

Agnieszka Twardowska

Lasery technologiczne przeznaczone do spawania

Jednym z pierwszych doświadczeń przeprowadzonych z użyciem lasera było zogniskowanie wiązki za pomocą zwykłej soczewki na próbce metalu i wypaleniu w niej serii otworów [1]. Jednakże nowa technologia nie mogła początkowo skutecznie konkurować z technologiami konwencjonalnymi ze względu na wysokie koszty ówczesnych urządzeń oraz ich eksploatacji, oraz niską trwałość pierwszych obrabiarek laserowych – dlatego też przemysłowe linie technologiczne wykorzystujące urządzenia laserowe do obróbki materiałów pojawiły się ze znacznym opóźnieniem. Obecnie lasery i procesy z użyciem wiązki laserowej stały się przemysłową praktyką.

Zakres zastosowań laserów w procesach obróbki materiałów jest bardzo szeroki. Obejmuje procesy obróbki powierzchniowej, jak również cięcia i spajania. Technologie laserowe umożliwiają [2]:

- zlokalizowanie bardzo dużej ilości energii na niewielkiej powierzchni [3],
- możliwość transmisji wiązki laserowej na dowolny dystans przez atmosferę bez wyraźnego jej tłumienia czy optycznej degradacji,
- czystość, precyzję,
- szybki start i zatrzymanie procesu dzięki temu, że światło daje się łatwo skupić i nie wykazuje bezwładności,
- duże prędkości,
- łatwość kontroli i automatyzacji procesu.

Lasery technologiczne przeznaczone do spawania

Rodzaj ośrodka czynnego

Ze względu na rodzaj ośrodka czynnego lasery przeznaczone do przemysłowego spawania dzielą się na dwie grupy: lasery na ciele stałym, w których ośrodkiem aktywnym są najczęściej jony neodymu (Nd^{+++}), stanowiące domieszkę w szkłe bądź kryształach $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG), emitujące promieniowanie o długości fali $\lambda=1,06 \mu m$ oraz lasery gazowe, w których substancją aktywną są cząsteczki dwutlenku węgla, emitujące promieniowanie o długości fali $\lambda=10,6 \mu m$. Ponieważ energia promieniowania laserów na ciele stałym jest lepiej absorbowana przez metale, zastosowanie

laserów Nd:YAG jest korzystniejsze, dodatkową zaletą tych laserów jest możliwość doprowadzenia wiązki do obszaru spawania za pomocą giętkich przewodów światłowodowych.

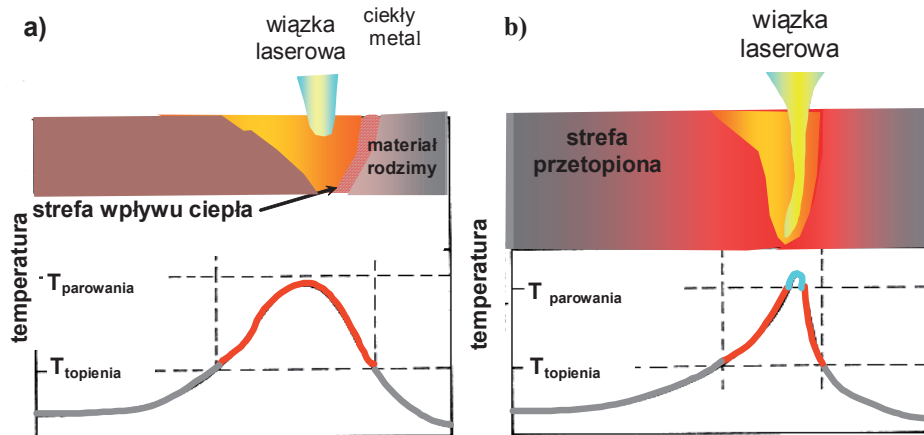
Tryb pracy

Zarówno lasery Nd:YAG jak i lasery CO₂ mogą działać zarówno impulsowo, jak i w sposób ciągły. Lasery o działaniu impulsowym (głównie lasery na ciele stałym) służą do wykonywania spoin punktowych w elektronice, w produkcji przyrządów półprzewodnikowych, układów mikroelektronicznych, lamp elektronowych i innych miniaturowych podzespołów elektronicznych, gdzie obowiązuje bardzo duża precyzja (np. przy łączeniu wyprowadzeń o średnicy kilku mikronów [4]) i niezwykle ważne jest uniknięcie niebezpieczeństwa termicznego uszkodzenia struktury elementu w bezpośrednim sąsiedztwie spoiny.

Lasery pracy ciągłej są wykorzystywane do wykonywania spoin liniowych, co wymaga uzyskania gęstości energii rzędu 10⁶–10⁹ W/cm². Z tego powodu w przemyśle najczęściej stosowane są lasery CO₂, ponieważ do 1995 roku urządzenia z laserami Nd:YAG nie uzyskiwały mocy powyżej 500 W [5, 6].

W zależności od ilości energii dostarczanej na jednostkę powierzchni, spawanie laserowe wiązką o działaniu ciągłym może być realizowane jako [7]:

- spawanie limitowane przewodnictwem temperaturowym materiału,
- spawanie w warunkach głębokiej penetracji wiązki.



Ryc. 1. Schemat spawania laserowego [na podst. 7]: a – spawanie limitowane przewodnictwem cieplnym spawanego materiału, b – spawanie w warunkach głębokiej penetracji wiązki (spawanie z wytworzeniem kanału parowego)

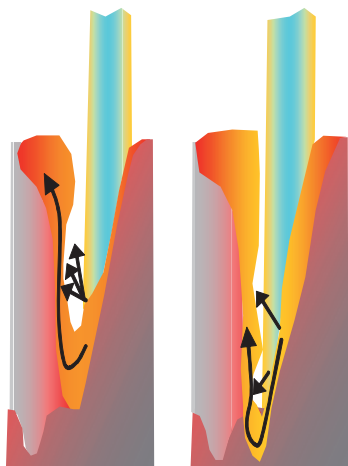
W przypadku laserowego spawania limitowanego przewodnictwem cieplnym spawanego materiału (ryc. 1a), analogicznie jak w większości konwencjonalnych procesów spawania materiałów, energia dostarczona jest do powierzchni materiału, a następnie poprzez tą powierzchnię przekazywana jest do wnętrza na drodze przewodnictwa cieplnego. Proces prowadzi do utworzenia na powierzchni spawanych elementów jeziora spawalniczego, które stanowi objętościowe źródło ciepła

przemieszczające się wraz z wiązką laserową. Ponieważ energia potrzebna do przetopienia głębszych warstw materiału przekazywana jest na drodze przewodnictwa cieplnego, głębokość wykonanej w ten sposób spoiny uzależniona jest od głębokości, na jaką docierające ze zrozumiałymi stratami ciepło zdolne jest roztopić materiał. Proces laserowego spawania przewodnościowego wymaga zastosowania laserów o mocy nominalnej do 1 kW.

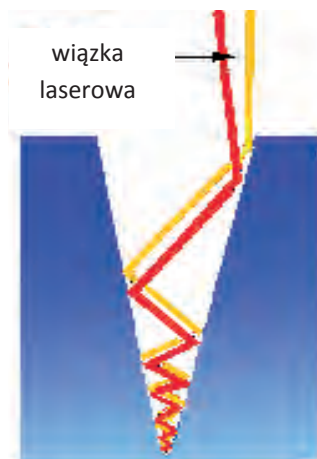
Spawanie w warunkach głębokiej penetracji wiązki (ryc. 1b) jest określane jako spawanie z oczkiem [5], albo jako spawanie z wytworzeniem kanału parowego i przebiega bardzo podobnie jak spawanie z użyciem wiązki elektronów [2]. Ten sposób spawania laserowego prowadzony przy użyciu laserów o mocy nominalnej powyżej 1 kW, gdyż wymaga dostarczenia do powierzchni materiału energii rzędu 10^6 – 10^9 W/cm² [8]. Tak wysokie gęstości energii powodują stopienie, jak również parowanie materiału z powierzchni łączonych elementów. Powstałe pary silnie absorbują energię wiązki laserowej, w wyniku czego jonizują się, tworząc plazmę, której ciśnienie stopniowo wzrasta. Gdy ciśnienie to stanie się większe od ciśnienia stopionego materiału, ciecz wypierana jest ze strefy parowania, a na powierzchni jeziorzka spawalniczego tworzy się zagłębienie. Wiązka laserowa zaczyna naświetlać głębiej położone warstwy materiału, a front parowania przesuwa się niżej. Jeżeli ilość energii wiązki laserowej jest wystarczająco wysoka, utworzone zagłębienie wypełnia się parami metalu i wzrasta sukcesywnie, drażąc strefę stopioną i przekształcając się ostatecznie w kanał parowy (ryc. 2).

Energia wiązki laserowej wnika do wnętrza kanału parowego jest częściowo odbijana, a częściowo absorbowana przez materiał znajdujący się na wewnętrznych ściankach kanału. Absorpcja energii następuje głównie dzięki ogniskowaniu odbiciowemu wiązki określanemu jako zjawisku Fresnela (ryc. 3). Polega ono na wielokrotnym odbijaniu się promieniowania laserowego od ścianek kanału, przy czym każdemu odbiciu towarzyszy jednoczesna absorpcja części energii wiązki przez materiał tworzący ścianki oraz przez pary metaliczne, wypełniające kanał.

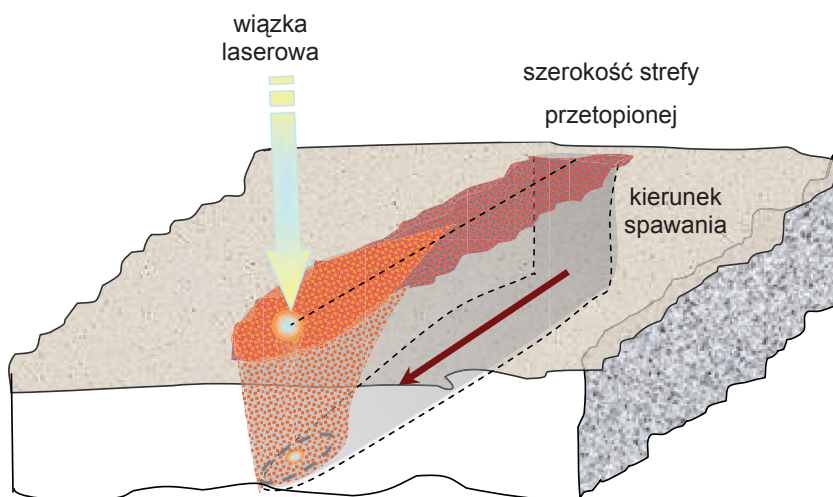
W wyniku odbijania i absorbowania promieniowania laserowego następuje nagrzewanie materiału tworzącego ścianki kanału do temperatury bliskiej, a nawet przewyższającej temperaturę wrzenia spawanego materiału. Dalszy wpływ ciepła powoduje częściową jonizację odparowanego materiału i utworzenie się plazmy. Ze względu na wysoką temperaturę wewnątrz i na ściankach kanału, materiał otaczający kanał ulega nadtopieniu. Roztopiony materiał nie zalewa kanału podczas spawania, jeśli zachowana jest równowaga między ciśnieniem par znajdujących się wewnątrz kanału a sumą napięcia powierzchniowego i ciśnienia hydrodynamicznego cieczy znajdującej się na jego ściankach. Ruch wiązki powoduje przemieszczanie się kanału parowego zgodnie z kierunkiem spawania. Kanał parowy jest naświetlany niesymetrycznie. Wiązka pada głównie na przednią ścianę kanału (ryc. 2). Stopiony materiał przepływa wzdłuż bocznych ścian kanału w kierunku jego dna, a następnie w kierunku ściany tylnej, gdzie ulega akumulacji oraz ponownemu krzepnięciu tworząc w ten sposób połączenie spawanych elementów. Szerokość i głębokość formującej się spoiny determinowana jest szerokością strefy stopionego materiału otaczającej kanał parowy (ryc. 4) [9].



Ryc. 2. Etapy formowania się kanału parowego w procesie laserowego spawania [na podst. 7]



Ryc. 3. Ogniskowanie odbiciowe wiązki [na podst. 7]



Ryc. 4. Schemat procesu spawania laserowego przebiegającego z wytworzeniem kanału parowego [na podst. 9]

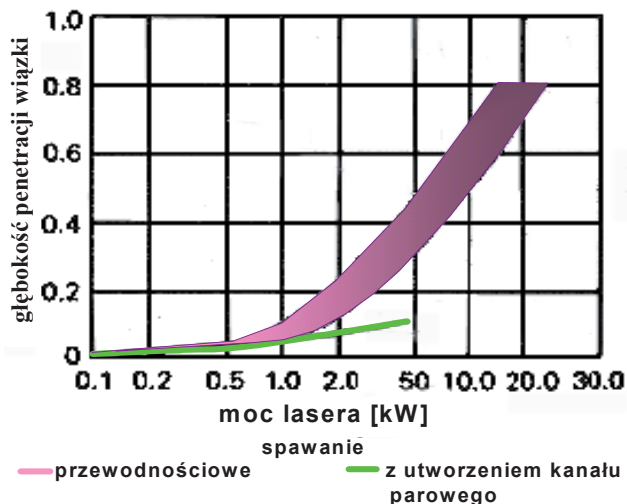
Parametry procesu laserowego spawania

Jakość i kształt spoin wykonanych za pomocą wiązki laserowej jest uzależniona od stosowanych parametrów spawania. Do podstawowych parametrów laserowego spawania należą:

- moc wiązki,
- średnica plamki laserowej,
- prędkość spawania,
- sposób ogniskowania wiązki względem powierzchni spawanych elementów,
- rodzaj, wydatek i kierunek nadmuchu gazu ochronnego,
- własności spawanego materiału.

Moc wiązki

Zarówno dla spawania laserowego limitowanego przewodnictwem cieplnym spawanego materiału, jak i dla procesu spawania przebiegającego w warunkach głębokiej penetracji wiązki laserowej, wraz ze wzrostem mocy lasera wzrasta głębokość penetracji (ryc. 5).



Ryc. 5. Zależność głębokości penetracji od mocy wiązki [7]

Przy stałej prędkości spawania wielkości te związane są wyznaczoną eksperymentalnie zależnością [2]:

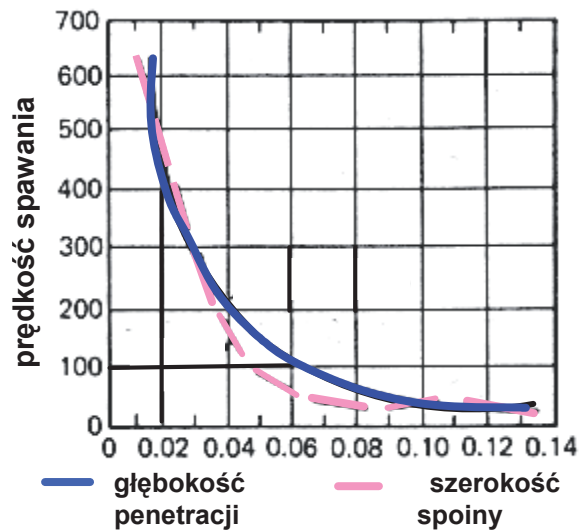
$$p = \alpha P^\beta$$

gdzie: P – moc lasera, p – głębokość penetracji, α – współczynnik proporcjonalności, zależny od szybkości spawania, charakterystyk termodynamicznych materiału, jak również od rozkładu energii na poziomie ogniskowej, β – wyznaczana eksperymentalnie wartość z przedziału (0,6–1,2).

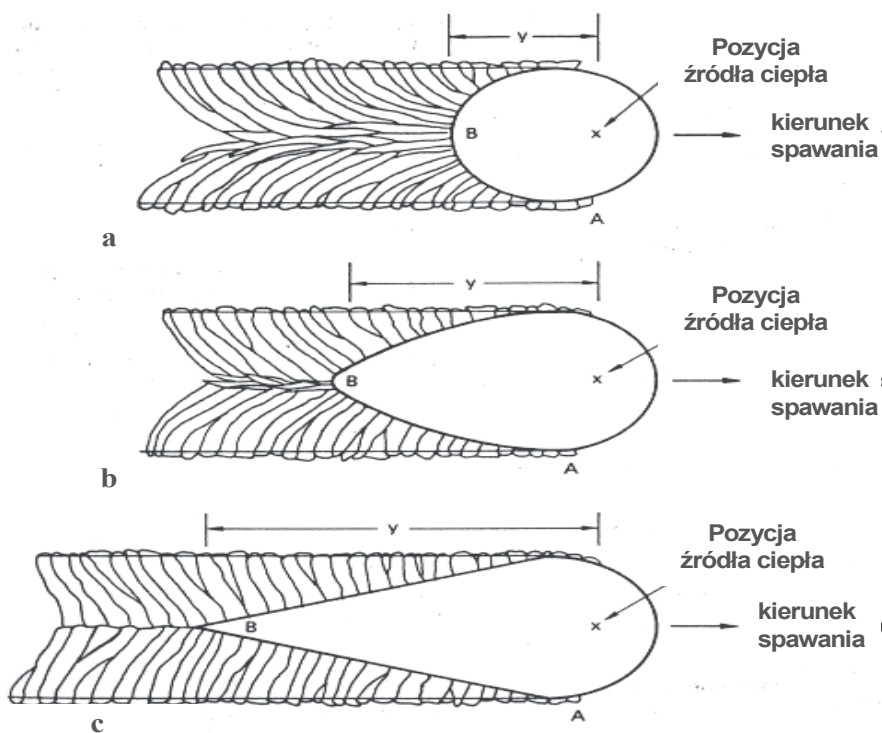
Prędkość spawania

Prędkość spawania ma zasadniczy wpływ na głębokość penetracji wiązki i objętość stopionego materiału. Przy stałej mocy wiązki laserowej wzrost prędkości spawania powoduje zmniejszenie głębokości penetracji wiązki i poszerzenie spoiny od strony lica (ryc. 6) [7].

Prędkość spawania determinuje kształt i wielkość jeziorka spawalniczego [10]. W miarę powiększania się prędkości spawania v , przy niezmienności pozostałych parametrów procesu, jeziorko spawalnicze staje się coraz węższe i bardziej wydłużone (ryc. 7).



Ryc. 6. Wpływ prędkości spawania laserowego na głębokość i szerokość spoiny [7]



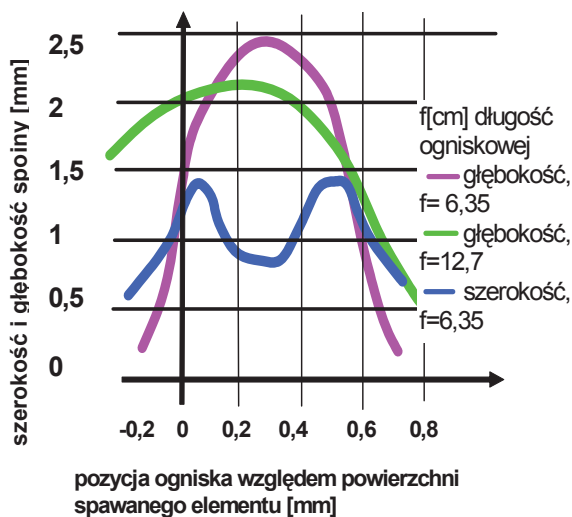
Ryc. 7. Zależność kształtu i wielkości jeziora spawalniczego od prędkości spawania [11]

Przy spawaniu z małymi prędkościami jeziorko spawalnicze przyjmuje kształt elipsy (ryc. 7a). Kierunek największego gradientu temperatur zmienia się w sposób ciągły, w zakresie od 90° na granicy wtopienia (punkt A), do kąta $\sim 0^\circ$ (w punkcie B). Rosnące ziarna muszą zatem, również w sposób ciągły, dopasowywać swoją orientację w zależności od położenia źródła ciepła w danej chwili. Ziarna o orientacji zgodnej z kierunkiem najszybszego odprowadzania ciepła rosną szybciej niż pozostałe, przy czym kierunek $\langle 001 \rangle$ jest uprzywilejowany dla wzrostu kryształów o sieci regularnej ściennie centrowanej i regularnej przestrzennie centrowanej.

Ziarna spoin wytworzonych przy dużych prędkościach spawania odchylają się w mniejszym stopniu niż spoin uzyskanych przy małych prędkościach, zbyt duże prędkości spawania (ryc. 7c) sprzyjają makrosegregacji poprzez wzrost ziaren kolumnowych o zbliżonej orientacji z granicy wtopienia w kierunku osi spoiny. Powstałe w takich warunkach złącza charakteryzują się niską odpornością na pękanie na gorąco, której przyczyną jest segregacja niskotopliwych zanieczyszczeń i składników stopowych do osi spoiny.

Ogniskowanie wiązki

Zarówno głębokość penetracji wiązki, jak i wielkość przekroju poprzecznego utworzonej spoiny zależą od pozycji ogniska względem powierzchni spawanych elementów (ryc. 8). Głębokość penetracji, określająca wysokość spoiny, jest największa, gdy ognisko znajduje się nieznacznie pod powierzchnią spawanych elementów [7]. Przekrój spoin otrzymanych przy takim sposobie ogniskowania ma brzoги niemal równoległe.



Ryc. 8. Głębokość penetracji i szerokość lica spoiny w zależności od pozycji ogniska względem spawanej powierzchni [11]

Własności spawanego materiału

Wynik spawania zależy nie tylko od parametrów wiązki laserowej, ale także od właściwości materiału spawanego – najważniejszy wpływ mają: gęstość, pojemność cieplna, entalpia, przewodnictwo cieplne właściwe, dyfuzyjność cieplna

(współczynnik dyfuzji) oraz współczynnik absorpcji materiału dla zastosowanego promieniowania laserowego [12].

Dyfuzyjność cieplna jest niezwykle istotna, ponieważ decyduje o szybkości przewodzenia ciepła przez spawany materiał. Im wyższa dyfuzyjność cieplna materiału, tym szybsze przewodzenie ciepła i większa głębokość spawania.

Współczynnik absorpcji A materiału decyduje o efektywności procesu spawania. Wartość współczynnika absorpcji metalu dla promieniowania elektromagnetycznego wyznacza się z równania [13]:

$$A = \frac{4n}{(n+1)^2 + k^2}$$

gdzie n i k są odpowiednio częścią rzeczywistą i urojoną liczby zespolonej m , oznaczającej współczynnik refrakcji materiału dla promieniowania elektromagnetycznego wyrażoną równaniem [13]:

$$m = n - ik$$

Ponieważ dla metali zarówno n jak i k przyjmują wartości większe od 1, wartość współczynnika absorpcji tej grupy materiałów dla promieniowania podczerwonego jest mała. Przykładowo współczynnik absorpcji aluminium dla promieniowania o długości fali $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ wynosi 0,06, a dla długości fali $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ (laser CO_2) $A = 0,02$. Absorpcyjność materiału zależy nie tylko od długości fali promieniowania lasera, ale także od sposobu przygotowania powierzchni i temperatury obrabianych elementów oraz czasu oddziaływania promieniowania laserowego na materiał. Najmniejszą absorpcyjność dla promieniowania laserowego mają metale o wypolerowanej powierzchni. Przeprowadzone przez Klejmana [3] próby spawania laserowego metali o różnie przygotowanych powierzchniach nie wykazały jednakże wyraźnych różnic w ilości energii wymaganej do uzyskania spoiny o całkowitym przetopie. Oznacza to, że współczynnik absorpcji materiału jest parametrem istotnym tylko w początkowym etapie oddziaływania wiązki laserowej na materiały.

Rodzaj atmosfery ochronnej

Spawanie laserowe większości materiałów sprowadzi się zazwyczaj pod osłoną gazu obojętnego, najczęściej argonu lub helu [13]. Podczas spawania impulsowego lub spawania w trybie pracy ciągłej laserami średniej mocy gaz osłaniający dostarczany jest współbieżnie z wiązką laserową. Spawanie za pomocą laserów dużej mocy wymaga najczęściej zastosowania takiego ustawienia dyszy, które zapewni całkowitą osłonę stopionego materiału. Spawanie wiązką impulsową za pomocą laserów na ciele stałym ze względów ekonomicznych prowadzi się najczęściej bez stosowania atmosfery ochronnej, co oczywiście odbywa się kosztem właściwości mechanicznych wytworzonego połączenia. Spawanie punktowe laserami na ciele stałym można prowadzić bez osłony gazowej, ponieważ materiał znajduje się w stanie ciekłym tylko przez bardzo krótki okres czasu (impuls trwa ok. 1–10 ms, a materiał jest w stanie ciekłym nawet krócej) [14]. Dla pozostałych procesów spawania laserowego zaleca się stosowanie atmosfery gazów osłaniających. Rodzaj stosowanego gazu nie jest bez znaczenia. Hel posiada wyższy potencjał jonizacji niż argon,

z tego powodu uznany jest jako gaz „cieplejszy”, bardziej użyteczny do spawania cienkich płyt oraz wysoko przewodzących materiałów, takich jak stopy miedzi i stopy aluminium. Argon natomiast, w porównaniu do helu, jest bardziej gęsty i, co nie bez znaczenia, również tańszy.

Bibliografia

- [1] Ready J.F., *Effects of high-power laser radiation*, Academic Press, New York–London 1971, pp. 360–371
- [2] Mazumder J., *Laser Welding: State of the Art.- Review*, Journal of Metals, July 1982, pp. 16–24
- [3] Klejman H., *Lasery*, PWN, Warszawa 1974, p. 76
- [4] Klejman H., *Lasery*, PWN, Warszawa 1974, pp. 356–363
- [5] Gourd M.L., *Podstawy procesów spawalniczych*, WNT, Warszawa 1997, p. 241
- [6] Bartler W., Pathe D., Roatzsch R., Weick J.M.:P., *Influence of beam quality when welding with Nd:YAG and CO₂ lasers*, Lasers in Material Processing, Proceedings of SPIE 16–20 June 1997, Munich, FRG, EUROPTO series vol. 3097, pp. 147–156
- [7] Metals Handbook, vol. 6, Welding, Brazing and Soldering: laser Beam Welding, ASM 1983
- [8] Burakowski T., Wierzchoń T., *Inżynieria powierzchni metali*, WNT, Warszawa 1995, p. 324
- [9] Schuöcker D., *Modeling of deep penetration laser welding*, ICALEO(1991) pp. 32–39
- [10] Devletian J.H., Wood W.E., *Principles of Joining Metallurgy*, Metals Handbook, Welding, Brazing and Soldering 1981, p. 28
- [11] Swift-Hook D.T., Gick A., *Welding Journal* 52, Nov. 1973, p. 3895
- [12] Albright C.G. i in., *Laser Beam Welding, Special Welding Processes*, Metals Handbook, Welding, Brazing and Soldering 1981, p. 654
- [13] Metals Handbook, vol. 6, Welding, Brazing, Soldering. Laser Beam Welding, p. 659
- [14] Klemens P.G., *Journal of Applied Physics* 51, 2, 1980, p. 941

Lasers in Technological Welding

Abstract

Lasers are widely used in surface engineering, cutting, drilling and welding materials. Laser welding is now the usual practice in electronics, motor-car and massive product industries. In this work both keyhole and heat conduction limited laser welding processes are discussed as well as the influence of basic parameters of the processes on the geometry and structure forming of laser welds.

Key words: welding, laser welding, welding parameters