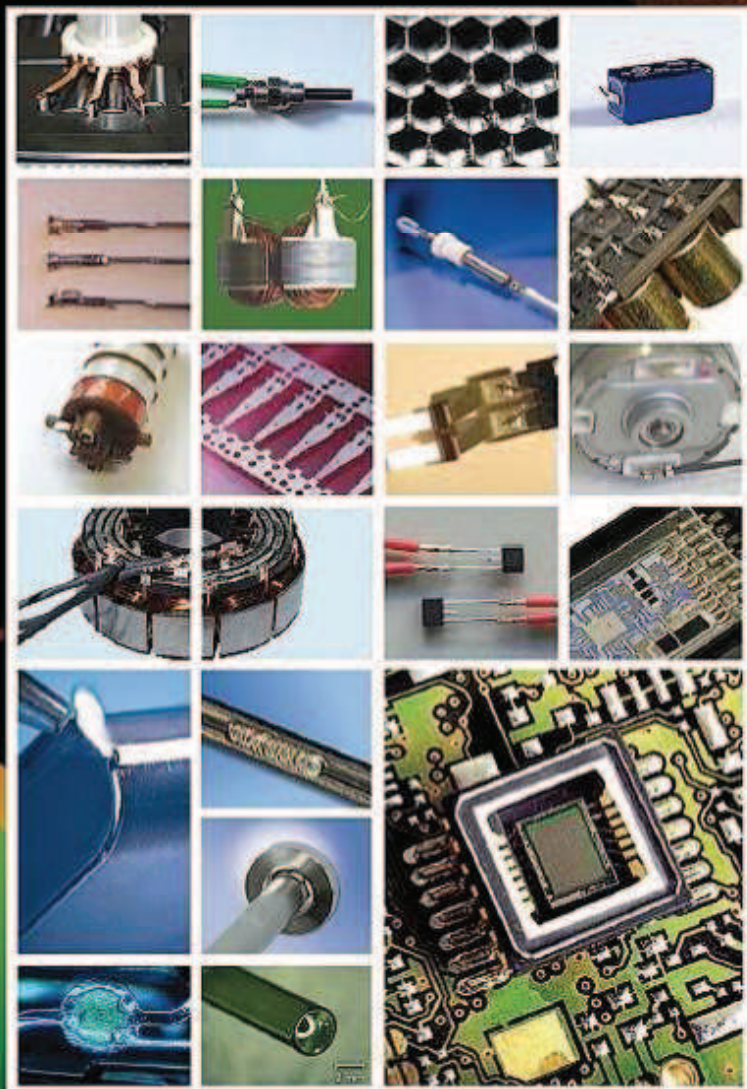


JACEK ZIMNY, PIOTR MYJAK

MIKROSPAWANIE LASEROWE W MECHATRONICE



POLSKA GEOTERMALNA ASOCJACJA • AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ I ROBOTYKI

Seria wydawnicza

PROBLEMY EKOENERGETYKI I INŻYNIERII ŚRODOWISKA®

Redaktor naukowy serii **Jacek Zimny**

POZYCJE WYDAWNICZE SERII:

1. Odnawialne źródła energii
w budownictwie niskoenergetycznym, 2010.
2. Laserowa obróbka mikrostruktur, 2011.
3. Mikrosparowanie laserowe w mechatronice, 2012.



JACEK ZIMNY

Profesor nadzwyczajny w Katedrze Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Studia, doktorat i habilitacja na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej. Wieloletnie prace badawcze oraz dydaktyczne w kraju i za granicą, w obszarze mechaniki i energetyki zasobów odnawialnych.

Koordynator i kierownik naukowy międzynarodowych i krajowych zespołów badawczo-wdrożeniowych opracowujących: innowacyjne technologie energetyczne (lasery dużej mocy w budowie i eksploatacji maszyn i urządzeń energetycznych; WAT Warszawa, Politechnika Kraków, Uniwersytet Pisa, Politechnika Kijów, ART Olsztyn, AR Kraków, Politechnika Częstochowa, AGH), urządzenia i systemy energetyki odnawialnej: elektrownie wiatrowe, wiatrowe pompy wodne (Uniwersytet Pisa, ALENIA Roma, ART Olsztyn, AR Kraków, AGH, NOWOMAG Nowy Sącz), kolektory słoneczne i fotoogniwa (AR Kraków, Politechnika Częstochowa, Zakłady Mechaniczne Tarnów), energetyka geotermalna i pompy ciepła (PAN Kraków, Polska Geotermalna Asocjacja, Uniwersytet Pisa, AGH, AR Kraków, Zakłady Mechaniczne Tanów, SeCesPol Gdańsk, Hibernatus Wadowice).

Współzałożyciel Polskiego Towarzystwa Energetyki Wiatrowej. Członek International Geothermal Association. Przewodniczący Polskiej Geotermalnej Asocjacji im. prof. J. Sokołowskiego. Wieloletni członek Komitetu Problemów Energetyki przy Prezydium PAN, Parlamentarnego Zespołu ds. Restrukturyzacji Energetyki, ekspert Sejmu RP ds. energetyki.

Autor przeszło 400 publikacji, ekspertyz, patentów i wdrożeń.

Prowadzi działalność naukowo-dydaktyczną, organizacyjną i społeczną m.in. w zakresie rozwoju gospodarczego Polski z wykorzystaniem własnych zasobów i źródeł energii, szczególnie geotermicznych, pomp ciepła oraz solarnych z uwzględnieniem współczesnych technik wytwarzania (technologie laserowe w ekoenergetyce i inżynierii środowiska) – mogących stanowić podstawę samowystarczalności i bezpieczeństwa energetycznego kraju.

Promotor powszechnego programu wdrażania: oszczędności energii, czystych technologii energetycznych oraz stałego zwiększania efektywności energetycznej i sprawności polskiej energetyki, budownictwa i transportu.

JACEK ZIMNY, PIOTR MYJAK

MIKROSPAWANIE LASEROWE W MECHATRONICE

REDAKCJA: JACEK ZIMNY

WYDANIE I

POLSKA GEOTERMALNA ASOCJACJA · AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ I ROBOTYKI

KRAKÓW 2012

Spis treści

Opiniodawca:

Prof. dr hab. inż. Ryszard Henryk Kozłowski, Politechnika Krakowska
Prof. n. dr hab. inż. Wacław Przybyło, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

Redaktor naukowy:

Plk dr inż. Mieczysław Struś, PGA, Politechnika Wrocławska

Projekt okładki:

Łukasz Buchała, Jacek Zimny

Na okładce:

????????????

Redaktor techniczny:

Krzysztof Szczotka

Korekta:

Krzysztof Szczotka

Grafika, skład, łamanie:

Piotr Myjak, Krzysztof Szczotka, Łukasz Buchała

Wydanie I, 2012, Kraków © Jacek Zimny, Kraków, 2012, All rights reserved.

Wydawca:

Polska Geotermalna Asocjacja, 30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30,
paw. B3, II p., p. 206, tel. (+48) 12 617 34 13, www.pga.org.pl

Współpraca:

- Szkoła Ochrony i Inżynierii Środowiska AGH, 30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30,
Paw. B3, II p., p. 202, tel.: (12) 617 39 22, www.szkoła.imir.agh.edu.pl
- Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska,
AGH, 30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30, paw. B3, II p., tel. (+48) 12 617 34 13

Druk i oprawa:

BUCHERS
DESIGN
DESIGN. PRINT PRODUCTION
www.buchersdesign.pl

ISBN 978-83-63318-01-7

Przedmowa.....	7
Streszczenie.....	9
Wykaz ważniejszych oznaczeń	10
1. Wprowadzenie	12
1.1. Ważność problematyki mikrosparowania laserowego.....	12
1.2. Cel opracowania.....	12
1.3. Zakres pracy	13
2. Analiza literatury, przegląd problematyk badawczych, umiejscowienie problemu	14
2.1. Stan badań na podstawie opublikowanych prac.....	14
2.2. Działanie lasera	17
2.2.1. Podział laserów w zależności od ośrodka czynnego.....	20
2.2.4. Podział laserów ze względu na ich zastosowanie	22
2.3. Lasery stosowane w przemyśle	24
2.3.1. Lasery Nd:YAG	24
2.3.2. Lasery gazowe (CO ₂).....	32
2.3.3. Lasery ekscymerowe (excimer lasers).....	36
2.3.4. Lasery neodymowe Nd:glass (Nd:szkło).....	38
2.3.5. Lasery rubinowe	39
2.4. Zagadnienia spawania laserowego	41
2.4.1. Modele spawania laserowego	47
2.4.2. Spawanie przewodnościowe (kondukcyjne).....	52
2.4.3. Spawanie głębokie (kapilarne).....	55
2.4.4. Parametry spawania laserowego.....	60
2.4.5. Spawalność laserowa materiałów	70
2.4.6. Rodzaje połączeń wykonanych laserowo	75
2.4.7. Gazy laserowe.....	76
2.5. Spawanie laserowe w przemyśle	78
2.5.1. Spawanie laserowe przewodnościowe.....	80
2.5.2. Spawanie laserowe głębokie.....	81
2.5.3. Lutospawanie laserowe.....	83
2.6. Obrabiarki laserowe	85
2.6.1. Spawarki laserowe	88
2.6.2. Dodatkowe wyposażenie spawarek laserowych	99
2.6.3. Podzespoły obrabiarek laserowych.....	100
3. Analiza technologii wykonania termopar	111
3.1. Termopara – zasada działania	111
3.2. Technologia wykonywania czujników termopar.....	112

4. Mikrospawanie laserowe – badania własne; metodyka, warunki eksperymentu	127
4.1. Materiały obrabiane	133
4.2. Stawowisko badawcze	135
5. Wyniki badań, analiza	137
5.1. Badania wytrzymałości spoin termoelektrod	138
5.1.1. Wyniki badań wytrzymałości spoin łączących termoelektrody chromel-alumel Ø 0,45 mm	138
a) Wpływ warunków obróbki na największą siłę osiągalną w próbie rozciągania spoiny P_m [N]	138
b) Wpływ warunków obróbki na granicę wytrzymałości na rozciąganie R_m [MPa]	165
c) Wpływ warunków obróbki laserowej na gęstość mocy w ognisku q [W/mm ²]	185
d) Makrogeometria powierzchni spawanych termoelektrod termopar	208
5.1.2. Wyniki badań wytrzymałości spoin łączących termoelektrody chromel-alumel Ø0,68 mm	211
a) Wpływ warunków obróbki na największą siłę osiągalną w próbie rozciągania spoiny P_m [N]	211
b) Wpływ warunków obróbki na granicę wytrzymałości na rozciąganie R_m [MPa]	237
c) Wpływ warunków obróbki laserowej na gęstość mocy w ognisku q [W/mm ²]	257
d) Makrogeometria powierzchni spawanych termoelektrod termopar	280
5.1.3. Wyniki badań wytrzymałości spoin łączących termoelektrody chromel-alumel Ø0,9 mm	282
a) Wpływ warunków obróbki na największą siłę osiągalną w próbie rozciągania spoiny P_m [N]	282
b) Wpływ warunków obróbki na granicę wytrzymałości na rozciąganie R_m [MPa]	309
c) Wpływ warunków obróbki laserowej na gęstość mocy w ognisku q [W/mm ²]	330
d) Makrogeometria powierzchni spawanych termoelektrod termopar	331
5.2. Technologia wykonania osłon czujników wg. własnych badań	335
5.2.1. Podsumowanie badań zespołów gilz przewężonych	352
6. Wnioski	354
7. Literatura	356
8. Streszczenie w języku angielskim	360
9. Streszczenie w języku rosyjskim	360

Przedmowa

Niniejsza praca dotyczy podstaw teorii i technologii laserowego spawania elementów części maszyn, budowy obrabiarek (spawarek) laserowych oraz badań mikrospawania laserowego spoin termoelektrod oraz elementów konstrukcyjnych czujników temperatury.

Zawiera rezultaty badań prowadzonych w ciągu ostatnich lat przez autora i Współpracowników, w wiodących ośrodkach naukowo-badawczych z tego zakresu w kraju (Wojskowa Akademia Techniczna – Warszawa, Politechnika Krakowska, Instytut Obróbki Skrawaniem – obecnie Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie) oraz zagranicą (Uniwersytet w Pizie – Włochy, w ramach wieloletniej Umowy Międzynarodowej o Współpracy Naukowej i Technicznej Polska – Italia, Politechnika w Kijowie – Laboratorium Technologii Laserowych, Instytut Spawalnictwa im. Patona w Kijowie).

Obróbka laserowa należy do intensywnie rozwijających się współczesnych metod kształtowania elementów maszyn, urządzeń i konstrukcji mechanicznych oraz ich jakości użytkowej m. in. w energetyce konwencjonalnej, jak również w ekoenergetyce i inżynierii środowiska.

Mimo stałego rozwoju zastosowań różnych urządzeń laserowych (drążarki, przecinarki, spawarki), stałym niedostatkiem są zagadnienia teoretyczne i technologiczne, wynikające z braku pełnego poznania zjawisk fizycznych i cieplnych towarzyszących procesowi spawania laserowego i jego skutków.

Książka składa się z 7 rozdziałów, poświęconych wprowadzeniu Czytelnika w kolejne zagadnienia: teorii, technologii spawania laserowego oraz budowy spawarek laserowych; część drugą pracy stanowią oryginalne rezultaty badań własnych dotyczących analizy technologii wykonywania w Polsce termopar oraz czujników do pomiarów temperatury z zastosowaniem mikrospawania laserowego.

Cechą szczególną tych badań była ich realizacja i ocena wyników zgodnie z naukowymi podstawami planowania i opracowywania rezultatów eksperymentów.

Rozdział 1. zawiera wprowadzenie, uzasadnienie ważności analizowanej problematyki, cel i zakres pracy.

Rozdział 2. dotyczy stanu wiedzy w zakresie budowy i typów laserów stosowanych w przemyśle, problemów technologicznych spawania laserowego, ich modelowania, symulacji i optymalizacji komputerowej, wytycznych i zaleceń inżynierskich w budowie i eksploatacji spawarek różnych typów, mocy, rodzaju przetopu (głęboki, płytki).

Rozdział 3. dotyczy analizy technologii konwencjonalnych wykonania termometrów termoelektrycznych.

Rozdział 4. obejmuje metodologię i metodykę badań własnych, warunki eksperymentu, materiały badane, opis stanowiska badawczego.

W rozdziale 5. przedstawiono wyniki badań własnych procesu i skutków mikrospawania laserowego termoelementów termopar oraz obudów czujników temperatury różnych średnic – wykorzystując do tego celu współczesne metody modelowania matematycznego, teorii eksperymentu w badaniach stosowanych, identyfikacji złożonych procesów, symulacji komputerowej obiektu badań, optymalizacji warunków obróbki laserowej z uwagi na kryteria wytrzymałościowe spoiny i makrogeometrię powierzchni.

Rozdział 6. zawiera wnioski z badań własnych i wytyczne projektowe.

Rozdział 7. stanowi obszerna literatura z zakresu tematu.

Niniejsza publikacja jest rozszerzeniem i uzupełnieniem problematyki zastosowań technologii laserowych w budowie i eksploatacji maszyn zawartej w książce „Laserowa obróbka mikrootworów”, wydanej w 2011 r. w tej serii wydawniczej [38].

Autorzy

Streszczenie

Na podstawie analizy stanu wiedzy z zakresu teorii i technologii spawania laserowego, przedstawiono kolejno informacje dotyczące: laserów stosowanych w technologii maszyn (rozdział 2.3.), zagadnień spawania laserowego (rozdział 2.4.), metod spawania laserowego w przemyśle (rozdział 2.5.) oraz obrabiarek laserowych (rozdział 2.6.).

W rozdziale 3. dokonano analizy i oceny dotychczasowych technologii wykonania termopar, proponując ich zamianę na technologie mikrospawania laserowego.

Rozdział 4 zawiera program, metodykę i warunki eksperymentu - szerokiego zakresu badań spoin termopar oraz czujników temperatury wykonanych spawaniem laserowym.

W rozdziale 5. określono: wpływ charakterystyki impulsu laserowego na wartość gęstości mocy w ognisku, a także wpływ gęstości mocy na jakość mikrospawania laserowego badanych materiałów konstrukcyjnych (wytrzymałość spoin, makrogeometria powierzchni) o różnej średnicy. Opracowano zasady doboru parametrów mikrospawania laserowego do wykonania termopar i osłon czujników temperatury.

Wnioski z badań własnych zawiera rozdział 6., zaś obszerną literaturę z zakresu tematu książki zawiera bibliografia, literatura – rozdział 7.

Wykaz ważniejszych oznaczeń

Oznaczenie	Jednostka	Nazwa
κ	[W/mK]	współczynnik przewodzenia ciepła materiału
λ	[m]	długość fali
ξ	[m]	odległość rozpatrywanego punktu od źródła promieniowania
ρ	[kg/m ³]	gęstość
ρ_{Fr}	[-]	współczynnik Fresnela zależny od kąta padania wiązki na ściankę
a	[m ² /s]	dyfuzyjność cieplna, $a = \frac{\kappa}{\rho c_p}$
c	[m/s]	prędkość światła w próżni ($c = 2,998 \cdot 10^8$ m/s)
c_p	[J/kgK]	ciepło właściwe ciała przy stałym ciśnieniu
d	[m]	grubość spawanej próbki
d_p, d_0	[m]	średnica plamki w ognisku
g	[m/s ²]	przyspieszenie ziemskie
h	[Js]	stała Plancka ($h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Js)
I_a	[W]	zaabsorbowana przez materiał moc lasera
I_n	[W]	moc promieniowania po n_{mr} ilości odbić od ścianek spawanego materiału
n_{mr}	[-]	ilość odbić wiązki od ścianek kanału powstałego w procesie spawania materiału
P	[W]	moc lasera

P_v	[W]	moc dla której temperatura osiąga temperaturę wrzenia materiału T_v
r_w	[m]	promień wiązki
q	[W/m ²]	gęstość mocy
R	[-]	refleksyjność powierzchni
$R(0)$	[m]	promień wiązki w ognisku
t	[s]	czas
t_i	[s]	czas impulsu laserowego
T	[K]	temperatura
T_m	[K]	temperatura topnienia
T_v	[K]	temperatura wrzenia materiału
T_0	[K]	temperatura początkowa
v	[m/s]	prędkość spawania
W	[m]	całkowita szerokość spoiny
z	[m]	głębokość przekazywania energii
Z_m	[m]	głębokość osiągnięta przez stopiony materiał
Z_v	[m]	głębokość spoiny
Z_0	[m]	głębokość penetracji wiązki w procesie laserowego spawania

1. WPROWADZENIE

Spawanie laserowe pod wieloma względami ma istotną przewagę nad tradycyjnymi technologiami. Do zalet zaliczyć można najwyższą jakość spoiny, brak konieczności stosowania dodatkowych materiałów topliwych, małą strefę wpływu ciepła, brak konieczności dodatkowej obróbki spoiny, łatwość automatyzacji i robotyzacji procesu, estetyczny wygląd, niskie koszty.

Dzięki temu, możliwe jest stosowanie, w budowie i eksploatacji maszyn, materiałów o różnych właściwościach fizyko – mechanicznych, których połączenie innymi technologiami byłoby bardzo trudne lub wręcz niemożliwe.

Omawiany problem jest zagadnieniem wciąż nowym, z uwagi na możliwe szerokie zastosowania w przemyśle high technology, charakteryzującym się miniaturyzacją konstrukcji, oszczędnością materiałów i energii; istotnym zwiększeniem efektywności technicznej, energetycznej i ekonomicznej.

Mikrospawanie laserowe różnych materiałów, w objętości przetopu rzędu 1-2 mm³, jest nadal w Polsce mało rozpowszechnioną technologią w budowie i eksploatacji maszyn, mniej znaną i stosowaną od cięcia laserowego i wykonywania otworów [38].

1.1. Ważność problematyki mikrospawania laserowego

Nieustanny rozwój nauki i techniki, innowacyjnych kierunków inżynierii mechanicznej i materiałowej wspomagany automatyzacją i robotyzacją produkcji – powodują konieczność stałych badań podstawowych i stosowanych również w zakresie zastosowań współczesnych laserów technologicznych (LBM) m. in. w mechanice precyzyjnej i mechatronice.

Istnieje kilka ośrodków akademickich i przemysłowych w Polsce zainteresowanych wdrożeniem technologii laserowych; do nich należy zespół naukowców Wojskowej Akademii Technicznej i Politechniki w Warszawie, a także m. in. silny ośrodek krakowski reprezentowany przez Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, Instytut Odlewnictwa, Politechnikę, Akademię Górniczo-Hutniczą. Do tego grona należy dołączyć szereg firm wdrażających technologie laserowe m. in. Krakowską Fabrykę Aparatów Pomiarowych (KFAP), Wytwórnię Sprzętu Komunikacyjnego (WSK), Apator.

1.2. Cel opracowania

Jak dotychczas, większość publikowanych prac z zakresu tematu skupia się na teoretycznych i technologicznych podstawach rozwoju zastosowań różnych typów laserów w mechanice i budowie maszyn.

Zdecydowanie brakuje pozycji literaturowych, które mają charakter kompleksowy, łączący teorię z praktyką – w szczególności metodycznie opracowanych prze-

wodników, poradników – informujących Czytelników o różnym poziomie wiedzy w zakresie doboru typów laserów do danej technologii; parametrów procesu; optymalizacji; automatyzacji i robotyzacji procesu z uwagi na określone kryteria, dla spawania różnych materiałów.

Niniejsza praca jest częścią wieloletnich badań i wdrożeń prowadzonych w ciągu ostatnich lat przez autora i Współpracowników w wiodących ośrodkach naukowo-badawczych z tego zakresu, w kraju (Wojskowa Akademia Techniczna, Politechnika Krakowska, Instytut Zaawansowanych Technik Wytwarzania, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie) oraz zagranicą (Uniwersytet w Pizie – Włochy, w ramach wieloletniej Umowy Międzynarodowej o Współpracy Naukowej i Technicznej Polska – Italia, Politechnika w Kijowie – Laboratorium Technologii Laserowych, Instytut Spawalnictwa im. Patona w Kijowie).

Dotyczy podstaw teoretycznych oraz technologii mikrospawania laserowego materiałów, stosowanych w produkcji termoelementów (termopary w metrologii ciepła) o średnicach do 1 mm, oraz materiałów z grupy H18N9T stosowanych w produkcji osłon czujników termoelementów.

Dla określenia optymalnych warunków procesów technologicznych mikrospawania laserowego różnych materiałów o różnych średnicach dla różnych zastosowań – z uwagi na dużą liczbę parametrów zmiennych mających istotny wpływ na przebieg i skutki spawania laserowego, zastosowano współczesne metody modelowania, optymalizacji i symulacji komputerowej złożonych procesów z wykorzystaniem nowoczesnej statystyki matematycznej, a w szczególności teorii eksperymentu oraz statystycznych metod planowania i opracowania wyników badań. Dla przedstawienia graficznego rezultatów pracy, w układzie współrzędnych 2D i 3D wykorzystano współczesne programy komputerowe m. in. Statistica, MathCAD, Surfer, Matlab.

1.3. Zakres pracy

Zgodnie z przyjętą koncepcją pracy, mającą zawierać kompendium wiedzy z zakresu teorii, technologii dotychczas stosowanych w produkcji termopar i nowych technologii laserowych w ich aktualnym wytwarzaniu, przeprowadzono szeroki program badań eksperymentalnych zmierzających do określenia modelu matematyczno – fizycznego oraz optymalizacji procesu mikrospawania laserowego, termoelektrod z materiałów m. in. platyna-tor, platyna-iryd, chromel-alumel, zweryfikowanego doświadczalnie. W pracy przedstawiono szczegółowe wyniki badań jakościowych i ilościowych tej ostatniej pary połączeń materiałów, w szczególności badania wytrzymałościowe spoin termoelektrod oraz makrogeometrię powierzchni spawanych termoelektrod termopar. Rezultatem poznawczym i użytecznym pracy jest oryginalna własna technologia mikrospawania laserowego kompletnego zestawu czujników termoelektrycznych do pomiarów temperatury.

2. ANALIZA LITERATURY, PRZEGLĄD PROBLEMATYK BADAWCZYCH, UMIEJSCOWIENIE PROBLEMU

2.1. Stan badań na podstawie opublikowanych prac

W literaturze dotyczącej tematyki laserowej i spawania laserowego wyodrębnić można dwie zasadnicze grupy:

- a) I grupa: prace o charakterze teoretycznym – traktują o podstawach fizycznych procesów LBM (Laser Beam Machining – laserowej obróbki materiałów) i obejmują wiele dziedzin nauki, jak materiałoznawstwo, termodynamikę, fizykę ciała stałego, analizę komputerową. Zajmują się także opisem matematycznym zjawisk towarzyszących oddziaływaniu wiązki lasera na powierzchnię materiałów [1; 5; 13; 14; 17; 22; 28; 29; 32; 34; 37; 79].
- b) II grupa: prace o charakterze eksperymentalnym – zajmują się doświadczalnym badaniem wpływu parametrów obróbki laserowej, typu lasera, stanu powierzchni na stan powierzchni, spoiny po obróbce [9; 12; 18; 20; 24; 57; 58; 60; 63; 64; 67; 75; 80].

I grupa:

Wiele prac należących do grupy teoretycznych opisuje podstawy działania laserów [34], typy laserów [35], wzory na pole temperatury w pobliżu spoiny, parametry wiązki laserowej [36], wielkości wiążące te parametry z wymiarami spoiny itp.

[28] – opis fizyczny oddziaływania wiązki na powierzchnię materiału, wzory na natężenie promieniowania, wsp. absorpcji, prawo Stefana-Boltzmana, prawo Fouriera (na przewodzenie ciepła), dyfuzyjność cieplną, wykresy wpływu przyrostu temperatury na irradiancję, wzór na ciśnienie plazmy, omówienie zjawiska powstawania plazmy, usuwanie materiału (ablacja) polimerów, metali, omówienie laserowej metody CVD.

[13] – zasada działania i budowa laserów, charakterystyka wiązki generowanej przez laser, parametry wiązki i ich pomiar, zastosowanie laserów do obróbki materiałów, omówienie zasady pracy obrabiarki laserowej, w tym także znakowarki.

[34] – omówienie budowy laserów, podstawy fizyczne – fala elektromagnetyczna w próżni i w ośrodku materialnym, wiązka światła o przekroju kołowym, zasada pracy laserów impulsowych.

[17] – elementarny opis działania lasera, zagadnienia fizyki atomowej i optyki kwantowej, rodzaje rezonatorów optycznych, zagadnienia podstawowe i bardziej zaawansowane akcji laserowej, typy laserów, zastosowania laserów, w tym także w makro- i mikroobróbce materiałów (wiadomości podstawowe).

[23] – pomiary parametrów i charakterystyk energetycznych promieniowania laserowego, pomiary przestrzenno-energetycznych parametrów i charakterystyk

promieniowania laserowego; omówienie zasady działania i praw wykorzystywanych w pomiarach temperatury termoparami.

[37] – podstawy fizyczne działania laserów, szczegółowy opis dużej ilości różnych typów laserów, od gazowych, poprzez barwnikowe, na ciele stałym, półprzewodnikowe, do laserów na swobodnych elektronach.

Informacje dotyczące wykorzystanej w pracy teorii eksperymentu i statystycznej analizy danych znaleźć można w literaturze: [10; 16]. Dane dotyczące własności obrabianych materiałów zaczerpnięto z [6; 19]. Informacje na temat spawalnictwa można znaleźć w [15; 30], choć nt. spawania laserowego informacje są szczątkowe.

II grupa:

Prace te podają równania charakteryzujące obróbkę laserem otrzymywane doświadczalnie. Znajdują się w nich także badania własne autorów, zestawienia dotychczas przeprowadzanych doświadczeń z dziedziny LBM, tabele i wykresy z wielkościami charakterystycznymi dla obróbki laserowej dla różnych materiałów.

[20] – termiczne kształtowanie materiałów, podstawy fizyczne trwałych deformacji termicznych a przede wszystkim badania doświadczalne deformacji termicznych indukowanych w płytach, w tym badanie dynamiki deformacji kątowej, badanie temperatury powierzchni materiału w czasie gięcia laserowego; w badaniach stosowano próbki ze stali S235 z pokrywaniem absorberem, którego głównym składnikiem był sproszkowany grafit; wzory na sterowanie temperaturą laserowo nagrzewanej powierzchni:

Dla wiązki o przekroju kołowym o średnicy d :

$$T_s - T_0 = \frac{4AP}{\pi\kappa} \sqrt{\frac{a}{va^3}} \quad (2.1)$$

gdzie:

T_s – temperatura powierzchni pod wiązką [K],

T_0 – temperatura początkowa materiału [K],

A – współczynnik absorpcji promieniowania laserowego,

P – moc wiązki laserowej [W],

κ – współczynnik przewodnictwa ciepła [W/m²K],

a – współczynnik dyfuzji ciepła [m²/s],

v – prędkość skanowania wiązki laserowej [m/s],

d – średnica wiązki [m];

Temperatura powierzchni dla wiązki o przekroju prostokątnym $l \times b$ (b – wymiar skierowany w kierunku ruchu wiązki):

$$T_s - T_0 = \frac{2AP}{l\kappa} \sqrt{\frac{a}{\pi vb}} \quad (2.2)$$

gdzie:

b – wymiar wiązki o przekroju prostokątnym skierowany w kierunku ruchu wiązki [m],

l – drugi wymiar wiązki o przekroju prostokątnym [m];

[11] – przedstawienie historii laserów, zasady powstawania światła laserowego, omówienie własności materiałów inżynierskich (polimerów, ceramiki, stopów Cu-Ni, stali stopowych, narzędziowych, stopów tytanu, niklu, miedzi, szkła. Źródło zawiera także diagramy gęstości mocy dla obróbki laserowej metali i stopów oraz tablice z zestawieniami badań dotyczących laserowej obróbki różnych materiałów i zestawienie przydatnych wzorów w ustalaniu parametrów obróbki. W książce zawarte są również zestawienia prac dotyczących spawania laserowego kondukcyjnego i jego wykorzystania w poszczególnych gałęziach przemysłu, technologii Clearweld™, cięcia laserowego, znakowania, spawania głębokiego (wykresy gęstości energii w zależności od równoważnika węgla, charakterystyka wiązki, gazy osłonowe, rodzaje połączeń, materiały dodatkowe, cechy charakterystyczne spoin, diagramy, zastosowanie w przemyśle).

[18] – opis zasady działania, historii rozwoju, budowy laserów i własności promieniowania, omówienie nagrzewania materiałów promieniowaniem laserowym; spawanie laserowe i jego parametry, spawanie stopu Al-Li-Cu-Mg-Zr, zestawienie badań spawania laserowego różnych materiałów.

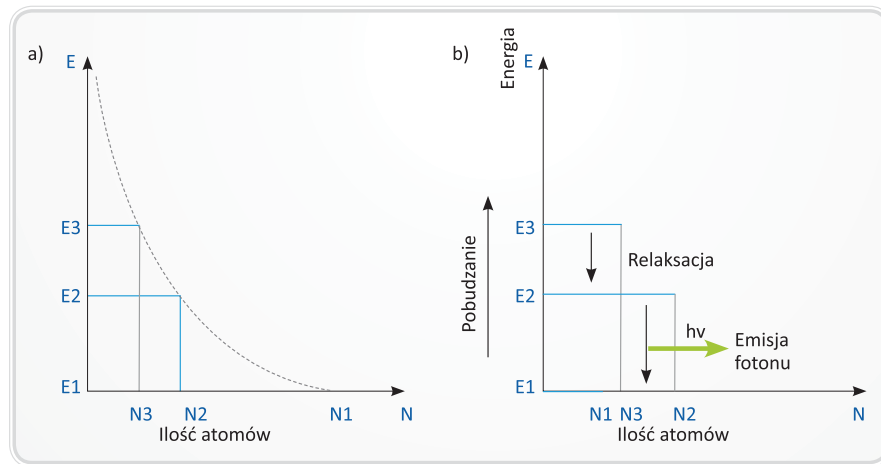
W artykułach publikowanych w kraju i zagranicą można znaleźć informacje dotyczące spawania laserowego tworzyw sztucznych [59; 60], modele numeryczne umocnienia laserowego materiałów [61], spawania laserowego superstopów [62; 65; 69; 70; 71; 73; 74; 76], stopów aluminium [78].

2.2. Działanie lasera

Kluczowymi są dwa zjawiska na których opiera się działanie lasera: inwersja obsadzeń oraz emisja wymuszona. Emisja wymuszona to proces emisji fotonów przez materię, w wyniku oddziaływania z innym fotonem. Foton emitowany przez atom i foton wywołujący emisję mają taką samą częstotliwość, fazę i polaryzację. Światło, które jest złożone z takich samych fotonów nazywane jest światłem spójnym. Gdy atom wzbudzony zderza się z fotonem o takiej częstotliwości, że jego energia kwantu jest równa różnicy energii poziomów między stanem wzbudzonym a podstawowym zachodzi tak zwana emisja wymuszona. Foton uderzający nie jest pochłaniany, lecz przyspiesza przejście atomu ze stanu wzbudzonego do podstawowego. Już w 1917 roku o tym zjawisku pisał Albert Einstein, jednak dopiero po 43 latach, w 1960 roku, amerykański fizyk T. Maiman zbudował pierwszy laser, którym był laser rubinowy.

Emisja wymuszona może zachodzić wtedy, kiedy więcej elektronów jest w stanie wzbudzonym niż w stanie podstawowym. Proces w którym elektrony przechodzą ze stanu podstawowego na wyższy poziom energetyczny, w stan wzbudzony, nazywa się inwersją obsadzeń. Aby doszło do emisji wielu fotonów jednocześnie potrzebny jest taki materiał, dla którego na pewnym poziomie wzbudzonym, czas przebywania elektronu jest dostatecznie długi. Poziom taki nazywany jest poziomem metastabilnym. Odwrócenie obsadzeń można uzyskać na kilka sposobów: za pomocą oświetlenia światłem (pompowanie optyczne), innym laserem, światłem błyskowym, wyładowaniem prądu w gazach, reakcjami chemicznymi albo poprzez tzw. rekombinację w półprzewodnikach.

Ośrodek wzmacniający lasera umieszcza się w rezonatorze, w którym promieniowanie odbija się od zwierciadła odbijającego umieszczonego na jednym końcu rezonatora a jest przepuszczane w określonym kierunku przez półprzezroczyste zwierciadło na drugim końcu. Pomiędzy zwierciadłami w rezonatorze fale są wzmacniane zgodnie ze zjawiskiem emisji wymuszonej. Równoległa wiązka światła o dużej mocy wychodząca z rezonatora przez półprzezroczyste zwierciadło ma charakterystyczne własności, odróżniające ją od innych źródeł promieniowania. Do tych własności zalicza się: spójność, polaryzację, małą rozbieżność.



Rys. 2.1. Poziomy energetyczne w atomie w stanie niewzbudzonym (a) oraz w stanie wzbudzonym (b); źródło: materiał własny

Przejście atomu z wyższego poziomu energetycznego na niższy oznacza, że elektron przechodzi z orbity bardziej oddalonej od jądra atomu na orbitę mniej oddaloną. Różnica energii E2 i E1 określa energię fotonu i równa się ona iloczynowi $h\nu$. Emisja fotonu może odbywać się na dwa sposoby: spontanicznie lub przez inny foton o takiej samej energii $h\nu$. Należy zaznaczyć, iż promieniowanie laserowe powstaje w drugim przypadku. Foton wymuszony ma ten sam kierunek, taką samą częstotliwość ν i fazę, co foton wymuszający.

Poziomy metastabilne (inaczej nazywane metatrwałymi) to wyższe poziomy energetyczne, na których atomy przebywają stosunkowo długi czas. Im dłuższy jest czas przebywania atomów na poziomach metatrwałych w stosunku do czasu przebywania na niższych poziomach energetycznych, tym zwiększają się szanse na zajęcie emisji wymuszonej.

Do podstawowych cech promieniowania laserowego zalicza się:

- *kierunkowość* – wiązka wybiegająca z lasera ma małą rozbieżność. Cechą laserów jest emitowanie minimalnie rozbieżnej wiązki bez żadnych dodatkowych urządzeń optycznych. Rozbieżność wiązki, określana jako kąt między jej skrajnymi promieniami, jest rzędu miliradiana, a ponadto można ją jeszcze zmniejszyć ponad stukrotnie [25];
- *monochromatyczność* (od słów mono – jeden i chroma – kolor) – promieniowanie elektromagnetyczne złożone jest z dokładnie jednej długości fali, w rzeczywistości czego uzyskać się nie da. Wszystkie klasyczne źródła światła wysyłają promieniowanie niemonochromatyczne, zaś lasery wysyłają promieniowanie o bardzo wysokim stopniu monochromatyczności,

- *koherentność (spójność)* – jest to cecha charakteryzująca lasery i określająca światło składające się z fotonów zgodnych w fazie. Lasery cechują dwa rodzaje koherentności: spójność czasowa i przestrzenna,
- *duża gęstość mocy* – ilość mocy przypadająca na jednostkę pola powierzchni; dla laserów może być rzędu terawatów na 1 cm^2 . Dla porównania gęstość mocy promieniowania słonecznego wynosi 7 kW/cm^2 , czyli jest kilka rzędów wielkości mniejsza niż dla promieniowania laserowego. Na przykład dysponując laserem o strumieniu mocy 5 kW który pozwala uzyskać średnicę plamki $14 \mu\text{m}$ uzyska się gęstość mocy równą 450 MW/cm^2 ;

Jeśli długość rezonatora (odległość pomiędzy zwierciadłami) wynosi L , to na podwojonej długości $2L$ musi się odłożyć całkowita wielokrotność długości fali. W rezonatorze mają szansę trwale egzystować tylko fale o długości spełniającej warunek [25]:

$$2L = n\lambda_n \quad (2.3)$$

więc:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (2.4)$$

gdzie: $n = 1, 2, 3, \dots$; w praktyce n przyjmuje bardzo duże wartości n , lecz z pewnego tylko przedziału, L – długość rezonatora, λ_n – rezonansowa długość fali;

Częstości własne rezonatorów optycznych opisuje się wzorem [25]:

$$\nu_n = \frac{c}{\lambda_n} = \frac{cn}{2L} \quad (2.5)$$

gdzie: c – prędkość światła, $c = \lambda\nu$, ν – częstość drgań, λ – długość fali,

Przyjmuje się założenie, iż wiązka laserowa posiada gaussowski rozkład natężenia na przekroju, który opisać można równaniem [9]:

$$q(r, z) = q(0, z) \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{R^2(z)}\right) \quad (2.6)$$

gdzie:

r – odległość pomiędzy badanym punktem a osią wiązki,
 z – odległość lokalnej płaszczyzny od płaszczyzny ogniska wiązki laserowej,
 $q(r, z)$ – natężenie wiązki laserowej w punkcie (r, z) ,
 $q(0, z)$ – natężenie w centralnym punkcie wiązki na płaszczyźnie z ,
 $R(z)$ – promień wiązki na płaszczyźnie z , gdzie natężenie wynosi $1/e^2$ natężenia w centrum,

$$R(z) = \sqrt{R^2(0) + (\theta z)^2} \quad (2.7)$$

gdzie θ jest połówkowym kątem spójnej wiązki laserowej.

Natężenie $q(0,z)$ określić można z wyrażenia:

$$\frac{q(0,z)}{q(0,0)} = \frac{R^2(0)}{R^2(z)} \quad (2.8)$$

gdzie $q(0,0)$ jest natężeniem na płaszczyźnie, w której następuje ogniskowanie i określane jest wzorem:

$$q(0,0) = \frac{2P_{LP}}{\pi R^2(0)} = \frac{2E_i}{\pi R^2(0) t_i} \quad (2.9)$$

gdzie P_{LP} jest mocą wiązki, E_i jest energią pojedynczego impulsu, t_i – czasem trwania impulsu.

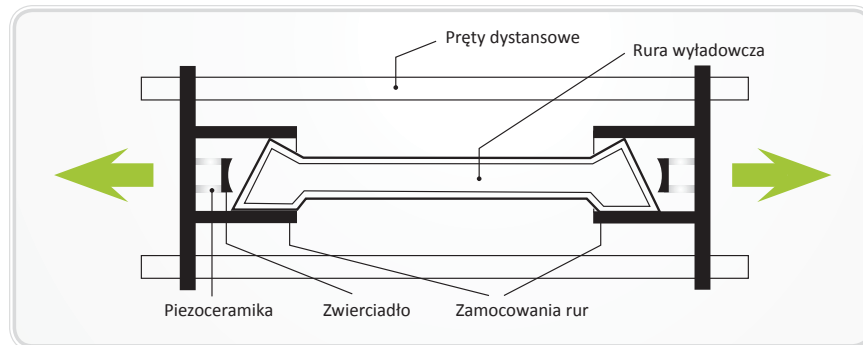
$$q(0,z) = \frac{2E_i}{\pi[R^2(0) + (\theta z)^2] \cdot t_i} \quad (2.10)$$

2.2.1. Podział laserów w zależności od ośrodka czynnego

W zależności od ośrodka czynnego lasery dzielą się na:

a) Lasery gazowe:

- He-Ne, helowo – neonowy ($\lambda = 543 \text{ nm}$ lub $\lambda = 633 \text{ nm}$), λ – długość fali,
- Ar argonowy (jonowy) ($\lambda = 458 \text{ nm}$, 488 nm , $514,5 \text{ nm}$),
- na dwutlenku węgla CO_2 , ($\lambda = 458 \mu\text{m}$),
- na tlenku węgla CO,
- azotowy ($\lambda = 337,1 \text{ nm}$),
- kryptonowy,

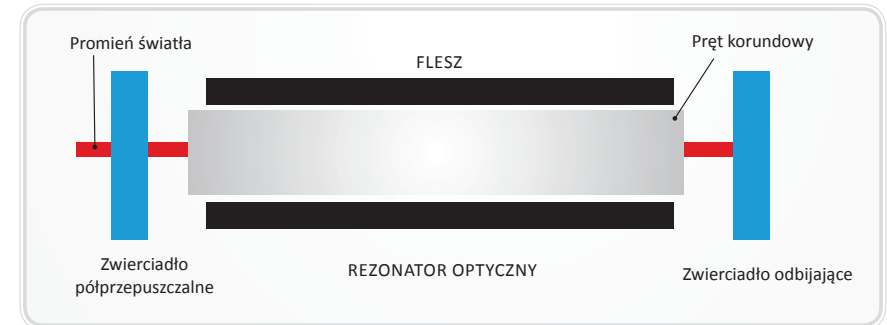


Rys. 2.2. Budowa lasera gazowego; źródło: materiał własny

Ośrodkiem czynnym laserów gazowych jest gaz, pompowane są one poprzez wyładowania elektryczne a gazy aktywne mogą być jedno-, dwu-, lub wieloskładnikowe.

b) Lasery na ciele stałym:

- rubinowy,
- neodymowy na szkle (Nd:glass),
- neodymowy na YAG (granat itrowo-aluminiowy; Nd:YAG),
- erbowy na YAG ($\lambda = 1645 \text{ nm}$) (Er:YAG),
- tulowy na YAG ($\lambda = 2015 \text{ nm}$) (Tm:YAG),
- holmowy na YAG ($\lambda = 2090 \text{ nm}$) (Ho:YAG),
- tytanowy na szafirze (Ti:szafir).



Rys. 2.3. Budowa lasera na ciele stałym na przykładzie lasera rubinowego źródło: materiał własny

W laserze rubinowym jako substancja czynna stosowany jest kryształ korundu z domieszką jonów chromu ukształtowany w walec o średnicy około 1cm i długości kilkunastu centymetrów. Laser rubinowy pompowany jest optycznie – poprzez boczne powierzchnie, przy pomocy błysków lampy flesztowej. Intensywny błysk światła powoduje wzbudzenie niektórych atomów kryształu rubinu do wyższego stanu energetycznego. Atomy te powracając do stanu podstawowego emitują fotony, które następnie pobudzają inne atomy do wysłania identycznych fotonów, co w efekcie prowadzi do gwałtownego wzrostu liczby fotonów. Powstałe fotony odbijają się wielokrotnie od zwierciadeł umieszczonych po obu stronach rezonatora optycznego, zwiększając tym samym prawdopodobieństwo wzbudzenia kolejnych atomów. Następnie wyemitowane fotony opuszczają układ optyczny przez jedno, częściowo przepuszczalne, zwierciadło, dając koherentną wiązkę światła laserowego. Lasery rubinowe pracują impulsowo, emitując światło czerwone, o długości fali równej 694,3 nm. W dzisiejszych czasach w zastosowaniach przemysłowych te lasery mają małe znaczenie.

c) Lasery cieczowe:

- barwnikowe – ośrodkiem czynnym są barwniki rozpuszczone w nieaktywnym ośrodku przezroczystym.

Lasery barwnikowe są laserami, które mogą pracować w sposób ciągły lub impulsowy. Ośrodkiem czynnym tych laserów jest roztwór barwnika w stanie ciekłym,

stałym lub w postaci pary. Barwniki są skomplikowanymi związkami organicznymi, które bardzo mocno pochłaniają światło w obszarze widzialnym. W laserach barwnikowych jest możliwość ciągłej zmiany długości fali w zakresie od 0.4 do 0.8 μm lub od bliskiej podczerwieni do bliskiego ultrafioletu. Zakres ten zależy od tego, jaki zastosowano rodzaj barwnika. Najczęściej stosowane barwniki to: fluoresceina, rodamina G6 i rodamina B. Lasery barwnikowe pompuje się lampą błyskową, laserem YAG lub laserem azotowym o błysku krótkim i szybko narastającym impulsie.

- d) Lasery półprzewodnikowe:
- złączone (diody laserowe):
 - na materiale objętościowym,
 - na studniach kwantowych,
 - na kropkach kwantowych;
 - bezzłączone:
 - kwantowy laser kaskadowy.

2.2.2. Podział laserów ze względu na ich zastosowanie

2.2.2.1. Lasery stosowane w medycynie:

Lasery znajdują zastosowanie m.in. w chirurgii, gwarantując bardzo dużą precyzję, sterylność oraz bezkontaktowe działanie. Bardzo popularna jest laserowa korekcja wzroku, wykorzystująca laser ekscymerowy, który dokładnie wyrównuje krzywiznę rogówki oka i nadaje jej kształt sferyczny. Promień lasera w ciągu zaledwie 20÷60 sekund zmienia optykę oka na tyle, aby pacjent odzyskał optymalną ostrość wzroku. Oprócz laserów ekscymerowych wykorzystywane są również lasery argonowe Ar przy operacjach siatkówki ocznej, Nd:YAG i CO₂ w chirurgii, Er:YAG do wygładzania zmarszczek, barwnikowe w okulistyce i dermatologii. Laserem leczy się odwarstwienie (odklejenie) się siatkówki. Impulsy o czasie trwania rzędu ułamka milisekundy i o energii bezpiecznej dla oka są skupione na obszarze setnych części milimetra. Rany spowodowane działaniem lasera goją się szybciej niż rany po ingerencji tradycyjnych narzędzi chirurgicznych.

Należy także zwrócić uwagę na zabiegi biostymulacji laserowej (biomodulacja, LLLT – low-level laser therapy), które polegają na oświetlaniu tkanki laserem małej mocy, co powoduje szybsze gojenie się ran, uśmierzanie bólu, leczenie stanów zapalnych. Lasery w medycynie wykorzystuje się także do trwałej, bezpiecznej i praktycznie bezbolesnej depilacji. W tym przypadku zastosowanie znajdują: laser rubinowy, aleksandrytowy, Nd:YAG lub diodowy o długości fali 810 nm.

2.2.2.2. Lasery w technologii wojskowej:

W dziedzinie militarnej laser znalazł 3 najważniejsze zastosowania: jako dalmierz do określania odległości od celu, jako system naprowadzający na cel lub jako broń energetyczna. W tym ostatnim przypadku laser ma dużą przewagę nad bronią

konwencjonalną, ponieważ cała energia uwalniana jest w jednym impulsie i przemieszcza się z prędkością światła, dlatego też nie jest możliwe uniknięcie trafienia z takiej broni.

Dalmierz mierzy czas potrzebny bardzo krótkiemu impulsowi laserowemu na przebycie drogi od urządzenia do obiektu i z powrotem. Tego typu dalmierze wykorzystywane są przez marynarkę wojсковą i cywilną do określania odległości na morzu, w kosmonautyce, w lotnictwie do wyznaczania odległości w powietrzu, w wojsku i geodezji do mierzenia odległości w terenie.

Innym zastosowaniem techniki laserowej w wojsku jest lidar, inaczej zwany kolidarem (od angielskiej nazwy Coherent Light Detection And Ranging – detekcja i namierzanie za pomocą światła spójnego). Jest to wiązka lasera, tak rozszerzona, by obejmowała odpowiednio duże pole widzenia. Lidar to system lokacyjny działający podobnie do radaru, lecz w odróżnieniu do radaru zamiast mikrofal używa światła laserowego.

2.2.2.3. Lasery stosowane do efektów wizualnych:

Lasery takie są wykorzystywane w dwojaki sposób – albo jako wskaźniki podczas konferencji, prezentacji itp. lub też do tworzenia efektów wizualnych np. w pokazach sylwestrowych, w spektaklach teatralnych, reklamach, koncertach i dyskotekach. Te drugie pozwalają wyświetlać kolorowe napisy, obrazy, loga a nawet tworzyć animacje i obiekty przestrzenne. Do pokazów wykorzystuje się różnego typu lasery, jednak obecnie coraz częściej stosuje się lasery półprzewodnikowe YAG o długości fali 532 nm (światło zielone), które wypierają stare typy laserów chłodzonych wodą i zasilanych napięciem 380 V.

Efektownie prezentują się hologramy, czyli przestrzenne obrazy powstające przez odczyt zapisanego na nośniku przynajmniej dwufalowego obrazu interferencyjnego. Do zapisu używa się lasera. Część wiązki kieruje się na przedmiot (tzw. wiązka przedmiotowa), drugą jej część (tzw. wiązka odniesienia) kieruje się za pomocą zwierciadła lub pryzmatu na kliszę fotograficzną. Na kliszy obie wiązki nakładają się na siebie tworząc widzialny pod mikroskopem układ nieregularnych jasnych i ciemnych pasków, tzw. prążków interferencyjnych. Hologramy odczytuje się prześwietlając kliszę równoległą wiązką światła monochromatycznego.

2.2.2.4. Lasery w telekomunikacji:

W odtwarzaczach CD stosuje się lasery GaAlAs o długości fali $\lambda = 780 \text{ nm}$ i o mocy 1 mW. W odtwarzaczach DVD wykorzystywane są także lasery GaAlAs, lecz o długości fali $\lambda = 630 \text{ nm}$ i $\lambda = 650 \text{ nm}$ oraz mocy 5 mW i 10 mW. Innymi przykładami zastosowania laserów w telekomunikacji są: czytniki kodu kreskowego, drukarki laserowe, zapis danych na następcy płyt DVD – płytach Blu-Ray Disc, na których zapis dokonywany jest laserem niebieskim (diody laserowa zbudowana na bazie azotku galu GaN, której technologia produkcji rozwijana jest także w Polsce).

W dziedzinie telekomunikacji szybko rozwija się technika światłowodowa, dzięki której przesyłać można informacje z dużymi prędkościami. Nadawanie infor-

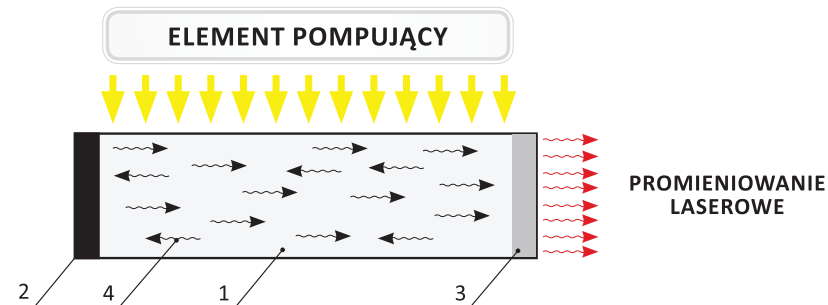
macji przebiega w następujący sposób: drgania akustyczne są zamieniane na drgania elektryczne, kolejno nakładanie drgań elektrycznych na prąd płynący przez laser, czyli modulowanie prądu. Następnie modulacja natężenia światła emitowanego przez laser i wprowadzenie światła do światłowodu. Światłowody są stosowane w obrabiarkach laserowych umożliwiając przesyłanie wiązki lasera na duże odległości i z małymi stratami mocy.

2.3. Lasery stosowane w przemyśle

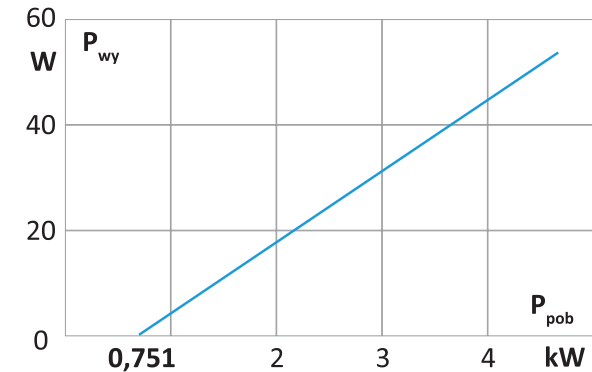
Najczęściej stosowanymi laserami w przemyśle są lasery na ciele stałym YAG (Nd:YAG, Er:YAG, Yb:YAG) a także lasery gazowe CO₂. Obecnie dominują lasery CO₂, jednak według prognoz około roku 2015 sprzedaż laserów na ciele stałym przewyższy sprzedaż laserów CO₂. Nowe generacje laserów – lasery włóknowe charakteryzują się dużą mocą generowanej wiązki laserowej przy jednoczesnym zachowaniu bardzo dobrej jakości wiązki. Ostatnio w nowoczesnych konstrukcjach laserów stałych stosuje się kryształy YAG domieszkowane iterbem – lasery Yb:YAG, ze względu na około czterokrotnie większy czas życia atomów w stanie wzbudzonym, szersze pasmo absorpcji promieniowania wzbudzającego i większą odporność na obciążenia cieplne.

2.3.1. Lasery Nd:YAG

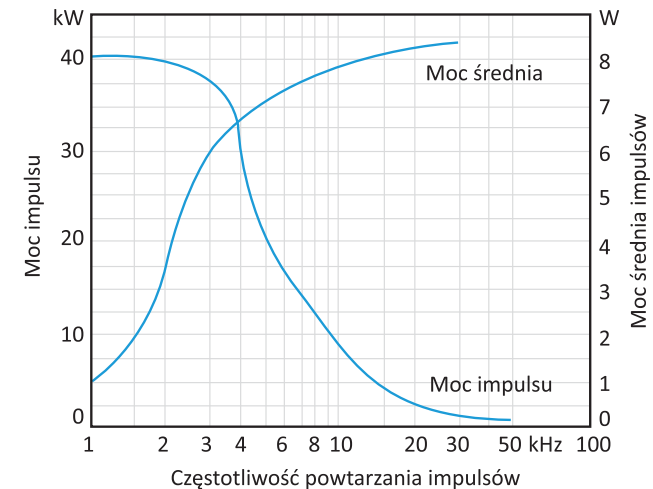
W rezonatorze takiego lasera umieszczony jest pręt z granatu itrowo-aluminiowego domieszkowany neodymem (stąd powstała nazwa, jako skrót), stanowiący ośrodek czynny. Tak domieszkowane kryształy YAG charakteryzują się dużą twardością, trwałością, izotropią optyczną, dobrą przewodnością cieplną oraz, co najważniejsze, niskim progiem wzbudzenia i przez to łatwością uzyskania efektu laserowego.



Rys. 2.4. Zasada działania lasera Nd:YAG. 1 – kryształ Nd:YAG, 2 – zwierciadło nieprzepuszczalne, 3 – zwierciadło częściowo przepuszczalne, 4 – fotony [77]



Rys. 2.5. Zależność mocy wyjściowej lasera Nd:YAG o wielomodowej pracy ciągłej od mocy pobudzenia; głowica jednoeliptyczna, kryptonowa lampa pobudzająca, pręt laserowy o długości 75 mm i średnicy 3 mm [22]



Rys. 2.6. Zależność mocy impulsów promieniowania laserowego i średniej mocy ciągu tych impulsów od częstotliwości ich powtarzania dla pracującego w modzie TEM₀₀ lasera Nd:YAG o pobudzaniu ciągłym i wymuszonej akustooptycznie pracy impulsowej [22]

Lasery Nd:YAG mają sprawność od 0,5% do 3% (lasery CO₂ mają sprawność do 12% a nowsze konstrukcje laserów Nd:YAG osiągają sprawności 2÷5%). Większość energii pobudzającej jest wydzielana w postaci ciepła, podnosząc temperaturę pręta laserowego i wymuszając konieczność stosowania wydajnych układów chłodzących, przeważnie są nimi wymienniki ciepła woda – powietrze. Lasery Nd:YAG osiągają moce do 4 kW i mogą pracować zarówno w trybie impulsowym jak i ciągłym.

...Opiniowana praca, przedstawia podstawy teorii i technologii laserowego spawania elementów części maszyn, budowy obrabiarek laserowych oraz wyniki badań własnych procesu i skutków mikrospawania laserowego elementów stosowanych w mechatronice...

... Wykorzystano do tego celu współczesne metody modelowania matematycznego, teorii eksperymentu, identyfikacji złożonych procesów oraz symulacji i optymalizacji komputerowej warunków mikrospawania laserowego termoelementów termopar...

...Przedstawiona do recenzji praca, będąca jedną z pierwszych kompleksowych opracowań naukowych z tego zakresu w Polsce, stanowić może cenne uzupełnienie brakującej, na krajowym rynku wydawniczym, tematyki mikrospawania laserowego w mechatronice...

...Na podkreślenie zasługuje forma przedstawionych wniosków w obszarze poznawczym, użytkowym i rozwojowym...

Prof. zw. dr hab. inż. Ryszard Henryk Kozłowski

Politechnika Krakowska
Wydział Mechaniczny

ISBN 978-83-63318-01-7



9 788363 318017

Seria wydawnicza

**PROBLEMY INŻYNIERII MECHANICZNEJ,
EKOENERGETYKI I INŻYNIERII ŚRODOWISKA®**