniem jest usunięcie ciekłego metalu i par metali ze szczeliny cięcia. Jeśli jako gaz towarzyszący zastosowany jest tlen, powietrze lub mieszanki gazów zawierających tlen, w szczelinie cięcia metalu dodatkowo zachodzi reakcja egzotermiczna spalania ciekłego metalu, zwiększająca energię cieplną procesu [7, 16÷19].

W celu nagrzania metalu w obszarze szczeliny cięcia do temperatury topnienia lub parowania wiązka laserowa musi dostarczyć wymaganą wartość energii, której część tracona jest w wyniku odprowadzania ciepła do ciętego przedmiotu, przez powierzchnię ciętych krawędzi. Gdy zogniskowana wiązka laserowa o dużej gęstości mocy uderza w powierzchnię ciętego metalu, część energii jest absorbowana, a część ulega odbiciu. Energia fotonów (kwantów promieniowania) wiązki laserowej absorbowana jest przez wolne elektrony chmury elektronowej otaczającej jądra atomów metalu (zjawisko znane jako odwrotne promieniowanie hamowania). Elektrony pod wpływem zaabsorbowanej energii fotonów przechodzą w stan wymuszonych drgań, który wyraża się w postaci energii cieplnej. Gdy dostarczona jest wymagana wartość energii kwantów promieniowania laserowego, drgania cieplne elektronów są tak intensywne, że następuje taki spadek siły wiązań cząsteczkowych metalu, iż metal ze stanu stałego przechodzi w stan ciekły. W przypadku dalszego wzrostu energii promieniowania laserowego zwiększa się znacznie energia drgań elektronów metalu,

Tablica. Temperatura topnienia i wrzenia, gęstość właściwa, przewodność cieplna właściwa różnych materiałów metalowych
Table. Melting and boiling temperature, metal density, heat transfer coefficient for different metals

Rodzaj metalu	Gęstość właściwa g/cm^3	Temperatura topnienia °C	Temperatura wrzenia °C	Przewodność cieplna właściwa W/(m·K)
Magnez	1,7	650	1105	154,8
Aluminium	2,7	660	2450	238,5
Cynk	7,13	419,5	906	113
Srebro	10,5	961	1761	418,4
Miedź	8,9	1083	2600	393,3
Beryl	1,8	1277	2770	201
Nikiel	8,9	1453	2730	92,1
Chrom	7,19	1875	2680	67
Kobalt	8,91	1495	2900	69
Mangan	7,43	1246	2065	7,79
Żelazo	7,9	1553	3030	75,3
Tytan	4,5	1668	3260	18,9
Cyrkon	6,4	1857	3580	225,9
Wanad	6,1	1860	3350	29,2
Niob	8,57	2468	4927	53,7
Molibden	10,22	2610	5550	142,6
Tantal	16,65	2996	5400	57,5
Wolfram	19,3	3410	5900	167,4
Stal niskowęglowa	7,8	1490÷1520	3050*	71,1
Stal wysokowęglowa	7,8	1380÷1490	3050*	66,9
Stal martenzytyczna 13% Cr	7,8	1425÷1530	3100*	28,7
Stal ferrytyczna 25% Cr	7,8	1425÷1530	3200*	24,4÷26,3
Stal austenityczna	7,8÷8,0	1400÷1450	3200*	18,7÷22,8
Stal dupleks	7,8÷8,0	1430÷1450	3100*	16,2÷19,0
* wartości przybliżone zależne od rzeczywistego składu chemicznego stali				

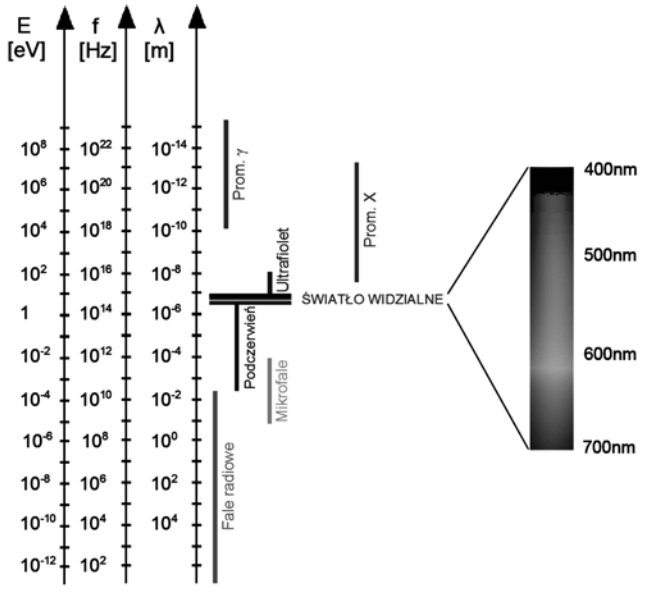
prowadząca do takiego spadku siły wiązań cząsteczkowych, że metal ze stanu ciekłego przechodzi w stan gazowy (ulega odparowaniu – tabl.).

Absorpcja energii promieniowania laserowego na powierzchni ciętego metalu jest określana jako stosunek pochłoniętej przez metal mocy wiązki laserowej do mocy wiązki padającej na powierzchnię metalu. Dla materiałów nieprzezroczystych, takich jak metale, absorpcja A jest określana jako A = 1 – R, gdzie R jest współczynnikiem odbicia powierzchni metalu. Absorpcja (współczynnik absorpcji) promieniowania laserowego jest zależna od długości fali promieniowania, kąta padania promieniowania, polaryzacji wiązki laserowej, temperatury powierzchni metalu i stanu fazowego metalu [7÷11]. Absorpcja metali zwiększa się w kierunku promieniowania widzialnego i ultrafioletowego (rys. 3).

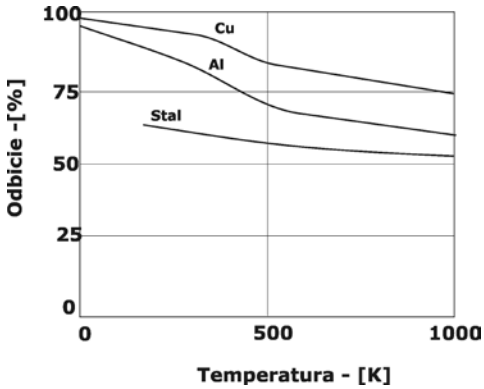
Jeśli wiązka laserowa pada pod kątem prostym do ciętej powierzchni metalu, współczynnik absorpcji jest równy dla polaryzacji równoległej i poprzecznej. Pochylenie wiązki laserowej względem powierzchni metalu sprawia, że spada współczynnik odbicia wiązki o polaryzacji równoległej, a wzrasta dla polaryzacji poprzecznej. Współczynnik absorpcji promieniowania wzrasta wraz z temperaturą metalu i wynosi ok. 100%, gdy metal jest w postaci pary (rys. 4 i 5).

Proces cięcia laserowego rozpoczyna się od przebicia ciętego przedmiotu i utworzenia kanału parowego – oczka o ściankach pokrytych ciekłym metalem i wypełnionym parami metalu. Ten etap procesu cięcia zależy w dużym stopniu od współczynnika odbicia ciętego metalu. Aluminium i miedź cechują się wysokim współczynnikiem odbicia i wymagają znacznie wyższej mocy wiązki do rozpoczęcia procesu cięcia laserowego (rys. 5).

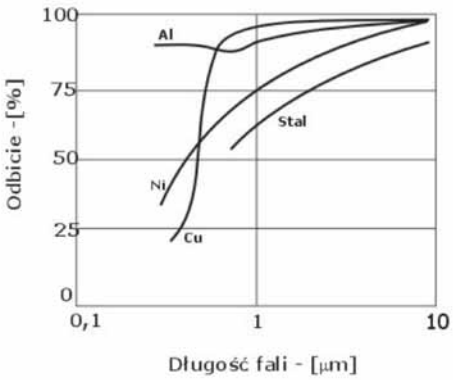
Po utworzenia oczka szczeliny cięcia, o głębokości równej grubości ciętego materiału, wiązka laserowa działa jako liniowe źródło energii cięcia, przetapiające i odparowujące cięty materiał na całej grubości (rys. 2). Tak więc proces cięcia odbywa się w wyniku absorpcji energii wiązki laserowej w oczku szczeliny cięcia wypełnionym parami ciętego metalu, o ściankach pokrytych cienką warstwą ciekłego metalu, utrzymywanego siłami napięcia powierzchniowego i zjawiska kapilarnego. Front cięcia przesuwa się wzdłuż toru cięcia, z prędkością zależną od energii liniowej wiązki laserowej, właściwości cieplno-fizycznych ciętego metalu i mechanizmu usuwania par metalu i ciekłego metalu z oczka. W procesie cięcia laserowego ważna jest polaryzacja wiązki, decydująca o jego sprawności. W zależności od konstrukcji lasera możliwa jest polaryzacja liniowa, eliptyczna, kołowa i losowa. Przy polaryzacjach liniowej i eliptycznej sprawność procesu cięcia jest największa, lecz jego jakość jest najwyższa wówczas, gdy kierunek polaryzacji jest zgodny z kierunkiem cięcia. Polaryzacja kołowa zapewnia jednakową jakość cięcia w każdym kierunku, lecz jego sprawność spada nawet do 40% w stosunku do polaryzacji liniowej i jest zalecana szczególnie przy cięciu metali z tlenem jako gazem towarzyszącym [4, 7].



Rys. 3. Zakres energii – E, eV; częstotliwości – f, Hz; długości znanych fal elektromagnetycznych λ, m [7]
Fig. 3. Range of energy – E, eV; frequency – f, Hz; the electromagnetic wave length λ, m [7]



Rys. 4. Wpływ temperatury powierzchni przedmiotów metalowych ze stali, Al i Cu na odbicie energii wiązki laserowej lasera Nd:YAG o długości fali λ = 1,06 μm [7]
Fig. 4. Influence of steel, Al and Cu surface temperature on Nd:YAG laser beam length λ = 1,06 μm [7]



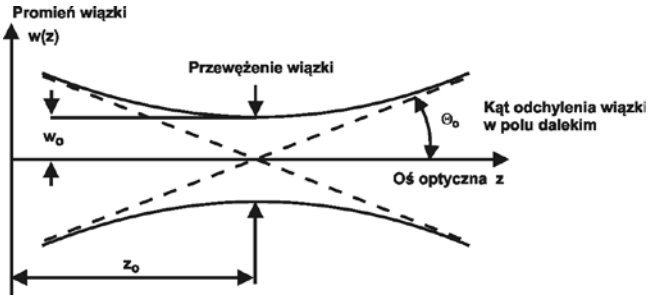
Rys. 5. Wpływ długości fali promieniowania laserowego na absorpcję energii wiązki laserowej na powierzchni przedmiotów metalowych ze stali, Ni, Al i Cu [7]
Fig. 5. Laser beam length influence on energy absorption by surface of metals: steel, Ni, Al and Cu [7]

O jakości cięcia decyduje głównie jakość wiązki laserowej, określona *współczynnikiem jakości BPP* (ang. *Beam Parameter Product*, wzór (1)), który w zależności od rodzaju materiału i grubości ciętego czy przebijanego przedmiotu powinien mieścić się w granicach od 0,1 do 5÷10. Im mniejsza jest wartość współczynnika jakości wiązki laserowej BPP, tym wyższa jest jakość wiązki laserowej. Tak więc wiązka laserowa o idealnej jakości, czyli stałej średnicy na całej długości wiązki, ma współczynnik BPP = 0,0, gdyż wtedy jej kąt odchylenia w polu dalekim wynosi Θ_o = 0,0. Im niższa jest jakość wiązki (większa rozbieżność), tym współczynnik jakości BPP jest większy. W praktyce współczynnik jakości BPP produkowanych obecnie laserów dużej mocy mieści się w granicach od ok. 0,3 do 25 mm·mrad, a wiązkę laserową uznaje się za wiązkę o bardzo wysokiej jakości, gdy BPP < 5,0. W przypadku laserów włóknowych i tarczowych osiągane są wyniki na poziomie min. 0,3 mm·mrad. Wartość współczynnika jakości BPP równa 1,0 mm·mrad równoważna jest kątowi odchylenia wiązki laserowej 0,057°, przy minimalnej średnicy wiązki 1,0 mm [7].

Im mniejsza jest grubość cięcia czy przebijania metalu i im wyższa jest jego temperatura topnienia, tym wyższa musi być jakość wiązki BPP. Do cięcia laserowego zalecany jest podstawowy, jednomodowy (gaussowski) rozkład mocy wiązki laserowej – TEM_{00}, który zapewnia możliwość zogniskowania wiązki laserowej do jak najmniejszej średnicy i największych głębokości (najmniejszej zmiany mocy wiązki na jej długości). Zdolność ogniskowania wiązki i jej stabilność są szczególnie ważne przy cięciu profilowym cienkich blach ze stali węglowych o grubości do 3,2 mm [8, 15].

$$BPP = w_o \cdot \Theta_o = \frac{\lambda}{K \cdot \pi} = \frac{M^2 \cdot \lambda}{\pi} \text{ mm·mrad} \qquad (1)$$

gdzie: w_o – promień przewężenia wiązki laserowej (wymiary ogniska), Θ_o – kąt odchylenia wiązki laserowej w polu dalekim, K – współczynnik propagacji wiązki laserowej, M^2 – w spółczynnik wielokrotności ograniczonej dyfrakcji, λ – długość fali promieniowania laserowego (rys. 6).



Rys. 6. Parametry wiązki laserowej o przekroju kołowym symetrycznym, gdzie: z_o – położenie przewężenia wiązki laserowej (ogniska), w_o – promień przewężenia wiązki laserowej (wymiary ogniska), Θ_o – kąt odchylenia wiązki laserowej w polu dalekim [7]
Fig. 6. Laser beam parameters with symmetrical round cross-section, where z_o – the placement of beam focusing point, w_o – radius of focusing point (dimensions of focusing point), Θ_o – laser beam angle in far field

Techniki cięcia laserowego metali

W zależności od warunków technologicznych cięcia laserowego, a głównie mocy i jakości wiązki laserowej, prędkości cięcia i rodzaju gazu towarzyszącego, cięcie laserowe może być prowadzone trzema różnymi technikami [4÷12]:
– techniką cięcia w stanie ciekłym metalu szczeliny cięcia,
– techniką cięcia z odparowaniem metalu szczeliny cięcia,
– techniką cięcia reaktywnego (egzotermicznego) w stanie ciekłym metalu szczeliny cięcia.

Cięcie laserowe metali w stanie ciekłym polega na doprowadzeniu metalu szczeliny cięcia do stanu ciekłego energią silnie zogniskowanej wiązki laserowej i wydmuchaniu ciekłego metalu strumieniem gazu obojętnego o dużym ciśnieniu. Przyjmując, że cała zaabsorbowana energia kwantów promieniowania wykorzystana zostanie wyłącznie do stopienia metalu w szczelinie cięcia, bilans cieplny procesu cięcia laserowego można opisać równaniem:

$$A \cdot P = w \cdot t \cdot p \, [Cp \cdot \Delta T + L_m] \qquad (2)$$

lub też po przekształceniu:

$$\frac{P}{t \cdot V} = \frac{w \cdot \rho}{A} [C_p \cdot \Delta T + L_m] \qquad (3)$$

gdzie: P – moc wiązki laserowej, A – współczynnik absorpcji promieniowania laserowego, w – szerokość szczeliny cięcia, t – grubość ciętego przedmiotu, V – prędkość cięcia, ρ – gęstość ciętego metalu, C_P – ciepło właściwe ciętego metalu, ΔT – różnica temperatury ciętego przedmiotu i jego temperatury topnienia, L_m – utajone ciepło topnienia.

W równaniu (2) właściwości cieplno-fizyczne ciętego metalu są stałe, natomiast szczelina cięcia – w (zależna od średnicy wiązki laserowej i prędkości cięcia) oraz współczynnik absorpcji promieniowania laserowego – A, są zależne od właściwości wiązki laserowej zastosowanej w procesie cięcia. W efekcie energia liniowa cięcia laserowego przedmiotu o grubości t jest stała. Oznacza to, że zwiększenie prędkości cięcia – V lub zmniejszenie wymaganej mocy wiązki laserowej – P, możliwe jest tylko przez zwiększenie współczynnika absorpcji – A i/lub podgrzanie wstępne ciętego metalu, czyli zmniejszenie ΔT (rys. 4 i 5).

Cięcie laserowe techniką w stanie ciekłym metalu szczeliny cięcia stosowane jest głównie do stali wysokostopowych, nadstopów niklu, stopów kobaltu, stopów tytanu oraz stopów aluminium i magnezu, z wykorzystaniem jako gazu towarzyszącego azotu lub argonu. Cięte krawędzie są wtedy czyste metalicznie, wolne od tlenków i nie wymagają żadnych dodatkowych operacji czyszczenia. Natomiast, gdy gazem towarzyszącym jest tlen lub powietrze, prędkości cięcia

są wyraźnie wyższe, lecz znacznie spada jakość ciętych krawędzi, pokrytych często trudną do usunięcia warstwą tlenków.

Cięcie laserowe techniką z odparowaniem metalu szczeliny cięcia polega na zastosowaniu wiązki laserowej o wysokiej gęstości, która powoduje bardzo szybkie nagrzanie metalu w obszarze szczeliny cięcia do temperatury wrzenia i utworzenie oczka o głębokości i średnicy zależnej od parametrów wiązki laserowej (tabl.). Oczko to, wypełnione parami ciętego metalu, znacznie zwiększa współczynnik absorpcji promieniowania laserowego, w wyniku wielokrotnych odbić od jego ścianek, prowadząc do szybkiego zwiększenia głębokości oczka i całkowitego przebicia ciętego przedmiotu. Wytworzona para metalu ulatnia się z oczka i jednocześnie indukuje ciśnienie odrzutu, które wspomaga usuwanie ciekłego metalu ze ścianek szczeliny cięcia. Przyjmując, że straty ciepła na przewodzenie są pomijalne, można obliczyć prędkość penetracji ciętego przedmiotu – v (prędkość tworzenia oczka cięcia) ze wzoru:

$$v = \frac{F_o}{\rho\left[Lm + Lv + Cp\left(Tv - To\right)\right]} \qquad (4)$$

gdzie: $F_o = \frac{A \cdot P}{w \cdot t}$ – zaabsorbowana gęstość mocy wiązki laserowej, A – współczynnik absorpcji promieniowania laserowego, P – moc wiązki laserowej, w – szerokość szczeliny cięcia, t – grubość ciętego przedmiotu, ρ – gęstość ciętego metalu, C_P – ciepło właściwe ciętego metalu, L_m – utajone ciepło topnienia, L_v – utajone ciepło parowania, T_v – temperatura parowania, T_o – początkowa temperatura ciętego przedmiotu.

Zwiększenie prędkości penetracji ciętego przedmiotu metalowego przez wiązkę laserową o określonej mocy – P, czyli utworzenie kanału gazodynamicznego cięcia, możliwe jest w wyniku zwiększenia współczynnika absorpcji promieniowania i/lub zwiększenia temperatury początkowej ciętego przedmiotu – T_o, podobnie jak w technice cięcia w stanie ciekłym metalu szczeliny cięcia. Cięcie laserowe techniką z odparowaniem metalu szczeliny cięcia wymaga bardzo dużych gęstości mocy wiązki laserowej o wysokiej jakości BPP < 5,0 i zalecane jest do cięcia przedmiotów metalowych o grubości poniżej 1,0 mm, gdyż straty wynikające z odprowadzania ciepła do ciętych przedmiotów są wtedy pomijalne. Odprowadzanie ciepła wzrasta ze wzrostem grubości ciętych przedmiotów i wtedy wymagane są bardzo duże gęstości mocy wiązki laserowej, w celu kompensacji strat energii cięcia, tym wyższe, im większa jest grubość i przewodność cieplna ciętego metalu (tabl.). Zastosowanie do cięcia laserowego przedmiotów metalowych o grubości powyżej 5,0÷10,0 mm wiązki laserowej o gęstości mocy powyżej $10^6 \div 10^7$ W/mm^2 zapewnia, że cięcie przebiega z jednoczesnym odparowaniem i topieniem metalu szczeliny cięcia i tylko część metalu usuwana jest w stanie ciekłym. Im wyższy jest współczynnik przewodnictwa cieplnego metalu i niższy współczynnik absorpcji promieniowania laserowego – A, tym większa wymagana jest gęstość mocy wiązki laserowej.

Cięcie laserowe techniką z wykorzystaniem ciepła reakcji egzotermicznej: tlen i cięty metal polega na zastosowaniu jako gazu towarzyszącego czystego tlenu, powietrza lub mieszanek argonu i tlenu. W efekcie strumień gazu towarzyszącego wiązce laserowej spełnia podwójną rolę; usuwa ciekły metal i pary metalu ze szczeliny cięcia i jednocześnie wchodzi w reakcję egzotermiczną z ciekłym metalem pokrywającym ścianki oczka, zapewniając dodatkową energię cieplną. Ciepło reakcji egzotermicznej spalania zapewnia większe prędkości cięcia laserowego w stosunku do procesu cięcia z obojętnym gazem towarzyszącym, np. azotem czy argonem. Wartość dodatkowej energii cieplnej wydzielanej w szczelinie cięcia laserowego, w wyniku reakcji egzotermicznej, zależy od składu chemicznego ciętego metalu. W przypadku stali niestopowych, stopowych i wysokostopowych jest to ok. 60% energii cięcia, natomiast w przypadku metali reaktywnych, np. tytanu, wartość dodatkowej energii cieplnej może osiągać wartość 90% [4, 5, 8]. Technika ta jest zalecana do cięcia z dużymi prędkościami stali stopowych, wysokostopowych, stopów niklu, stopów miedzi i stopów tytanu, zwłaszcza gdy dopuszczalna jest obecność warstwy tlenków na ciętych krawędziach [4, 5, 7].

Podsumowanie

Technologia cięcia laserowego jest jedną z podstawowych technologii cięcia termicznego elementów wykonanych w zasadzie ze wszystkich materiałów inżynierskich. Jednym z ważnych warunków technologicznych i produkcyjnych procesów spawania, zgrzewania i lutowania jest przygotowanie łączonych elementów, decydujące o jakości złączy, tak ze względów geometrycznych, jak i metalurgicznych. W przypadku nowoczesnych technologii spawania konstrukcji ze stali o wysokiej granicy plastyczności, prowadzonych głównie na stanowiskach automatycznych lub zrobotyzowanych, nierówności ciętych krawędzi lub zanieczyszczenia na ich powierzchni mogą powodować tworzenie się wad typu przyklejenia, braki przetopu, wtrącenia niemetaliczne czy nawet pęcherze gazowe. Poprawnie dobrane parametry cięcia laserowego gwarantują wysoką dokładność cięcia oraz metalicznie czystą powierzchnię krawędzi, eliminując konieczność dodatkowej obróbki. Wysoką ekonomiczność procesu cięcia laserowego zapewniają również duże prędkości cięcia, nieosiągalne w technologiach cięcia

plazmowego, cięcia strumieniem wody czy cięcia tlenem [4, 20]. Wybór urządzeń laserowych do cięcia określonego rodzaju materiału, jest oparty głównie na kryteriach ekonomicznych jako że podstawowymi parametrami nowoczesnych procesów produkcji są: prędkość cięcia, wysoka jakość ciętych krawędzi (eliminująca potrzebę dalszej obróbki) oraz duża powtarzalność wyników [7].

Zależności cieplno-fizyczne trzech podstawowych technik cięcia laserowego wskazują jednoznacznie, że w celu zapewnienia najwyższej prędkości cięcia danego metalu i jednocześnie wysokiej jakości ciętych krawędzi konieczne jest zastosowanie:

– źródła promieniowania o możliwie najwyższej jakości wiązki laserowej, BPP < 5,0, rozkładzie energii wiązki typu TEM_{00} i polaryzacji kołowej, o długości fali zapewniającej możliwie najwyższy współczynnik absorpcji promieniowania (w przypadku stali zalecane są lasery na ciele stałym, wzory 1÷4),
– techniki cięcia laserowego z odparowaniem metalu szczeliny cięcia, szczególnie w przypadku metali o niskim współczynniku przewodnictwa cieplnego i niskiej temperaturze topnienia i parowania,
– gdy na ciętych krawędziach dopuszczalna jest warstewka tlenków – techniki cięcia reaktywnego, z tlenem lub powietrzem.

Literatura

[1] Maiman T. H.: Stimulated Optical Radiation in Ruby. Nature, 1960, 187 (4736), 493-494.
[2] Houldcroft P.: Gas-jet laser cutting. British Welding Journal, August 1967, s. 443.
[3] Hilton P. A.: The early days of laser cutting. Proc. 11th Nordic Laser Materials Processing Conference, NOLAMP 2007 (August 20-22), Lappeenranta, Finland, 1-10.
[4] Steen W. M.: Laser Material Processing, 3rd ed. 2003, Springer-Verlag, London.
[5] Ion J.C.: Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application. Elsevier Butterwort-Heinemann, 2005.
[6] Olsen F.O.: Fundamental mechanisms of cutting front formation in laser cutting. Proc. SPIE, 1994, no. 2207, 235-247.
[7] Klimpel A.: Technologie laserowe w spawalnictwie. Wyd. Pol. Śląskiej, 2011.
[8] Wandera C., Kujanpää V., Salminen A.: Laser Power Requirement for Cutting of Thick-Section Steel And Effects of Processing Parameters on Mild Steel Cut Quality. Proceedings IMechE Part B, Journal of Engineering Manufacture, Vol. 225, 2011.
[9] Karatas C., Keles O., Uslan I., Usta Y.: Laser cutting of steel sheets: Influence of workpiece thickness and beam waist position on kerf size and stria formation. Journal of Materials Processing Technology, no. 172, 2006, 22–29.
[10] Sparkes M., Gross M., Celotto S., Zhang T. and O'Neill W.: Practical and theoretical investigations into inert gas cutting of 304 stainless steel using a high brightness fiber laser. Journal of Laser Applications, 2008, no. 20 (1), 59-67.
[11] Mahrle A., Bartels F. and Beyer E.: Theoretical aspects of the process efficiency in laser beam cutting with fiber lasers. Proc. 27th Int. Congress on Applications of Lasers and Electro Optics, ICALEO 2008 (October 20-23), Temecula, California, USA, 2006, 703-712.
[12] Duan J., Man H.C. and Yue T.M.: Modeling the laser fusion cutting process: I. Mathematical modelling of the cut kerf geometry for laser fusion cutting of thick metal. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, no. 34 (14), 2127-2134.
[13] Abdel Ghany K., Newishy M.: Cutting of 1.2 mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd:YAG laser. Journal of Materials Processing Technology, no. 168 (2005), 438-447.
[14] Thawari G., Sarin Sundar J.K., Sundararajan G., Joshi S.V.: Influence of process parameters during pulsed Nd:YAG laser cutting of nickel-base superalloys. Journal of Materials Processing Technology, no. 170, 2005, 229-239.
[15] Rajaram N., Sheikh-Ahmad J., Cheraghi S.H.: CO_2 laser cut quality of 4130 steel. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2003, no. 43, 351-358.
[16] O'Neill W., Gabzdyl J.T.: New developments in laser-assisted oxygen cutting. Optics and Lasers in Engineering. 2000, no. 34, 355-367.
[17] Zaytsev A.V., Kovalev O.B., Malikov A.G., Orishich A.M.: Shulyat'ev V.B. Laser cutting of thick steel sheets using supersonic oxygen jets. Quantum Electronics. 2007, no. 37 (9), 891-892.
[18] Yilbas B.S.: Laser cutting of thick sheet metals: Effects of cutting parameters on kerf size variations. Journal of Materials Processing Technology. 2008, no. 201, 285-290.
[19] Al-Mashikhi S.O., Powell J., Kaplan A.F.H., Voisey K.T.: An explanation of 'striation free' cutting of mild steel by fibre laser. Proceedings of the Fifth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing 2009, Munich, June 2009.
[20] Zheng H.Y., et al.: Quality and Cost Comparisons between Laser and Water Jet Cutting. Journal of Materials Processing Technology. no. 62, 1996, s. 294-298.

przegląd SPAWALNICTWA
Welding Technology Review