

Comparison of selected functional properties of laser energy sources using for welding processes

Porównanie wybranych właściwości użytkowych laserowych źródeł energii stosowanych w procesach spawalniczych

Marek P. Węglowski ^{1,*}  and Piotr Brakowiecki ² 

¹ Akademia Spawania; weglowski@wp.pl

² Instytut Rozwoju Technologii i Rzeczoznawstwa, ul. Świętokrzyska 14a, 00-050 Warszawa; <https://irtir.simp.pl> piotr.brakowiecki@simp.pl (P.B.)

* Correspondence: weglowski@wp.pl (M.W.)

Received: 28.10.2025; Accepted: 10.12.2025; Published: 15.12.2025

Abstract: This article discusses the basic types of laser energy sources using in welding and related processes, such as surface modification and cutting. It presents the fundamentals of photon beam generation in various types of welding lasers. A general comparison of their selected technological and operational properties, including energy efficiency, wavelength, beam quality, photon beam transport method, operational durability, investment cost, operating cost, and service complexity, is provided. Recommendations for selecting laser welding methods for industrial applications are provided based on economic and technical considerations.

Streszczenie: W artykule omówiono podstawowe odmiany laserowych źródeł energii stosowanych w procesach spawalniczych i pokrewnych spawalnictwu jak modyfikacja powierzchni i cięcie. Przedstawiono podstawy generowania wiązki fotonów w różnych odmianach laserów spawalniczych. Ogólnie porównano ich wybrane właściwości technologiczne i eksploatacyjne jak sprawność energetyczna, długość fali, jakość wiązki, sposób transportu wiązki fotonów, trwałość eksploatacyjna, koszt inwestycji, koszt eksploatacji oraz stopień skomplikowania serwisu. Wskazano rekomendacje do wyboru odmian spawania laserowego w przemyśle w zależności od uwarunkowań ekonomicznych i technicznych.

Keywords: laser process; beam welding; welding sources; similitude and differences in lasers

Słowa kluczowe: obróbka laserowa; spawanie wiązkowe; podobieństwa i różnice w laserach

Wprowadzenie

Laser jest urządzeniem emitującym promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu spektrum światła, wykorzystujące zjawisko emisji wymuszonej. Nazwa LASER jest akronimem od angielskich słów *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, co oznacza wzmocnienie światła poprzez wymuszoną emisję promieniowania. Wiązka świetlna lasera jest spójna, najczęściej spolaryzowana i charakteryzuje się nieznaczną rozbieżnością. Zasadnicze elementy lasera to: ośrodek czynny, rezonator, układ pompujący, który dostarcza energię do ośrodka czynnego, w ośrodku czynnym w odpowiednich warunkach zachodzi akcja laserowa, czyli kwantowe wzmacnianie fotonów, układ optyczny umożliwia wybranie odpowiednich fotonów. Do najważniejszych właściwości światła laserowego należą:

- rozbieżność wiązki, definiowana jako powiększanie się pola przekroju poprzecznego wiązki wraz z odległością, określana jest kątem rozbieżności θ , dzięki niskiej rozbieżności wiązki blisko 100% energii promieniowania można skierować w określone miejsce,

$$\theta = \frac{1,22\lambda}{D}$$

gdzie:

λ -długość fali,

D -szerokość wiązki na wyjściu z lasera.

- spójność (koherentność) jest to przestrzenna i czasowa, w fazie i częstotliwości zależność drgań elektromagnetycznych,
- moc promieniowania i gęstość energii,
- propagacja promieniowania laserowego w środowisku.

Lasery wypromieniowują blisko całą swoją energię w smukłych wiązках, inaczej niż ma to miejsce w innych źródłach światła, promieniujących we wszystkie strony, których energii nie można skoncentrować tak, aby uzyskać gęstość mocy w plamce większą od gęstości mocy źródła. Energię promieniowania laserów można skoncentrować, co umożliwia równoległość wiązki. Duża gęstość mocy ułatwia uzyskanie dużej koncentracji fotonów. Wtedy może zachodzić równoczesne oddziaływanie kilku fotonów z jednym atomem.

Opisane osobliwości wiązki laserowej stanowią o jego rosnącej roli w technice spawania i pokrewnych technikach [1] skoncentrowanych na obróbce metali, jak modyfikacja powierzchni [2], cięcie termiczne czy ablacja [3].

Spawanie laserowe jest szeroko stosowane w różnych sektorach przemysłu, takich jak produkcja samochodów i innych pojazdów, w przemyśle stocznioowym, lotniczym, ale też coraz intensywniej szeroko wkracza do małych i średnich firm, które produkują proste, poza dozorowe wyroby lekkie, ale i konstrukcyjne specjalistyczne. Dzieje się tak ze względu na liczne zalety laserów do których należą: wysoka jakość procesu spawania [4], wysoka precyzja sterowania energią liniową spawania [5] i elastyczność procesu [6]. Nie bez znaczenia pozostaje znacznie większa prędkość spawania laserowego niż innych metod spawania opartych na łukowych źródłach energii, w tym MIG, MAG [7], TIG czy MMA [8], fakt ten istotnie wpływa na wydajność spawania ze względu na intensywne i głębokie topienie materiału podstawowego, ale jest także powiązany ze wzrostem efektywności topienia materiału dodatkowego (jeśli występuje) [9]. Spawanie laserowe charakteryzuje się relatywnie niskimi odkształceniami złączy spawanych oraz ma wpływ na zmniejszenie Strefy Wpływu Ciepła w stosunku do metod konwencjonalnych [10]. W tym artykule przedstawiono i usystematyzowano główne rodzaje laserowych źródeł energii spawania oraz różnice pomiędzy nimi w kwestii przydatności technologicznej i głównych obszarów zastosowania.

Główne rodzaje laserów przemysłowych stosowanych do obróbki materiałów inżynierskich

Lasery dzieli się zwykle na podstawie ośrodka czynnego: gazowe (He-Ne, CO₂, N₂), półprzewodnikowe (najczęściej diodowe), na ciele stałym (np. rubinowy, Nd:YAG), barwnikowe, na parach metali (np. na parach miedzi); pod względem trybu pracy (ciągłe i dyskretnie); poziomu mocy; długości fali np. podczerwone (IR niewidzialne, pochłanianie przez metale i wodę); widzialne (np. He-Ne, CO₂); ultrafioletowe (UV krótka fala) oraz klasy bezpieczeństwa: klasa 1-bezpieczne w normalnych warunkach; klasa 2/2M-niska moc, widzialne; klasa 3R/3B-niebezpieczne przy bezpośrednim patrzeniu (3B bardziej niebezpieczny); klasa 4-najwyższa klasa, zagrożenie dla oczu, skóry i zagrożenie pożarem (np. lasery przemysłowe i medyczne).

Można wyróżnić cztery główne typy laserów stosowanych w obszarze przemysłowym, które są pokazane w tabeli 1. Różne typy są dalej podzielone w zależności od rodzaju wzbudzenia, trybu pracy (ciągłego, pulsacyjnego) jak i innych parametrów. Każdy typ ma inne zastosowania i swoje zalety, dla których jest odpowiedni do spawania lub cięcia określonych materiałów.

Tab. I Podstawowy przegląd poszczególnych typów laserów stosowanych w przemyśle z zastosowaniem do łączenia metali

Tab. I A basic overview of the different types of lasers used in the metal joining industry

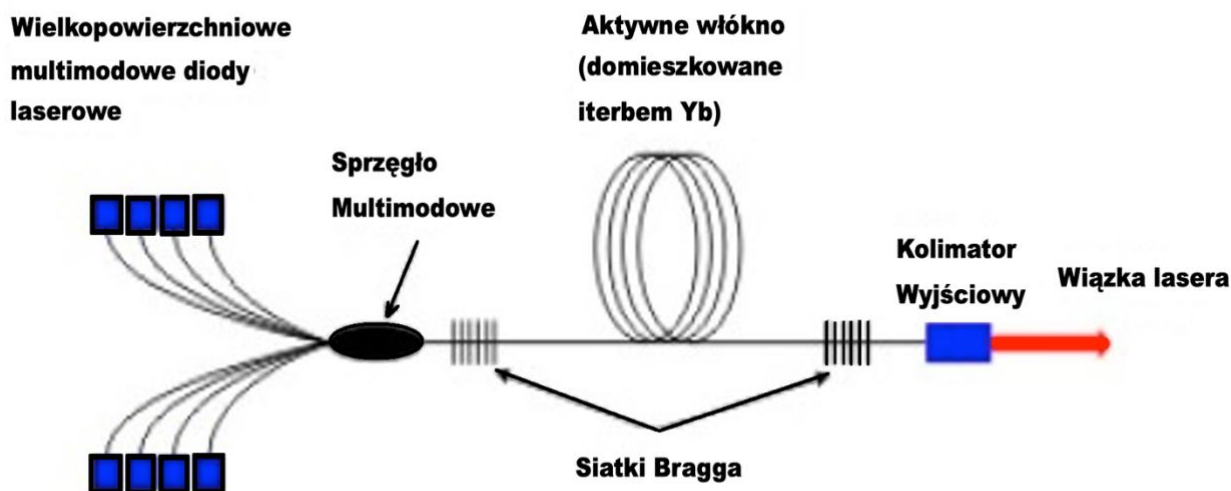
Parametr	Laser CO ₂	Laser Nd:YAG	Laser włóknowy (Fiber)	Laser dyskowy	Laser diodowy
Sprawność energetyczna (%)	10-25	3-10	25-50	15-30	40-60
Długość fali (nm)	10600	1064	~1070	~1030	450-1064
Jakość wiązki	Wysoka	Dobra	Bardzo wysoka	Bardzo dobra	Średnia-bardzo wysoka

Transport wiązki	Lustra stałe	Elastyczny światłowód	Elastyczny światłowód	Elastyczny światłowód	Bezpośrednio z diody
Trwałość (h)	~20 000	1000-10 000	>100 000	10 000-100 000	10 000-50 000
Koszt inwestycji	Wysoki	Wysoki	Średni	Średni	Średni
Koszt eksploatacji	Wysoki	Wysoki	Średni	Średni	Średni
Złożoność konserwacji	Wysoka	Wysoka	Średnia	Średnia	Średnia

Lasery na ciele stałym

Laser światłowodowy (Fibre)

Obecnie najpowszechniej stosowana odmiana lasera w spawalnictwie. Laser *światłowodowy* (włóknowy) jest najbardziej zaawansowanym technologicznie typem lasera półprzewodnikowego, aktywnym medium są tu długie włókna optyczne domieszkowane metalami ziem rzadkich (Nd, Yb lub Er). Pobudzenie źródła następuje przez diody laserowe, energia jest przeprowadzana przez łącznik optyczny do aktywnego włókna światłowodowego (zamiast jak to było wykorzystywane w starszych typach laserów, zwierciadeł doprowadzających skoncentrowane światło do miejsca roboczego). Laser światłowodowy (fiber) i laser diodowy to dwa różne typy laserów, choć często są mylone, ponieważ nowoczesne lasery fiber są pompowane diodami półprzewodnikowymi, które dostarczają energię do włókna aktywnego, w którym generowane jest światło laserowe. Główna różnica polega na tym, że w laserze diodowym wiązka pochodzi bezpośrednio z diody, podczas gdy w laserze fiber wiązka jest generowana w światłowodzie domieszkowanym metalami ziem rzadkich, co zapewnia elastyczność i wysoką wydajność.



Rys. 1. Schemat ideowy działania lasera włóknowego [11]

Fig. 1. Schematic diagram of the fiber laser operation [11]

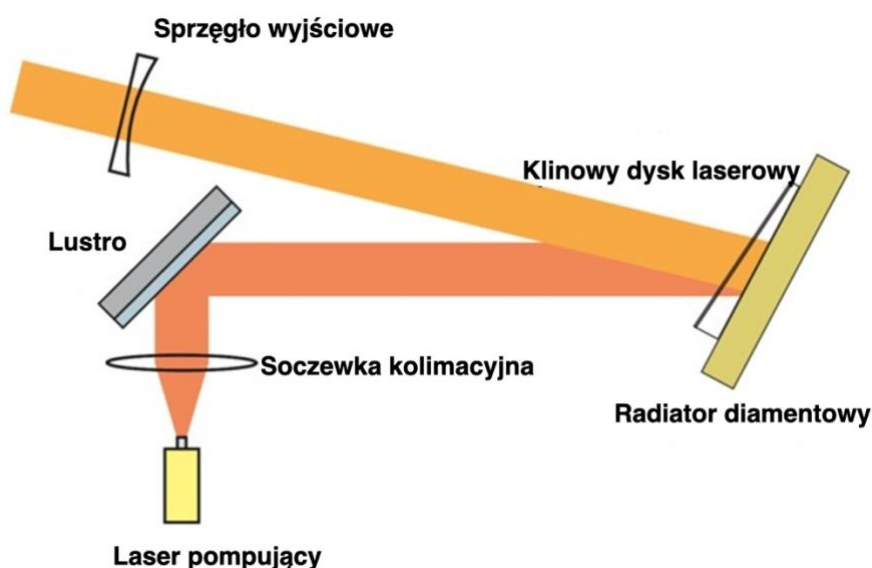
Lasery światłowodowe występują w kilku odmianach, podzielone według ich trybu pracy i mogą pracować w sposób ciągły (CW ang. *Continuous Work*), impulsowy lub quasi-pulsed (QCW). Pod wpływem światła pompującego we włóknie powstaje wysoka gęstość mocy, która doprowadzana jest do miejsca roboczego. Po prawidłowym dodaniu dodatniej pętli sprzężenia zwrotnego (tworzącej wnękę rezonansową) co daje możliwość uzyskania oscylacji lasera. Ogromną zaletą lasera światłowodowego jest jego prostota (cały laser jest w rzeczywistości światłowodem), solidność i modułowość, która jest unikalna dla tych laserów - laser składa się z tzw. modułów laserowych, których moc może być stopniowo zwiększana poprzez ich łączenie (obecnie nawet do 80 kW).

Inne zalety to wysoka wydajność (25-50%), wysoka trwałość źródła energii (~100 000 h), małe zapotrzebowanie na przestrzeń potrzebną do zainstalowania systemu spawania, wysoka jakość wiązki laserowej, najniższe koszty eksploatacji z wszystkich wymienionych typów i niskie wymagania konserwacyjne, co dodatkowo uatrakcyjnia tego typu rozwiązania.

Laser dyskowy-„Thin Disk”

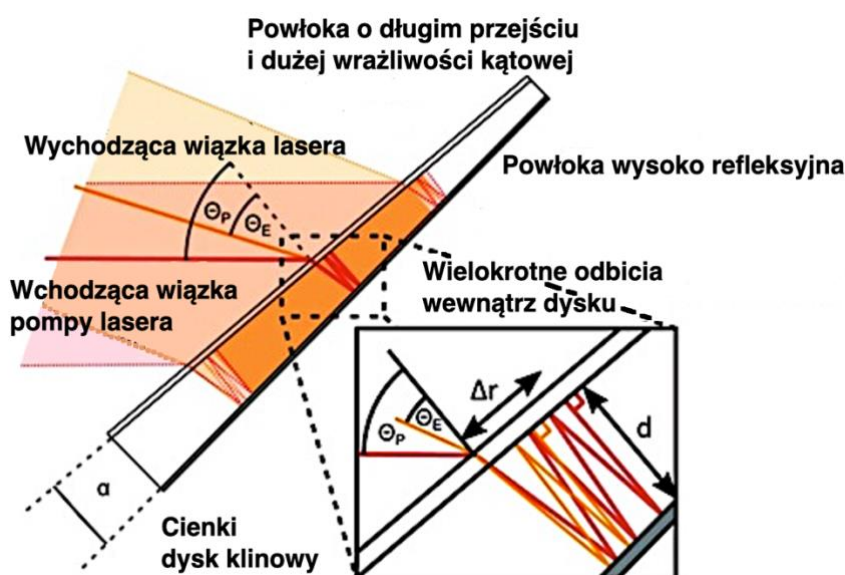
Pierwsze lasery, które można nazwać dyskowymi powstały już w latach 90 XX wieku. Ośrodkiem czynnym jest cienki dysk krystaliczny, chłodzony od spodu. Podobnie jak lasery włóknowe, laser dyskowy pracuje na fali o długości ~ 1030 nm i charakteryzuje się bardzo wysoką jakością wiązki. Zapewnia to duży stosunek powierzchni do objętości, a tym samym zapewnia bardzo wydajne zarządzanie termiczne. Obecnie koncepcja cienkiego dysku jest stosowana w różnych laserach komercyjnych – od kompaktowych, wydajnych systemów o niskiej mocy do laserów multi-kW, w tym laserów CW pracujących w sposób ciągły, a także impulsowych (femtosekundowych do nanosekund) oscylatorów i wzmacniaczy [12].

Lasery cienko-dyskowe są stosowane w spawalnictwie [13], ale też są niezbędne w badaniach fotoniki, a także w wielu zastosowaniach przemysłowych. Stanowią unikalną klasę architektury laserowej i wzmacniacza, która zapewnia moc wyjściową o doskonałych właściwościach związanych z jakością wiązki, ciągłą stabilnością, zarządzania termicznego i skalowalności mocy. Dla wielu zastosowań zmniejszona złożoność lasera i jego rozmiary byłyby bardzo korzystne. Poniżej przedstawiono na Rys. 2., jedno z rozwiązań obrazujących schematycznie pracę lasera dyskowego [14].



Rys. 2. Optyczna konfiguracja geometrii pompy monolitycznej umieszczona w I-rezonatorze [14]

Fig. 2. Optical configuration of the monolithic pump geometry placed in the I-resonator [14]



Rys. 3. Szkic zakrzywionej geometrii cienko-dyskowej [14]

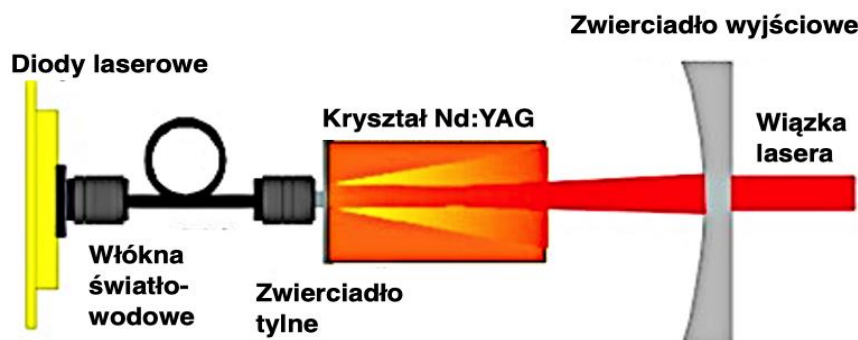
Fig. 3. Sketch of curved thin-disk geometry [14]

Tylna strona dysku jest pokryta wysoce refleksyjnym lustrem zarówno dla wiązki lasera pompującego, jak i długości fal laserowych i zintegrowana z odpowiednim radiatorem (w najnowszych rozwiązaniach najczęściej diamentowym) jak pokazano na Rys. 3. Przednia strona jest antyrefleksyjna (powierzchnia

o wysokiej pochłalności) wydajnie chłodzone z tyłu poprzez ciecz i wykorzystywane w rezonansie lub wzmacniaczu w odbiciu fali [15].

Laser Nd:YAG

Historycznie jedne z pierwszych laserów szeroko stosowanych w spawaniu były to właśnie lasery na ciele stałym (kryształ neodymu) Nd:YAG. Generują promieniowanie o długości fali 1064 nm, dzięki czemu charakteryzują się dobrą absorpcją przez powierzchnię ciała stałego w zastosowaniu do łączenia i innego rodzaju obróbek różnych metali z możliwością transportu wiązki za pomocą giętkich światłowodów, co daje dużą swobodę w zastosowaniu tego typu źródła wiązki energetycznej, choćby do zastosowania takich urządzeń manipulacyjnych jak roboty spawalnicze. Stosowane przemysłowo lasery Nd: YAG są to lasery z pompą lampową, litowo-płytowy (LPSS) lub lasery z pompą diodową (DPSS), którego schemat działania przedstawiono na Rys. 4. Medium aktywnym jest tu matryca sztucznego kryształu YAG (*trójkątny aluminiowy*) domieszkowany jonami neodymu (Nd) lub ytterbium (Yb). Lasery LPSS Nd: YAG mają niską wydajność konwersji energii elektrycznej do energii wyjściowej, ponieważ duża część energii lampy nie jest przekształcana w wiązkę lasera, a jest transformowana w ciepło (co wymaga dość intensywnego chłodzenia cieczą). Lasery DPSS Nd: YAG mają relatywnie większą wydajność i lepszą jakość wiązki. Jednak zastosowanie laserów typu Nd:YAG od kilku lat systematycznie się zmniejsza co może być związane głównie z relatywnie krótką trwałością lamp, która wynosi od 1.000 do 10.000 h, oraz dość częstymi i kosztownymi konserwacjami tego typu źródeł.

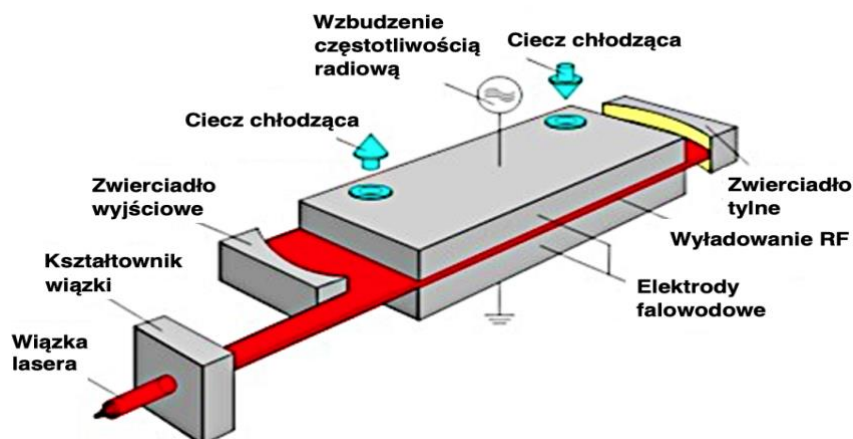


Rys. 4. Budowa lasera Nd:YAG DPSS [11]

Fig. 4. Schematic diagram of the Nd:YAG DPSS laser [11]

Lasery gazowe

Lasery CO₂ są jedną z najstarszych odmian spawania i cięcia laserowego stosowaną w spawalnictwie. Ośrodkiem czynnym jest tu mieszanina gazów (CO₂, N₂, He). Generują promieniowanie w dalekiej podczerwieni (długość fali 10,6 μm).



Rys. 5. Budowa lasera gazowego CO₂ [11]

Fig. 5. Schematic diagram of the CO₂ laser [11]

Wymagają transportu wiązki za pomocą sztywnego toru optycznego zbudowanego na bazie systemu luster, co ogranicza ich elastyczność w operacjach technologicznych. Jeśli chodzi o budowę, są one podzielone na zamknięte lasery z hermetycznie uszczelnionym rezonatorem i laserami przepływowymi, gdzie gaz przepływa nieprzerwanie przez rezonator (który jest niezbędny dla dużej mocy około 10 kW). Wzbudzenie aktywnego gazu odbywa się za pomocą fal o częstotliwości radiowej, które przechodzą między dwiema elektrodami, które ze względu na ich dużą powierzchnię zapewniają jednocześnie dyfuzję gazu w rezonatorze. Na Rys. 5 zobrazowano schematycznie budowę lasera CO₂. Lasery te wyróżniają się wysoką niezawodnością przy prawidłowej konserwacji, wysoką trwałością rzędu 20000 h i średnimi kosztami inwestycyjnymi oraz umiarkowanymi nakładami na konserwację.

Hybrydowe lasery na ciele stałym (np. Fiber-Disk)

Lasery hybrydowe są to nowoczesne rozwiązania, które zaczynają od niedawna wchodzić do przemysłu, łączą zalety różnych metod generowania wiązki laserowej, np. łączących kilka modułów laserów włóknowych (fiber) wraz z rozwiązaniami znanymi z laserów dyskowych. Ta koncepcja konstrukcyjna podwójnego źródła kilku wiązek energii laserowej łączonej w jedną wiązkę wyjściową jest wciąż rozwijana. Rozwiązanie to pozwala na relatywnie elastyczne skalowanie mocy w porównaniu do pojedynczych źródeł energii wiązki laserowej [16].

Porównanie wybranych właściwości technologicznych laserów spawalniczych

Sprawność energetyczna

Lasery CO₂ mają relatywnie niską sprawność energetyczną. Około 5-25% pobieranej energii elektrycznej jest zamieniane na energię wiązki laserowej. Reszta to głównie straty cieplne, wymagające intensywnego chłodzenia.

Lasery włóknowe są bezkonkurencyjne pod tym względem. Ich sprawność na poziomie 25-40% oznacza znacznie niższe koszty procesu i mniejsze wymagania dla systemów chłodzenia niż laserów CO₂. Relatywnie wysoka sprawność energetyczna laserów włóknowych bezpośrednio przekłada się nie tylko na niższy koszt eksploatacji, ale też istotnie wpływa na organizację przestrzeni roboczej i przestrzeń zajmowaną przez urządzenie.

Absorpcja energii i jakość procesu

Absorpcja energii lasera przez metal to proces zamiany promieniowania elektromagnetycznego w ciepło, napędzany przez oscylacje wolnych elektronów w sieci krystalicznej metalu pod wpływem wiązki fotonów. Sprawność pochłaniania energii zależy w największym stopniu od długości fali lasera oraz od rodzaju metalu i stanu jego powierzchni. Wyższa absorpcja zachodzi przy krótszych długościach fali. Fala o długości 1 μm (Fiber, Disk, Nd:YAG) jest znacznie lepiej absorbowana przez metale (zwłaszcza metale nieżelazne jak miedź [17] czy aluminium [18]) niż fala o długości 10,6 μm lasera CO₂. Spawanie laserem na ciele stałym umożliwia uzyskanie obróbki z większą prędkością, mniejszą mocą oraz sprawną obróbkę materiałów o wysokiej refleksyjności [19].

Jakość wiązki (parametr BPP – ang. *Beam Parameter Product*) decyduje o możliwości skupienia wiązki na bardzo małej powierzchni. Lasery włóknowe i dyskowe mają wysoką jakość wiązki, umożliwiają spawanie z głęboką penetracją fazą ciekłą lub nawet z efektem kanału parowego [20], potocznie z angielskiego „keyhole” oraz spawanie cienkich blach z wysoką precyzją. Niektóre publikacje [19] jednoznacznie wskazują na różnicę w szerokości spoiny i SWC (Strefy Wpływu Ciepła) pomiędzy laserami dyskowymi i włóknowymi, wskazując, że szerokość obu charakterystycznych cech geometrycznych spoiny wykonanej w porównywalnych warunkach w przypadku spawania laserem włóknowym jest większa.

Elastyczność i podatność na automatyzację procesu

Spawanie laserowe jest dla porównania około 5 razy szybsze niż spawanie TIG [21] (ang. *Tungsten Inert Gas*) choćby z tego powodu dla pełnego wykorzystania maksymalnej wydajności spawania, uzyskania stałego poziomu jakości i powtarzalności wiązka powinna być prowadzona w sposób co najmniej zautomatyzowany [22]. Choć w ostatnim czasie trudno nie zauważyć skokowego wzrostu popularności ręcznych systemów spawania laserowego charakteryzujących się umiarkowaną mocą wiązki. Niemniej przemysłowe Lasery CO₂ wymagają sztywnego systemu luster do transportu wiązki od źródła do głowicy

roboczej. Układ jest podatny na drgania i wymaga precyzyjnego kontrolowania parametrów ruchu, co ogranicza zasięg i dynamikę ruchu robota.

Lasery „Fiber” i inne lasery na ciele stałym wykorzystują elastyczny światłowód do doprowadzenia wiązki w obszar roboczy. Umożliwia to podłączenie źródła laserowego do wielu stanowisk roboczych lub łatwą integrację z robotami przemysłowymi o dużym zasięgu, zapewniając nieosiągalną dla CO₂ swobodę ruchu.

Trwałość i koszty eksploatacji (TCO – ang. Total Cost of Ownership)

Choć w kwestii trwałości i kosztów eksploatacji wiele zależy od warunków eksploatacji, to lasery CO₂ obiektywnie mają ograniczoną trwałość do około 20 000 godzin, wymagają regularnej wymiany gazów, kondycjonowania optyki i toru optycznego doprowadzającego wiązkę do przestrzeni operacyjnej.

Lasery Nd:YAG z lampami pompującymi wykazują trwałość lamp na poziomie 1000-10000 godzin, co generuje dodatkowe koszty utrzymania ruchu, części zamiennych i przestojów.

Lasery włóknowe, pompowane diodami półprzewodnikowymi, wykazują trwałość na poziomie ponad 100 000 godzin. Nie posiadają elementów eksploatacyjnych wymagających cyklicznej wymiany (jak lampy czy gazy), a ich konserwacja sprowadza się głównie do czyszczenia i wymiany końcówek optycznych i ich zwierciadeł, co wyraźnie wpływa na całkowity koszt użytkowania (TCO), który jest trudno precyzyjnie i bezwzględnie określić, ponieważ jest wyraźnie związany z indywidualnymi warunkami eksploatacji.

Podsumowanie

W takim razie które źródło jest lepsze? Na tak postawione pytanie „który laser jest lepszy?” nie ma jednoznacznej odpowiedzi. Wybór właściwej odmiany spawania laserowego powinien bazować na znajomości cech technologicznych określonej metody, jej dostępności w analizowanych warunkach produkcyjnych oraz uwarunkowań ekonomicznych. Każda odmiana spawania laserowego wykazuje charakterystyczne dla siebie cechy, które w zależności od warunków jej stosowania mogą być postrzegane jako ograniczenia i eliminować metodę z zastosowania lub mogą być jej zaletą. Wybór właściwej metody spawania, powinien być poprzedzony analizą wielu czynników.

Dla większości aplikacji przemysłowych (spawanie blach, cięcie, napawanie) – lasery włóknowe wydają się być najlepszym wyborem. Ich wysoka sprawność, niski TCO, wysoka jakość wiązki i elastyczność integracji z innymi urządzeniami sprawiają, że obecnie są dominującą i najbardziej uniwersalną odmianą spawania laserowego. Lasery dyskowe są bardzo zbliżone pod względem parametrów do laserów fiber i przez wiele lat z nimi konkurowały. Obecnie rynek wyraźnie faworyzuje technologię włóknową, głównie ze względu na nieco wyższą sprawność i prostszą konstrukcję, ale lasery dyskowe wciąż są uznanym, wysokiej jakości spawalniczym źródłem energii, szczególnie w aplikacjach wymagających najwyższej jakości wiązki przy bardzo wysokich wartościach mocy.

Lasery Nd:YAG w konwencjonalnej formie (z lampami) są odmianą schyłkową w spawalnictwie, wciąż mogą być spotykane w starszych instalacjach lub niszowych aplikacjach.

Lasery CO₂ wciąż znajdują swoje miejsce w aplikacjach wymagających spawania na bardzo duże odległości (kilka metrów) lub w specyficznych procesach (np. cięcia termicznego grubych blach stalowych), gdzie ich relatywnie długa fala jest korzystna.

Należy podkreślić, że lasery oparte na tej samej technice generowania wiązki fotonów, znajdujące się w ofercie różnych, konkurencyjnych producentów będą wykazywały istotne różnice we właściwościach użytkowych do tego stopnia, że wymagane może być niezależne kwalifikowanie technologii spawania już nie tylko na odmianę spawania laserowego, ale również na określony typ urządzenia.

Wnioski

W ciągu ostatnich 15 lat technika laserów włóknowych zrewolucjonizowała rynek spawalnictwa, przyczyniła się do tego większa dostępność tych urządzeń wynikająca z podaży z kierunków azjatyckich, konkurencja wśród producentów i wiele innych czynników, jak dążenie producentów do automatyzacji procesów produkcyjnych. Dla nowych inwestycji związanych ze spawaniem precyzyjnym, w ponad 90% przypadków, to właśnie laser włóknowy będzie optymalnym wyborem, zwłaszcza przy spawaniu cienkich elementów, oferując najlepszy stosunek kosztu inwestycji do wydajności, jakości i niezawodności. Pozostałe odmiany laserów spawalniczych znajdują zastosowanie w specyficznych, niszowych procesach i aplikacjach lub są domeną starszych parków maszynowych.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- [1] D. Golański and T. Chmielewski, *Numerical Modeling of Selected Thermal Spraying Issues*, 1st ed. Warsaw: Publishing House of the Warsaw University of Technology, 2025.
- [2] T. Chmielewski and D. Golański, "The role of welding in the remanufacturing process," *Weld. Int.*, vol. 29, no. 11, 2015, doi: 10.1080/09507116.2014.937604.
- [3] K. Bieliszczuk, J. Zręda, and T. M. Chmielewski, "Influence of Cylindrical Cells Surface Cleaning by Means of Laser Ablation on Wedge Wire Bonding Process," *Coatings*, vol. 14, no. 4, p. 445, 2024, doi: 10.3390/coatings14040445.
- [4] T. Chmielewski and D. A. Golański, "New method of in-situ fabrication of protective coatings based on Fe-Al intermetallic compounds," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 225, no. 4, 2011, doi: 10.1177/2041297510394050.
- [5] K. Bieliszczuk, "Effect of laser surface preparation on ultracompressive wire bonding of two-component CucorAl wires in the battery industry," *Przem. Chem.*, vol. 103, no. 11, pp. 1324–1326, 2024, doi: 10.15199/62.2024.11.20.
- [6] X. Boce, C. Baohua, and D. Dong, "Monitoring of high-speed laser welding process based on vapor plume," *Opt. Laser Technol.*, vol. 147, p. 107649, 2022, doi: 10.1016/j.optlastec.2021.107649.
- [7] B. Jaeschke, M. Węglowski, and T. Chmielewski, "Current State and Development Opportunities of Dynamic Power Source for GMA Welding Processes," *J. Manuf. Technol.*, vol. 42, no. 1, pp. 23–30, 2017.
- [8] J. Górka and S. Stano, "Własności i struktura złączy spawanych hybrydowo HLAW (wiązka laserowa – FCAW) stali obrabianej termomechanicznie S700MC," *Przegląd Spaw. - Weld. Technol. Rev.*, vol. 87, no. 5, pp. 54–58, 2015, doi: 10.26628/ps.v87i5.226.
- [9] Y. Rong, G. Mi, J. Xu, Y. Huang, and C. Wang, "Laser penetration welding of ship steel EH36: A new heat source and application to predict residual stress considering martensite phase transformation," *Mar. Struct.*, vol. 61, pp. 256–267, 2018, doi: 10.1016/j.marstruc.2018.06.003.
- [10] S. Kano *et al.*, "Microstructure and mechanical property in heat affected zone (HAZ) in F82H jointed with SUS316L by fiber laser welding," *Nucl. Mater. Energy*, vol. 9, pp. 300–305, 2016, doi: 10.1016/j.nme.2016.08.004.
- [11] "OptiXs," 2025. [Online]. Available: <https://www.optixs.cz/en/novinky/serial-na-tema-lasery-hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu>.
- [12] J. Speiser, "Thin disk lasers: history and prospects," in *Laser Sources and Applications III*, 2016, p. 9893 98930L, doi: 10.1117/12.2231529.
- [13] T. E. Abioye, N. Mustar, H. Zuhailawati, and I. Suhaina, "Parametric analysis of high power disk laser welding of 5052-H32 aluminium alloy," in *Materials Today: Proceedings*, 2019, pp. 599–608, doi: 10.1016/j.matpr.2019.06.340.
- [14] R.-A. Lorbeer, B. Ewers, C. Santek, D. Beisecker, J. Speiser, and T. Dekorsy, "Monolithic thin-disk laser and amplifier concept," *Optica*, vol. 7, no. 10, p. 1409, 2020, doi: 10.1364/optica.402164.
- [15] C. J. Saraceno, D. Sutter, T. Metzger, and M. Abdou Ahmed, "The amazing progress of high-power ultrafast thin-disk lasers," *J. Eur. Opt. Soc.*, vol. 15, no. 15, 2019, doi: 10.1186/s41476-019-0108-1.
- [16] U. Brauch, C. Röcker, T. Graf, and M. Abdou Ahmed, "High-power, high-brightness solid-state laser architectures and their characteristics," *Appl. Phys. B Lasers Opt.*, vol. 128, no. 3, p. 58, 2022, doi: 10.1007/s00340-021-07736-0.
- [17] H. C. Chen, G. Bi, M. L. S. Nai, and J. Wei, "Enhanced welding efficiency in laser welding of highly reflective pure copper," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 216, pp. 287–293, 2015, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.09.020.
- [18] L. Wang, M. Yao, X. Gao, F. Kong, J. Tang, and M. Jun Kim, "Keyhole stability and surface quality during novel adjustable-ring mode laser (ARM) welding of aluminum alloy," *Opt. Laser Technol.*, vol. 161, p. 109202, 2023, doi: 10.1016/j.optlastec.2023.109202.
- [19] S. He, L. Liu, Y. Zhao, Y. Kang, F. Wang, and X. Zhan, "Comparative investigation between fiber laser and disk laser: Microstructure feature of 2219 aluminum alloy welded joint using different laser power and welding speed," *Opt. Laser Technol.*, vol. 141, p. 107121, 2021, doi: 10.1016/j.optlastec.2021.107121.
- [20] J. Y. Lee, S. H. Ko, D. F. Farson, and C. D. Yoo, "Mechanism of keyhole formation and stability in stationary laser welding," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 35, no. 13, pp. 1570–1576, 2002, doi: 10.1088/0022-3727/35/13/320.
- [21] T. Chmielewski, *Projektowanie procesów technologicznych - Spawalnictwo*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2013.
- [22] K. Ferenc, P. Cegielski, T. Chmielewski, and D. Golański, *Technika spawalnicza w praktyce: poradnik inżyniera, konstruktora i spawacza*. Warszawa: Verlag Dashofer, 2009.



Copyright: © 2025 by the authors. Licensee WTR, SIMP, Poland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).