

Lasery dyskowe – źródło ciepła dla procesów spawalniczych

The disk lasers – heat source for welding processes

Streszczenie

W artykule przedstawiono konstrukcję i zalety spawalniczych laserów dyskowych. Przedstawiono zakres zastosowań tych laserów do cięcia i spawania różnymi technikami: spawania z głębokim wtopieniem, spawania metodami hybrydowymi, wiązką ogniskowaną w dwóch punktach oraz spawania wiązką skanującą.

Omówiono zmodernizowane zrobotyzowane stanowisko Instytutu Spawalnictwa wyposażone w najnowszej generacji laser dyskowy o mocy 12 kW.

Abstract

The constructions and also advantages of disk lasers for welding applications are described in the article. The basic information about application of this lasers in welding and cutting different methods: with deep penetration, hybrid welding methods, with two-points focused beam and scanning beam welding are presented.

Moreover, the modernized welding station in Welding Institute with robot and the new generation disk laser with power up to 12 kW are presented.

Wstęp

Współczesne wymagania przemysłowe w stosunku do laserów stosowanych do cięcia lub spawania są ciągle rozszerzane. Obecnie od takich laserów, poza odpowiednio wysokim poziomem mocy, wymaga się: dużej sprawności, małych gabarytów rezonatora – małej przestrzeni przeznaczonej na instalację urządzenia, łatwości sterowania poziomem mocy i kierunkiem transmisji oraz wysokiej jakości wiązki promieniowania laserowego, przez którą rozumie się możliwość precyzyjnej transmisji i ogniskowania wiązki. W warunkach nowoczesnego przemysłu jest ważne również, aby urządzenia laserowe łatwo integrowały się z automatycznymi liniami produkcyjnymi, a stopień wykorzystania źródła laserowego (procent czasu emisji wiązki laserowej w jednostce czasu) był jak największy. Stąd niezwykle istotnym parametrem jest liczba stanowisk możliwych do obsługi przez jeden generator promieniowania

laserowego. Istotnymi czynnikami są: niezawodność i długi czas bezawaryjnej pracy oraz łatwość i szybkość wymiany lub naprawy poszczególnych modułów urządzenia laserowego.

Obecnie, w laserowych urządzeniach do spawania i cięcia wykorzystuje się całą gamę nowoczesnych, opracowanych w ostatnich kilkudziesięciu latach, generatorów promieniowania laserowego. Od początku lat 80. do chwili obecnej w przemysłowych zastosowaniach technologicznych wykorzystywane są przede wszystkim różnorodne, dobre i sprawdzone konstrukcje urządzeń opartych na generatorach promieniowania laserów gazowych CO₂ i laserów na ciele stałym Nd:YAG z elementem aktywnym w formie pręta.

W ostatnich kilku latach znaczącą i bardzo istotną zmianę na rynku urządzeń oraz w zakresie aplikacji przemysłowych wniosły dwa nowe typy laserów na ciele stałym dużej mocy – dyskowe i włóknowe. Obecnie te typy laserów w stanowiskach zrobotyzowanych zastępują coraz częściej lasery YAG z elementem aktywnym w kształcie pręta.

W artykule przedstawiono zalety i możliwości w zastosowaniach spawalniczych nowoczesnych źródeł promieniowania laserowego, jakimi są lasery dyskowe.

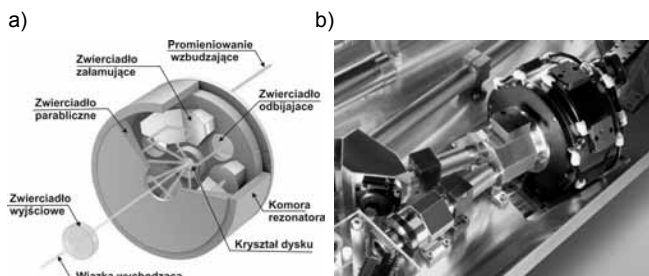
Dr inż. Marek Banasik, dr inż. Sebastian Stano
– Instytut Spawalnictwa, Gliwice.

Konstrukcja i zalety laserów dyskowych

Lasery dyskowe to nowa generacja laserów na ciele stałym, w których ośrodkiem czynnym jest kryształ granatu itrowo-aluminiowego (YAG). Podstawy tej generacji laserów opracowano w latach 90., a okres ostatnich kilkunastu lat, to okres intensywnego rozwoju, doskonalenia konstrukcji, zwiększania mocy i obniżania kosztów tych laserów. Pierwsze lasery dyskowe dużej mocy pojawiły się na rynku w 2003 r. Schemat lasera dyskowego przedstawiono na rysunku 1.

Elementem czynnym laserów dyskowych jest kryształ YAG w kształcie dysku, najczęściej o grubości $100 \pm 200 \mu\text{m}$ i średnicy do 15 mm. Kryształ ten jest domieszkujeany iterbem (Yb:YAG). Dysk laserowy montowany jest na miedzianym radiatorze odprowadzającym ciepło powstające podczas generacji wiązki laserowej. Element czynny wzbudzany jest optycznie przez jego oświetlenie promieniowaniem laserów diodowych, skupionym na dysku do plamki ok. kilku milimetrów. Zastosowanie laserów diodowych umożliwia bardzo dobre dopasowanie długości fali promieniowania pompującego do pasma absorpcji kryształu Yb:YAG. Ponieważ dysk jest cienki, tylko część promieniowania pompującego skierowanego na dysk jest absorbowana w jego obszarze. Reszta promieniowania pompującego przechodzi przez dysk, a następnie jest odbijana przez wewnętrzną powierzchnię dysku przylegającą do miedzianego radiatora i przez system zwierciadeł wielokrotnie kierowana i ogniskowana ponownie na dysku, przekazując kolejną część swojej energii na jego wzbudzenie (rys. 1). Taki system wzbudzania elementu czynnego pozwala uzyskać efektywność optyczną lasera na poziomie ponad 50%, a to przekłada się na wysoką (ok. 25%) całkowitą sprawność urządzenia (*wallplug efficiency*).

Przepływ wygenerowanego ciepła w kryształach dysku, ze względu na jego geometrię i sposób oświetlenia laserem diodowym, następuje w jednym kierunku – wzdłuż osi optycznej wiązki i rezonatora. Temperatura na powierzchni przekroju dysku w miejscu oświetlenia jest praktycznie stała. Brak różnic temperatury na przekroju dysku powoduje wyeliminowanie



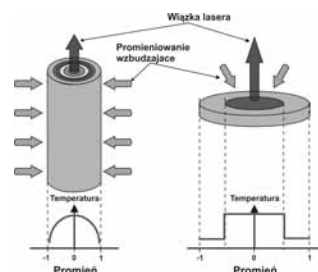
Rys. 1. Laser Yb:YAG z elementem czynnym w kształcie dysku: a) schemat rezonatora, b) rezonator lasera dyskowego z serii TruDisk [1]

Fig. 1. Laser Yb:YAG with the active element in the disk shape: a) resonator scheme, b) resonator of disk laser TruDisk [1]

niekorzystnego zjawiska deformacji termicznej kryształu. Dzięki temu jakość wiązki laserowej (stopień rozbieżności) tylko w niewielkim stopniu zależy od mocy emitowanego promieniowania i jest znacznie lepsza niż w przypadku laserów Nd:YAG z elementem czynnym w kształcie pręta pompowanych lampowo (rys. 2). Ze względu na stosunkowo duży obszar wzbudzania i bardzo wydajne chłodzenie, gęstość mocy promieniowania laserowego na powierzchni kryształu dysku w czasie jego pompowania jest znacząco mniejsza niż wartość krytyczna gęstości mocy, która mogłaby spowodować jego zniszczenie.

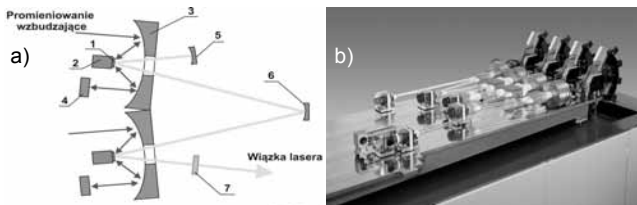
Promieniowanie laserowe jest wyprowadzane z obszaru rezonatora przez centralny otwór w zwierciadle parabolicznym i zwierciadło wyjściowe, które częściowo przepuszcza promieniowanie laserowe (rys. 1, 3). W laserach dyskowych zwierciadła wyjściowe mają znacznie wyższą procentowo zdolność odbicia promieniowania, a energia zgromadzona w obszarze rezonatora w stosunku do mocy wiązki wyjściowej jest znacznie większa niż w przypadku laserów włóknowych oraz klasycznych laserów Nd:YAG z elementem czynnym w kształcie pręta. Ta cecha rezonatora laserów dyskowych powoduje, że są one znacznie mniej podatne, niż inne typy laserów, na uszkodzenia w przypadku pojawienia się zjawiska odbicia powrotnego wiązki laserowej od materiału obrabianego, np. w przypadku spawania lub cięcia elementów silnie odbijających promieniowanie laserowe (aluminium lub miedź). Powrót wiązki laserowej nawet o znacznej mocy do rezonatora powoduje tylko relatywnie niewielki – bezpieczny dla trwałości rezonatora – wzrost mocy wiązki laserowej w samym rezonatorze.

W ostatnich latach obserwowany jest ciągły rozwój i doskonalenie konstrukcji laserów dyskowych przeznaczonych do obróbki materiałów. Producenci laserów dyskowych nieustannie dążą do zwiększenia mocy wiązki laserowej z pojedynczego dysku. Obecnie (2010 r.) w oferowanych do zastosowań technologicznych laserach możliwe jest uzyskanie z jednego dysku ok. 5,5 kW mocy wiązki laserowej. Teoretyczne obliczenia wskazują, że nie ma zasadniczych przeszkód do uzyskania 30 kW z pojedynczego dysku [3]. Moc uzyskanej wiązki laserowej zależy bezpośrednio od mocy promieniowania wzbudzającego, czyli od mocy



Rys. 2. Rozkład temperatury na przekroju elementu czynnego lasera Nd:YAG w kształcie pręta wzbudzanego lampami (z lewej) oraz lasera dyskowego (z prawej) [2, 3]

Fig. 2. Temperature distribution on cross section of the active element in the rod shape of Nd:YAG lamp pumped laser (left) and disk laser (right) [2, 3]



Rys. 3. Rezonator wielodyskowy: a) schemat łączenia dysków, (1 – dysk, 2 – radiator chłodzący, 3 – zwierciadło paraboliczne, 4 – zwierciadło tylne, 5 – zwierciadło odbijające, 6 – zwierciadło załamujące, 7 – zwierciadło wyjściowe b) generator promieniowania lasera dyskowego z czterema dyskami [1]

Fig. 3. The multidisk resonator: a) disk connection scheme, b) beam generator of disk laser with four disk 1 – disk, 2 – heat sink, 3 – parabolic mirror, 4 – rear mirror, 5 – end mirror 6 – bending (folding) mirror, 7 – output mirror

laserów diodowych emitujących promieniowanie wzbudzające. Zwiększenie mocy lasera dyskowego można uzyskać również, zestawiając ze sobą kilka dysków na jednym torze optycznym. Teoretycznie możliwe jest zestawienie dowolnej liczby dysków. W praktyce nie stosuje się aktualnie więcej niż czterech dysków wchodzących w skład rezonatora (rys. 3).

Na rynku oferowana jest obecnie cała gama laserów w różnych zakresach mocy i jakości wiązki (tabl. I i II, rys. 4). Produkowane są lasery dyskowe o maksymalnej mocy wiązki laserowej ok. 16 kW przy parametrze jakości wiązki $BPP \leq 8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$. Taka jakość wiązki umożliwia przesyłanie jej światłowodem o średnicy rdzenia 200 μm , a w laserach o mocy 4 kW z elementem

Tablica I. Typy laserów dyskowych z serii DS produkowanych przez Rofin-Sinar Laser GmbH [4]

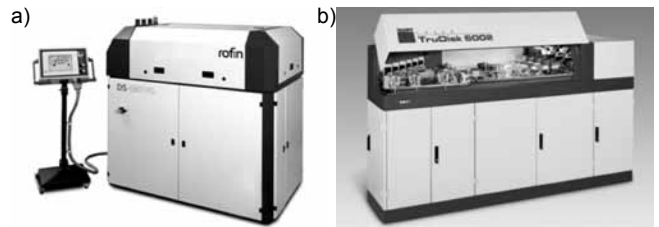
Table I. Types of DS disk lasers produced by Rofin-Sinar Laser GmbH [4]

Typ lasera	Moc lasera, W	Jakość wiązki mm · mrad	Minimalna średnica światłowodu, μm
DS 015 HQ	1500	8	150
DS 020 HQ	2000	10	200
DS 040 HQ	4000	10	200

Tablica II. Typy laserów dyskowych z serii TruDisk produkowanych przez Trumpf GmbH + Co. KG [5]

Table II. Types of TruDisk disk lasers produced by Trumpf GmbH + Co. KG [5]

Typ lasera	Moc lasera, W	Jakość wiązki mm · mrad	Minimalna średnica światłowodu μm
TruDisk 1000	1000	2	50
TruDisk 2001	2000	4	100
TruDisk 2002	2000	8	200
TruDisk 2602	2600	8	200
TruDisk 3302	3300	8	200
TruDisk 4002	4000	8	200
TruDisk 8002	8000	8	200
TruDisk 16002	16000	8	200
TruDisk 16003	16000	12	300



Rys. 4. Współczesne lasery dyskowe do zastosowań przemysłowych: a) firmy Rofin-Sinar – DS 030 HQ, $P = 3 \text{ kW}$, $BPP \leq 10 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ [4], b) firmy Trumpf – TruDisk 6002, $P = 6,6 \text{ kW}$, $BPP \leq 8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ [5]

Fig. 4. The modern disk lasers for industrial applications: a) Rofin-Sinar – DS 030 HQ, $P = 3 \text{ kW}$, $BPP \leq 10 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ [4], b) Trumpf – TruDisk 6002, $P = 6,6 \text{ kW}$, $BPP \leq 8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ [5]

czynnym w kształcie pręta pompowanych lampowo lub diodowo wymagany jest światłowód o średnicy rdzenia odpowiednio 600 μm i 400 μm . Dla mniejszych mocy (np. 2 kW) dostępne są również lasery dyskowe o jakości wiązki laserowej $BPP \leq 4 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ umożliwiające prowadzenie wiązki laserowej światłowodem o średnicy 100 μm . Doskonała jakość wiązki oraz duża moc promieniowania laserowego umożliwiają zastosowanie tego typu laserów w precyzyjnych przecinarkach laserowych i wysokowydajne cięcie bardzo szerokiej gamy materiałów konstrukcyjnych, w tym również takich, które do tej pory były uznawane za bardzo trudne do cięcia laserem, np. miedź i jej stopy.

W przypadku spawania laserowego, przy stałej mocy lasera, zmniejszenie średnicy światłowodu umożliwia zmniejszenie średnicy plamki ogniska wiązki przy zachowaniu tej samej długości ogniskowej soczewki skupiającej lub zwiększenie długości ogniskowej soczewki skupiającej i długości przewężenia w obszarze ogniska wiązki laserowej przy zachowaniu tej samej średnicy ogniska wiązki laserowej. Z punktu widzenia zastosowań spawalniczych jest to bardzo korzystne, ponieważ pozwala uzyskać większą gęstość mocy w obszarze plamki lub stworzyć układy ogniskujące z soczewkami o długiej ogniskowej, które umożliwiają prowadzenie procesu w miejscach trudno dostępnych.

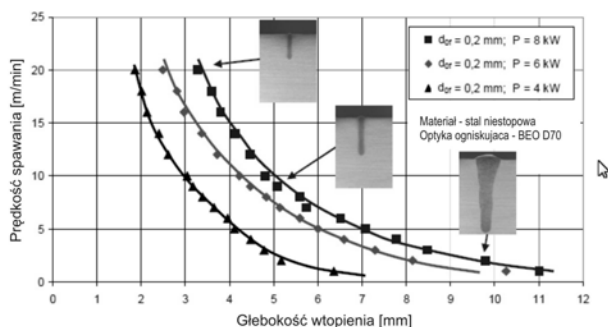
Obecnie lasery dyskowe są konstrukcjami, które w warunkach przemysłowych umożliwiają ich wykorzystanie w różnorodnych systemach spawalniczych, takich jak systemy zrobotyzowane, maszyny CNC i inne. Lasery te są zazwyczaj wyposażone w zintegrowany system rozprowadzania wiązki laserowej, który umożliwia wyprowadzenie kilku światłowodów (o dużym zakresie średnic) z jednego rezonatora i obsługę kilku stanowisk laserowych, maksymalnie wykorzystując czas pracy źródła. Lasery te są wyposażone w systemy sterowania najnowszej generacji, pozwalające kontrolować i monitorować zarówno pracę samego źródła, jak i zintegrowanej z nim optyki. Moc wiązki może być precyzyjnie regulowana i modulowana w zależności od wymagań procesu i trajektorii obróbki, a programy zawierające parametry wiązki i warianty ścieżek optycznych mogą być magazynowane.

Spawanie różnymi technikami z wykorzystaniem laserów dyskowych

Wysoka jakość wiązki i duży zakres mocy laserów dyskowych umożliwiają prowadzenie procesu spawania z głębokim wtopieniem i z wysoką wydajnością, a uzyskane spoiny mają bardzo dobre i korzystne parametry kształtu (równoległe ścianki przy dużej głębokości wtopienia). Przykłady możliwości wybranych typów laserów dyskowych przy spawaniu stali ilustruje rysunek 5.

Zakres mocy, jakość wiązki, zaawansowane systemy sterowania współczesnych laserów dyskowych pozwalają wykorzystać je w procesach spawalniczych w bardzo szerokim zakresie. Lasery dyskowe mogą być zastosowane do spawania zarówno techniką z jeziorciem, jak i techniką z głębokim przetopieniem (techniką z oczkiem spoiny). Mogą być wykorzystywane również w procesie spawania podwójną wiązką (*bifocal welding*), spawania ze spoiwem w postaci drutu, spawania hybrydowego, spawania wiązką skanującą, lutospawania, a także do procesów cięcia i napawania.

Doceniając zalety i innowacyjność laserów dyskowych jako nowoczesnego uniwersalnego źródła ciepła w spawalnictwie, w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach przygotowano projekt w ramach działania 2.1 Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka *Rozwój potencjału badawczego Laboratorium Technologii Laserowych Instytutu Spawalnictwa*. Aktualnie w ramach tego projektu przeprowadzana jest modernizacja istniejącego stanowiska do spawania i cięcia laserowego. Zrobotyzowane stanowisko do spawania laserowego zostało wyposażone w najnowocześniejszy laser dyskowy firmy Trumpf TruDisk 12002 o mocy 12 kW. Laser ten współpracuje z robotem przemysłowym KUKA KR30 HA, na kiści którego można umieszczać szereg głowic technologicznych przeznaczonych do różnych procesów technologicznych. Na wyjściu z rezonatora podłączone są cztery światłowody o średnicach 200, 300, 400 i 600 μm . Podłączenie różnych światłowodów do głowicy technologicznej stwarza możliwość prostego sposobu regulacji plamki ogniska



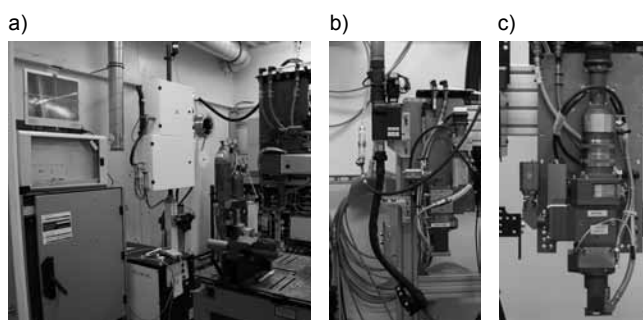
Rys. 5. Przykładowe zależności prędkości spawania i głębokości wtopienia przy spawaniu laserem dyskowym stali dla różnych poziomów mocy [6]

Fig. 5. Welding speed vs. penetration depth of disk laser welding of steel with different power range [6]

wiązki laserowej, bez konieczności zmiany ustawień układu optycznego głowicy. Stanowisko to jest aktualnie wyposażone w specjalistyczne głowice i moduły do spawania ww. specjalnymi technikami spawania laserowego (rys. 6).

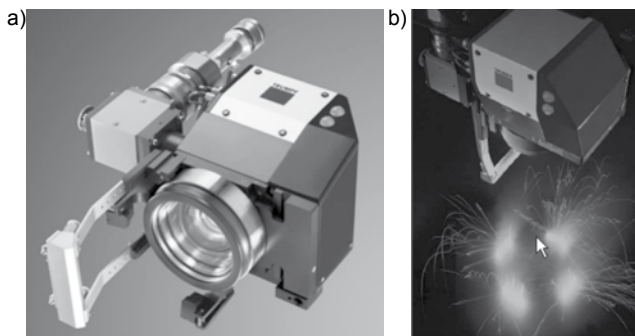
W przypadku zastosowania spawania hybrydowego laser + MIG, równoczesne oddziaływanie łuku elektrycznego i wiązki laserowej w tym samym miejscu i czasie pozwala na: spawanie materiałów zestawionych ze szczeliną (mniejsza dokładność przygotowania brzegów materiałów łączonych); modyfikację składu chemicznego spoiny; podniesienie wydajności procesu spawania.

Spawanie wiązką promieniowania laserowego ogniskowaną w dwóch punktach wpływa na odmienną dynamikę tworzącej się przy spawaniu kapilary i rzutuje na mechanizm formowania się spoiny oraz prawdopodobieństwo powstawania niezgodności. Odpowiednio dobrana odległość pomiędzy dwoma ogniskami powoduje utworzenie się jednej kapilary, na którą oddziałują dwie wiązki laserowe. Kapilara przyjmuje kształt elipsy wydłużonej zgodnie z kierunkiem położenia dwóch ognisk wiązek laserowych i proporcjonalnie do odległości między wiązkami. W wyniku zmiany kształtu kapilary zmienia się rozkład temperatury w złączu, wpływając na szybkość i kierunek odprowadzania ciepła. Zmniejszenie się gradientu temperatur w kierunku prostopadłym do osi złącza powoduje zmniejszenie naprężeń występujących podczas krzepnięcia metalu i zmniejszenie podatności spawanego materiału na pojawienie się pęknięć krystalizacyjnych. Zwiększenie przekroju kanału gazodynamicznego oraz zwiększenie objętości ciekłego metalu przy spawaniu techniką z ogniskowaniem wiązki w dwóch punktach stabilizują proces, ułatwiając odgazowanie tworzącej się spoiny. Spawanie ze spoiwem w postaci drutu pozwala z kolei precyzyjnie wpływać na skład chemiczny i geometrię spoiny, stwarzając możliwość wykonywania szeregu unikatowych złączy.



Rys. 6. Wnętrze kabiny stanowiska zrobotyzowanego do spawania laserem dyskowym zainstalowanego w Instytucie Spawalnictwa: a) głowica spawalnicza CFO zainstalowana na kiści robota, sterownik robota i moduł podawania drutu, b) głowica do spawania hybrydowego, c) głowica do spawania wiązką ogniskowaną w dwóch punktach – D70 Bifocal f 200 mm z regulacją odległości ognisk

Fig. 6. The interior of the cabin of station with robot and disk laser for welding in Welding Institute: a) CFO welding head mounted on robot, robot controller and wire feeding module, b) laser head for hybrid welding, c) laser head for bifocal beam welding – D70 Bifocal f 200 mm with focal points distance regulation



Rys. 7. Głowica do spawania wiązką skanującą: a) widok głowicy, b) spawanie

Fig. 7. Laser head for remote laser beam welding: a) the view of laser head, b) the remote welding process

Jedną z najbardziej perspektywicznych technik spawania laserowego jest obecnie intensywnie rozwijana technika spawania wiązką skanującą (*remote welding, scanner welding*) (rys. 7).

Przy odpowiedniej konstrukcji urządzeń i zastosowaniu specjalnych głowic do spawania hybrydowego, spawania ze spoiwem czy spawania podwójną wiązką, jest możliwe wykorzystanie większości laserów zarówno gazowych CO₂, jak i laserów na ciele stałym typu YAG.

W przypadku spawania wiązką skanującą podstawowym warunkiem zastosowania tej techniki jest bardzo wysoka jakość wiązki laserowej na poziomie 8 mm · mrad. Tylko niektóre typy laserów, takie jak: lasery gazowe typu SLAB, lasery włóknowe i lasery dyskowe mogą być wykorzystane do spawania tą metodą.

Podsumowanie

Dobra jakość wiązki, wysoka sprawność i fakt obecności na rynku całej gamy źródeł promieniowania o różnych mocach opartych na laserach dyskowych oraz dostępność współpracujących z tymi laserami głowic do cięcia i do spawania laserowego, w tym spawania specjalnymi technikami, czynią aktualnie lasery dyskowe jednym z najatrakcyjniejszych źródeł ciepła w spawalnictwie.

Literatura

- [1] The laser as a tool. A light beam conquers industrial production. Trumpf GmbH + Co. KG. Vogel Buch Verlag Wurtzburg. 2007.
- [2] Brockmann R., Havrilla D. (2009) Third Generation of Disk Lasers Enable Industrial Manufacturing. Laser Technik Journal, Vol. 6, No. 3, s. 26-31.
- [3] Brockmann R., Mann K. (2007) Disk Lasers Enable Industrial Manufacturing – What Was Achieved and What Are the Limits? Laser Technik Journal, Vol. 4, No. 3, s. 50-53.
- [4] Rofin-Sinar Laser GmbH. http://www.rofin.com/en/products/solid_state_lasers/disc_lasers/ds_series/. Accessed 10 May 2010.
- [5] Trumpf GmbH + Co. KG. <http://www.de.trumpf.com/produkte/lasertechnik/produkte/festkoerperlaser/scheibenlaser/trudisk.html>. Accessed 10 May 2010.
- [6] Trumpf GmbH + Co. KG. Prospekty reklamowe. TLS259kr – 28.02.2007.

W następnym numerze

Wiesław Borgosz

Początki robotyzacji w produkcji taboru kolejowego

Andrzej Siennicki

Perspektywy rozwoju robotyzacji spawania łukowego w osłonie gazowej

Wojciech Gawrysiuk, Bogdan Turek

Przykłady aplikacji zrobotyzowanych stanowisk do spawania różnych podzespołów maszyn

Dr inż. Tomasz Pfeiffer

Robotyzacja w liczbach w kraju i na świecie

Andrzej Nieroba

Technologie i urządzenia do spawania wież wiatrowych

Christian Paul

Zastosowanie sensorów

Marcin Siennicki

Zrobotyzowane stanowiska do spawania hybrydowego od 2 kg do 20 ton