

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 mikrootworów, 2011.



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 Tarnów, 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

**LASEROWA OBRÓBKA
MIKROOTWORÓW**

WYDANIE I

Polska Geotermalna Asocjacja · Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydawnictwa Naukowo-Techniczne

Kraków

2011

Warszawa

Opiniodawca:

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

Redaktor naukowy wydania:

Płk dr inż. Mieczysław Struś, PGA, Politechnika Wrocławska

Projekt okładki:

Łukasz Buchała, Jacek Zimny

Na okładce:

Drażarko-wycinarka laserowa

Redaktor techniczny:

Tomasz Fiszer

Korekta:

Tomasz Fiszer, Krzysztof Szczotka

Grafika, skład, łamanie:

Tomasz Fiszer, Krzysztof Szczotka, Odys Korczyński

Wydanie I, 2011, Kraków – Warszawa

© Jacek Zimny, Kraków – Warszawa 2011, 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
 - Wydawnictwa Naukowo–Techniczne (w likwidacji)
00-048 Warszawa, ul. Mazowiecka 2/4, tel. (+48) 22 826 72 71, www.wnt.pl
- Książka przyjęta do druku w Wydawnictwach Naukowo–Technicznych, Warszawa, w 2011r.

Druk i oprawa:

Wydawnictwo i Drukarnia
Towarzystwo Słowaków w Polsce
31-150 Kraków, ul. Św. Filipa 7, tel. (+48) 12 632 11 27, e-mail: zg@tsp.org.pl, www.tsp.org.pl

ISBN 978-83-63318-00-0

Spis treści

Przedmowa	8
Streszczenie	10
Wykaz oznaczeń	12
1. Obróbka laserowa (LBM)	14
1.1. Wprowadzenie	14
1.2. Zasada działania lasera z ciałem stałym	14
1.2.1. Lasery Nd:YAG	18
1.2.2. Lasery Nd:glass.....	20
1.3. Zasada działania lasera gazowego He - Ne.....	21
1.4. Zasada działania lasera molekularnego CO ₂	22
1.5. Lasery ekscymerowe (excimer lasers)	23
2. Właściwości promieniowania laserowego, energetyczna charakterystyka wiązki laserowej	24
2.1. Lasery energetyczne o pracy impulsowej, stosowane w technologii maszyn i ich charakterystyki.	25
2.2. Wiązka laserowa jako narzędzie w obróbce materiałów	26
3. Procesy fizyczne towarzyszące laserowej obróbce materiałów	35
3.1. Pochłanianie energii.....	36
3.2. Nagrzewanie materiału obrabianego bez niszczenia	37
3.3. Topnienie i usuwanie materiału	41
3.4. Stygnięcie materiału.....	48
4. Podstawy technologii obróbki laserowej otworów	51
5. Badania procesu i skutków erozji fotonowej w metalach czystych i stalach trudnoskrawalnych, wyniki	58
5.1. Program badań, metodyka	58
5.1.1. Czynniki badane, zakresy zmienności	58
5.1.2. Metodyka badań, warunki eksperymentu	59
5.1.3. Materiały obrabiane	66
a) metale czyste.....	66
b) stale	68
5.1.4. Metodyka i technika pomiarów	69
5.2. Obróbka jednoimpulsowa	70
5.2.1. Wpływ warunków obróbki laserowej na gęstość mocy.....	70
5.2.2. Analiza graficzna wpływu warunków obróbki laserowej na gęstość mocy w ognisku q [W/cm ²] 10 ⁶	72
5.3. Podstawowe zależności technologiczne obróbki metali czystych	75
5.3.1. Wpływ parametrów obróbki laserowej na wydajność drażenia otworów Q_m	75
a) ołów (Pb)	77
b) glin (Al).....	88
c) miedź (Cu).....	99
d) żelazo armco (Fe)	110
e) molibden (Mo).....	121
f) nikiel (Ni).....	132
g) wolfram (W).....	143
h) cynk (Zn).....	154
5.3.2. Optymalizacja warunków obróbki laserowej otworów w metalach czystych. ...	167
5.4. Podstawowe zależności technologiczne obróbki laserowej stali.	167
5.4.1. Stale trudnoskrawalne.....	169
a) Stal żaroodporna H25N20S2	169
b) Stal kwasoodporna 1H18N9T	177

c) Stal konstrukcyjna 30HGS	184
5.5. Wymiary geometryczne otworu oraz wydajność w funkcji parametrów obróbki laserowej.	191
a) Stal żaroodporna H25N20S2	191
b) Stal kwasoodporna 1H18N9T	195
c) Stal konstrukcyjna 30HGS	199
5.6. Makro - i mikrogeometria powierzchni po obróbce laserowej	204
5.6.1. Wygląd zewnętrzny powierzchni obrabianej	204
5.6.2. Geometria powierzchni na przekroju podłużnym	206
5.6.3. Chropowatość powierzchni	209
5.6.4. Makro- i mikropęknięcia warstwy wierzchniej.	211
5.6.5. Mikrotwardość warstwy wierzchniej (WW)	212
5.7. Badania struktury i grubości warstwy wierzchniej stali obrabianych laserowo, optymalizacja	214
5.7.1. Teoretyczny model i analiza procesu konstituowania warstwy wierzchniej	216
5.7.2. Matematyczne modelowanie i optymalizacja budowy warstwy wierzchniej	219
5.8. Optymalizacja wielokryterialna warunków obróbki laserowej	224
6. Obróbka wieloimpulsowa	226
6.1. Wprowadzenie	226
6.2. Wpływ warunków obróbki laserowej na gęstość mocy i wymiary geometryczne otworu	228
6.3. Podstawowe zależności technologiczne obróbki wieloimpulsowej	228
6.4. Podsumowanie, wnioski	232
7. Zasady doboru warunków obróbki otworów laserem o pracy impulsowej	237
7.1. Algorytm „Projektowanie procesu technologicznego LBM”	237
8. Sposoby zwiększenia dokładności i wydajności obróbki laserowej otworów.	241
8.1. Dobór warunków obróbki	242
8.2. Kształtowanie charakterystyki impulsu	242
9. Obrabiarki laserowe	244
9.1. Opis ogólny	244
9.2. Urządzenia laserowe stosowane w obróbce materiałów	250
9.2.1. Obrabiarka laserowa „Kwant 16” - opis techniczny	251
9.3. Kierunki rozwoju obrabiarek laserowych	253
9.3.1. Schemat blokowy zautomatyzowanej obrabiarki laserowej	254
9.3.1.1. Wielkości fizyczne podlegające pomiarowi	255
9.3.2. Proces obróbki laserowej (LBM) jako obiekt sterowania automatycznego	256
9.3.3. Obrabiarki laserowe ze sterowaniem programowym	257
9.3.4. Obrabiarka laserowa z laserem molekularnym CO ₂	260
9.3.5. Urządzenia laserowe CO ₂ stosowane w technologii maszyn	263
9.4. Przykłady zastosowań obrabiarek laserowych	272
9.4.1. Laserowa wycinarko-grawerka Model CTL-1422 Intelligent CO ₂ Laser System	272
9.4.2. Mikrospawarka laserowa Model CTL - 1521 Laser Welder System	275
9.4.3. Laserowa wycinarko – frezerko - zgrzewarka	277
10. Bezpieczeństwo i higiena pracy podczas korzystania z urządzeń i obrabiarek laserowych	277
11. Literatura	282
12. Streszczenie w języku angielskim	294
13. Streszczenie w języku rosyjskim	295

Przedmowa

Niniejsza książka dotyczy podstaw: teorii i technologii laserowej obróbki mikrootworów w metalach czystych i stalach trudnoobrabialnych, budowy obrabiarek laserowych oraz warunków bezpieczeństwa i higieny pracy z wykorzystaniem urządzeń laserowych.

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 Technik Wytwarzania/ w Krakowie, Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie) oraz zagranicą (Uniwersytet w Pizie, Włochy w ramach Umowy Międzynarodowej o Współpracy Naukowej i Technicznej Polska-Italia od 1976 roku, Politechnika w Kijowie, Ukraina, Instytut Spawalnictwa im. Patona, Kijów, Max Born Institute Berlin, Niemcy).

Obróbka laserowa należy do niezwykle 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, stałym niedostatkiem są zagadnienia teoretyczne i technologiczne, wynikające z braku pełnego poznania zjawisk fizycznych i cieplnych towarzyszących procesowi erozji fotonowej i jej skutkom.

Książka składa się z 11 rozdziałów, poświęconych wprowadzeniu Czytelnika w kolejne zagadnienia: teorii, technologii, budowy obrabiarek laserowych oraz warunków BHP przy pracy podczas korzystania z laserów przemysłowych dużej mocy, niszczących strukturę metali.

W rozdziale 1. omówiono budowę i zasadę działania laserów o pracy impulsowej i ciągłej stosowanych w budowie maszyn, mechanice precyzyjnej i mechatronice.

Rozdział 2. Dotyczy właściwości promieniowania laserowego, jego charakterystyki energetycznej jako „narzędzia” w technologii: drażenia otworów, przecinania, spawania, obróbki cieplnej i powierzchniowej, kształtowania budowy i własności warstwy wierzchniej (WW).

W rozdziale 3. omówiono procesy fizyczne towarzyszące laserowej obróbce materiałów nieprzezroczystych (metale, stopy).

Rozdział 4. dotyczy podstaw technologii obróbki laserowej mikrootworów (do 1 mm średnicy) z zastosowaniem laserów impulsowych na ciele stałym.

W rozdziale 5. przedstawiono rezultaty badań własnych procesu i skutków erozji fotonowej w metalach czystych oraz stalach trudnoskrawalnych – wykorzystując do tego celu współczesne metody modelowania matematycznego, teorii eksperymentu w badaniach stosowanych, identyfikacji złożonych procesów, symulacji komputerowej oraz optymalizacji jedno i wielokryterialnej.

Wiele uwagi poświęcono problematyce identyfikacji i badań warstwy wierzchniej (WW) po obróbce laserowej (LBM), formułując ogólny model konstytuowania się warstwy, określając jej charakterystykę użytkową, optymalizację budowy.

W rozdziale 6. omówiono obróbkę wieloimpulsową mikrootworów w metalach.

Rozdział 7. zawiera sposoby zwiększenia dokładności wymiarowo-kształtowej oraz wydajności procesu.

W rozdziale 9. przedstawiono stan obecny i kierunki rozwoju obrabiarek laserowych w aspekcie kontroli czynnej, monitoringu, automatyzacji produkcji, sterowania numerycznego i zastosowań metod komputerowych w technice laserowej.

Rozdział 10. dotyczy bezpieczeństwa i higieny pracy (BHP) podczas korzystania z urządzeń laserowych o mocach zagrażających zdrowiu i życiu człowieka.

Rozdział 11. stanowi obszerna literatura z zakresu tematu.

Niniejsza publikacja jest rozszerzeniem i uzupełnieniem monografii „Laserowa obróbka stali” wydanej przez autora w Wydawnictwach Politechniki Częstochowskiej w 1999 roku, której recenzentami byli płk. prof. Zbigniew Puzewicz z Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie oraz prof. Michał Semena z Politechniki w Kijowie.

Serdecznie dziękuję Recenzentom tej książki: Panu Profesorowi Ryszardowi H. Kozłowskiemu z Politechniki Krakowskiej, oraz Panu Profesorowi Waławowi Przybyło z Wojskowej Akademii Technicznej z Warszawy za przyjęcie obowiązków opiniodawcy oraz uwagi do książki.

Moim Współpracownikom na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH, dr inż. Tomaszowi Fiszerowi, mgr inż. Michałowi Karchowi oraz mgr inż. Krzysztofowi Szczotka dziękuję za pomoc przy opracowaniu merytorycznym, edytorskim oraz przygotowaniu książki do druku.

Autor

Streszczenie

Na podstawie analizy stanu wiedzy z zakresu teorii i technologii obróbki laserowej (LBM) przedstawiono kolejno informacje dotyczące: budowy i działania laserów technologicznych (rozdział 1.), charakterystyki impulsu laserowego (rozdział 2.), fizycznych modeli erozji fotonowej (rozdział 3.), podstaw technologii obróbki laserowej otworów (rozdział 4.).

Po przedstawieniu oceny dotychczasowego stanu wiedzy i wynikającego wyboru kierunków badań (rozdział 4.) przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych przebiegu i skutków erozji fotonowej w metalach czystych i stalach trudnoskrawalnych (rozdział 5.).

Po omówieniu szczegółowego programu badań (rozdział 5.1.), zawierającego czynniki badane i zakres ich zmienności (rozdział 5.1.1.), metodykę badań i warunki eksperymentu (rozdział 5.1.2.), materiały badane (rozdział 5.1.3.), metodykę pomiarów (rozdział 5.1.4.), w części drugiej rozdziału 5. przedstawiono wyniki obróbki jednoimpulsowej (rozdział 5.2.-5.3.) metali czystych oraz stali trudnoskrawalnych (rozdział 5.4.-5.7.) oraz wieloimpulsowej (rozdz. 6.).

W pracy określono: wpływ charakterystyki impulsu na wartość gęstości mocy w ognisku („geometria narzędzia”), a także wpływ gęstości mocy („narzędzia”) na wymiary geometryczne drążenia mikrootworów w badanych metalach oraz wydajności procesu (rozdział 5.3.-5.5.) – model matematyczny procesu; makro- i mikrogeometrię powierzchni materiałów po obróbce: wygląd zewnętrzny, geometrię i chropowatość powierzchni, makro- i mikropęknięcia, grubość oraz mikrotwardość warstwy wierzchniej (rozdział 5.6.); badania struktury i właściwości warstwy wierzchniej stali obrabianych laserowo (rozdział 5.7.) w celu optymalizacji jedno- i wielokryterialnej warunków obróbki laserowej stali pojedynczym impulsem.

Wyniki badań pozwoliły na określenie związków ilościowych i jakościowych między charakterystyką impulsu a przebiegiem i skutkami erozji fotonowej w metalach czystych i stalach stopowych trudnoskrawalnych, które przedstawiono w postaci równań wielomianowych regresji drugiego stopnia oraz równań potęgowych (model matematyczny procesu).

Analiza wyników badań wykazała, iż dla każdego badanego materiału można dobrać indywidualną z uwagi na właściwości materiałowe i optymalną charakterystykę impulsu laserowego, odpowiadającą warunkom quasistacjonarnego parowania, mieszczącą się w „obszarze optymalnej obróbki LBM” (określonym w niniejszej pracy), zawartym poniżej tzw. granicznej wartości gęstości mocy q_{gran} , W/cm^2 , dla której przebieg procesu erozji materiału i jego skutków będzie najlepszy.

W wyniku pracy stwierdzono, iż np. dla badanych stali obszar optymalnej obróbki LBM jest zawarty w przedziale $q=2\cdot 10^5\div 8\cdot 10^5$ W/cm^2 , przy czym wartość q_{gran} nie przekracza 10^6 W/cm^2 . Stosowanie w procesie obróbki większej wartości gęstości mocy $q > q_{gran}$ nie ma uzasadnienia technicznego i ekonomicznego. Wykazano, iż konieczny i wystarczający zakres zmienności parametrów obróbki, umożliwiający pracę w obszarze optymalnej obróbki LBM, dla badanych gatunków stali wynosi: $W_i = 2\div 10$ J, $t_i = 0,6\div 1,2$ ms, $\Delta F = -0,5\div +0,5$ mm, $F = 20\div 60$

mm. W tym aspekcie konieczne jest zbudowanie nowego typu zasilacza laserowego, który umożliwiłby dowolne kojarzenie energii impulsu i czasu jego trwania (Patent RP nr 97672).

W części dotyczącej badań warstwy wierzchniej stwierdzono, że najlepsze właściwości użytkowe stali ma struktura zawierająca tylko „strefę przejściową”, tzw. kryształów zamrożonych, w związku z czym należy dążyć do minimalizacji występowania nieregularnej „strefy białej”.

W rozdziale 6. dotyczącym obróbki wieloimpulsowej określono wpływ charakterystyki impulsu na wartość gęstości mocy, wpływ gęstości mocy na stosunek h/d badanych stali oraz wpływ liczby impulsów na wymiary geometryczne otworu (drażenie, przecinanie).

Wykorzystując otrzymane zależności technologiczne, opracowano zasady doboru warunków obróbki stali laserem o pracy impulsowej oraz algorytm obliczeniowy „Projektowanie procesu technologicznego obróbki laserowej” (rozdział 7.).

W rozdziale 8. przedstawiono analizę sposobów zwiększania dokładności i wydajności obróbki laserowej, koncentrując się na tzw. aktywnym kształtowaniu charakterystyki impulsu.

W rozdziale 9. dokonano przeglądu budowy obrabiarek laserowych, ich kierunków rozwoju w aspekcie automatyzacji i komputeryzacji procesów technologicznych laserowej obróbki stali (LBM).

Rozdział 10. dotyczy warunków bezpieczeństwa i higieny pracy podczas korzystania z urządzeń i obrabiarek laserowych w zakresie mocy promieniowania zagrażającego zdrowiu i życiu człowieka.

Obszerną literaturę z zakresu tematu książki zawiera bibliografia (rozdział 11.).