

Tadeusz BURAKOWSKI
Wojciech NAPADŁEK
Adam WOŹNIAK
Izabela KALMAN

DOŚWIADCZALNE OKREŚLENIE WPŁYWU GĘSTOŚCI MOCY PROMIENIOWANIA LASEROWEGO $\lambda = 1064$ nm NA EFEKTYWNOŚĆ JEDNOIMPULSOWEGO TEKSTUROWANIA STALI 41Cr4

STRESZCZENIE *W pracy podjęto próbę doświadczalnego określenia wpływu gęstości mocy promieniowania laserowego na efektywność jednoimpulsowego teksturowania stali 41Cr4. Do badań wykorzystano nowoczesny iterbowy włóknowy laser impulsowy na ciele stałym z głowicą Galvo o długości fali promieniowania $\lambda = 1064$ nm i nanosekundowym czasie trwania impulsu. Analizę geometryczną wytworzonych mikrokraterów przeprowadzono przy użyciu mikroskopu optycznego ze światłowodową transmisją obrazu. W badaniach stwierdzono, że wzrost gęstości mocy promieniowania do $q = 0,6$ MW/cm² istotnie wpływa na efektywność (głębokość) ablacyjnego teksturowania laserowego. Po przekroczeniu tej gęstości mocy następuje znaczące zmniejszenie efektywności procesu ablacji laserowej. Prawdopodobnie jest to związane ze zjawiskiem ekranowania promieniowania przez plazmę generowaną impulsem laserowym.*

Słowa kluczowe: *wiązka laserowa, długość fali promieniowania, gęstość mocy, stal 41Cr4*

prof. dr hab. inż. Tadeusz BURAKOWSKI
e-mail: wach@imp.edu.pl

Politechnika Koszalińska, Instytut Mechaniki Precyzyjnej

dr inż. Wojciech NAPADŁEK, dr inż. Adam WOŹNIAK, mgr inż. Izabela KALMAN
e-mail: wnapadlek@wat.edu.pl, awozniak@wat.edu.pl, ikalman@wat.edu.pl

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny

1. WSTĘP

Efektywność obróbki laserowej – podobnie jak każdej innej obróbki – zależy od właściwości narzędzia i od właściwości obrabianego materiału (wsadu). W przypadku obróbki laserowej narzędziem jest wiązka laserowa – wiązka spójnego promieniowania monochromatycznego, materiałem – dowolny materiał konstrukcyjny, najczęściej stopy metali.

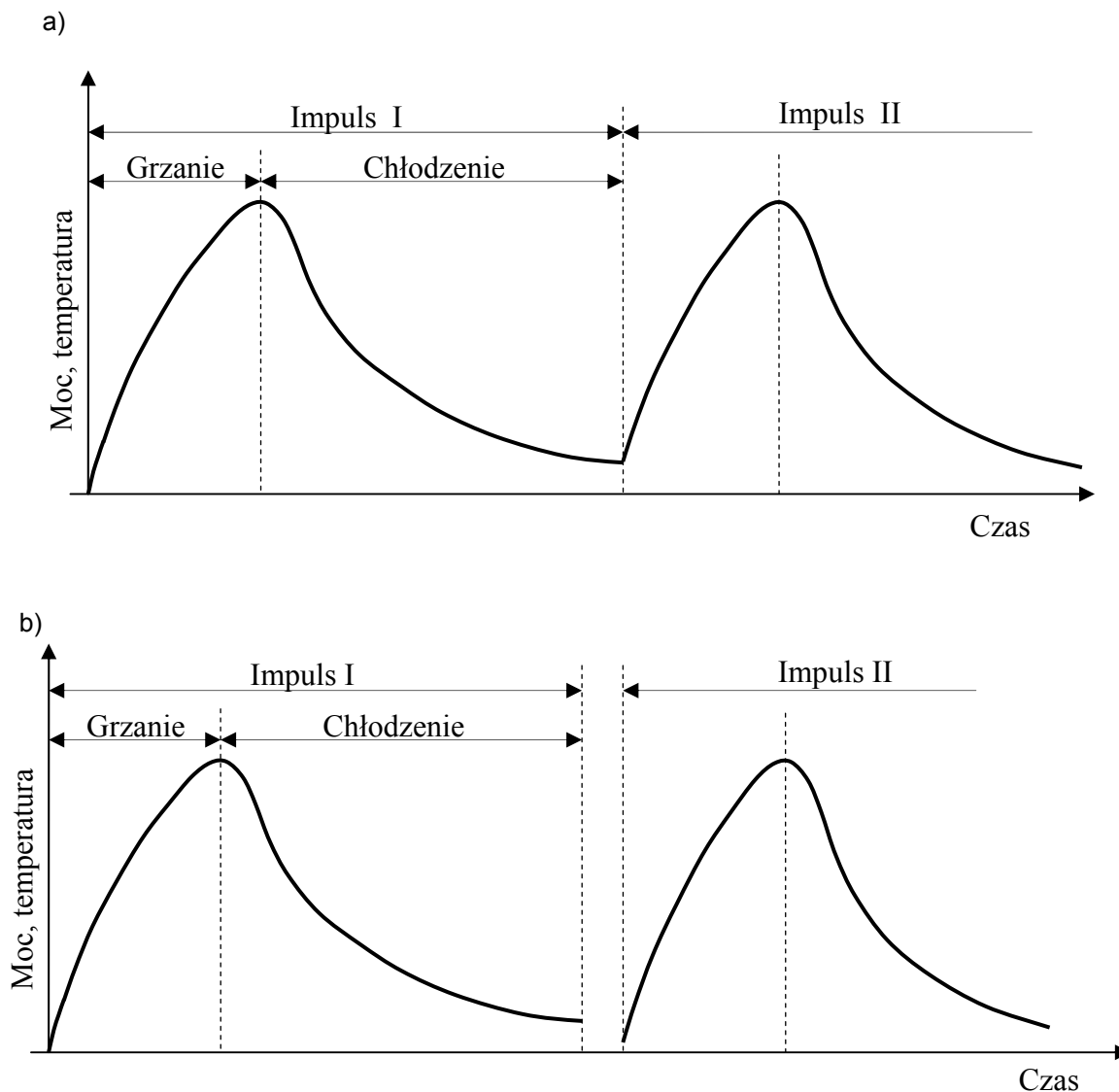
2. WŁAŚCIWOŚCI WIĄZKI LASEROWEJ

Z punktu widzenia efektów oddziaływania wiązki laserowej na materiał najważniejszymi są [1]:

- długość fali promieniowania,
- gęstość mocy dostarczonej na powierzchnię materiału,
- charakter (rodzaj) promieniowania.

Charakter promieniowania. Promieniowanie emitowane przez laser może mieć charakter ciągły lub może być wysyłane w postaci impulsów, zwykle o regulowanym czasie trwania i współczynniku wypełnienia. W czasie padania impulsu laserowego na obrabiany materiał następuje pochłanianie przez materiał dostarczonej energii i nagrzewanie – kolejno – do temperatury niższej lub wyższej od temperatury przemian fazowych, topnienia, parowania, co prowadzi do ablacji (rys. 1). W czasie przerwy między impulsami laserowymi następuje chłodzenie materiału – głównie przez odprowadzenie ciepła z nagrzanego miejsca drogą przewodzenia (tzw. chłodzenie masą wsadu) i częściowo przez promieniowanie do otoczenia. Promieniowanie może być dostarczane do wsadu w sposób ciągły lub w postaci krótkich impulsów – o czasie trwania od dziesiątych części sekundy do nawet nanosekund. Przerwa między impulsami jest dłuższa od czasu trwania impulsu (tzw. czasu ekspozycji) nawet o kilka rzędów wielkości.

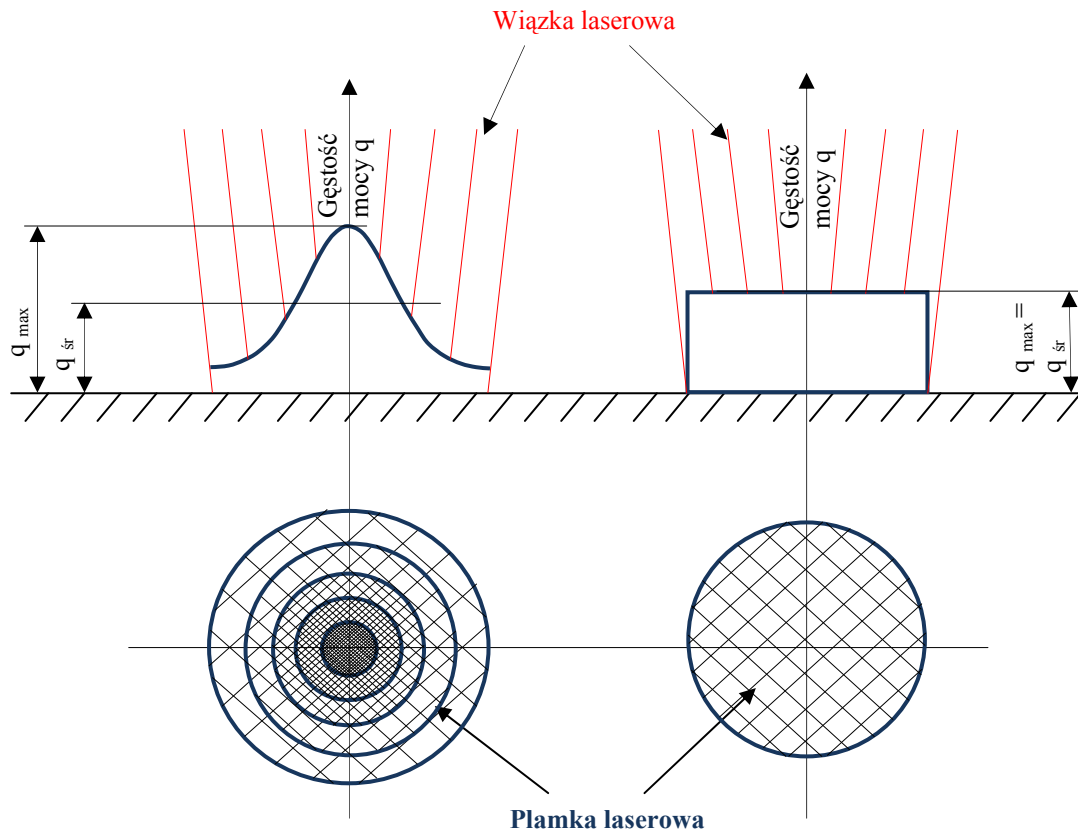
Długość fali promieniowania. Współczesne lasery emitują promieniowania monochromatyczne o różnych długościach fal λ – od nadfioletu (a nawet promieniowania rentgenowskiego) – do zakresu nawet dalekiej podczerwieni. Ośrodek czynny lasera może emitować promieniowania tylko o jednej długości fali λ lub kilku długościach fal (harmoniczne). Do obróbki cieplnej stopów metali dotychczas najczęściej stosowano lasery z ośrodkiem czynnym CO₂, emitujące promieniowanie w obszarze średniofalowej podczerwieni $\lambda = 10,59 \mu\text{m}$, obecnie coraz częściej stosuje się lasery Nd: YAG, ekscimerowe i włóknowe. We współczesnych laserach stosuje się ośrodki stałe, ciekłe i gazowe.



Rys. 1. Typowy przebieg zależności temperatury od czasu przy impulsowym nagrzewaniu metali:
a) bez przerwy pomiędzy impulsami, b) z przerwą pomiędzy impulsami

Gęstość mocy. Lasery emitują promieniowanie o nierównomiernym rozkładzie gęstości mocy. Rozkładem gęstości mocy można sterować przez układy optyczne (filtrację i apodyzację promieniowania na zewnątrz lasera). Zwykle rozkład gęstości mocy dobiera się w zależności od przewidywanego procesu technologicznego, tak na przykład: rozkład gaussowski wykorzystuje się w technologiach cięcia i spawania (gdyż korzystny jest rozkład nierównomierny z wyraźnie zaznaczonym maksimum gęstości mocy promieniowania), jednorodny – gdy korzystne jest równomierne nagrzewanie wsadu (rys. 2). Bardzo często w literaturze używane jest pojęcie „gęstości mocy” rozumiane jako wartość średnia gęstości mocy. Praktycznie wykorzystywane gęstości mocy zawierają się w zakresie $q = 10^3 \div 10^{10} \text{ W/cm}^2$, a przy ich rosnących wartościach można kolejno

realizować: tylko nagrzewanie → nagrzewanie z przemianami fazowymi → przetapianie → odparowanie (ablacja).



Rys. 2. Przykładowy rozkład gęstości mocy wiązki lasera:
a) rozkład gaussowski, b) rozkład jednorodny

3. WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁU OBRABIANEGO

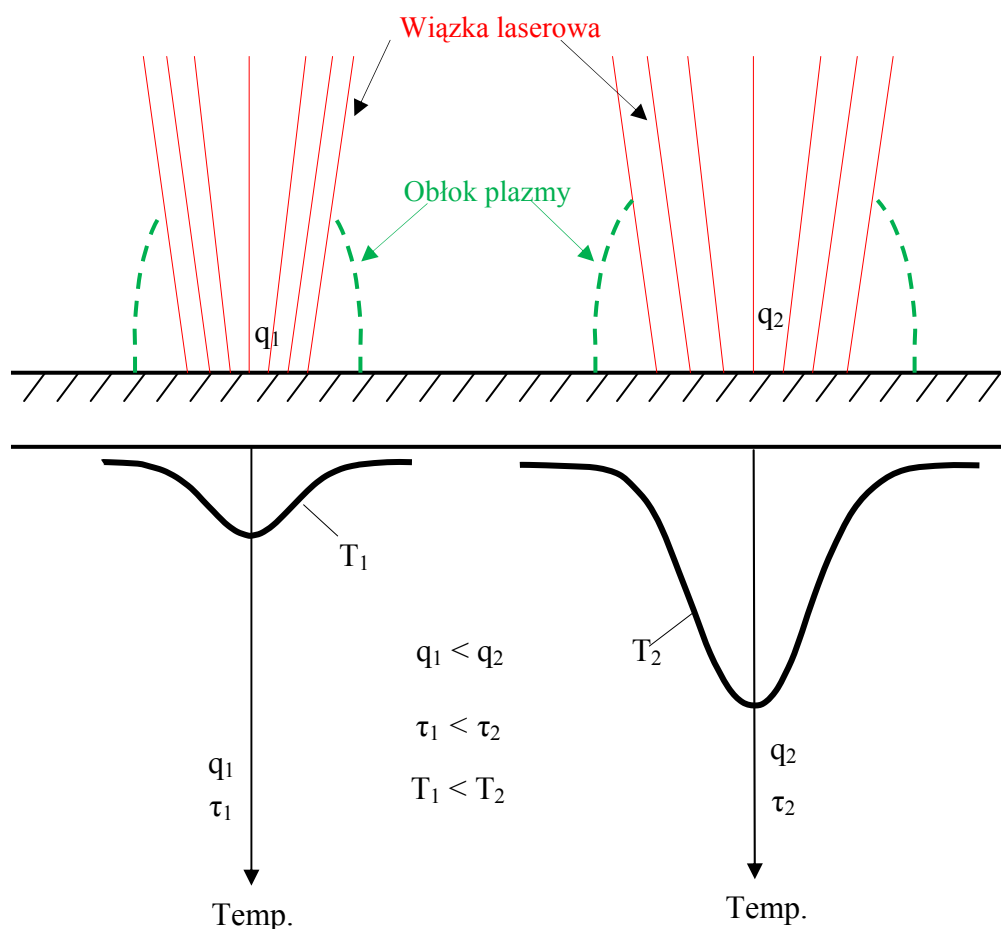
Spośród właściwości materiału obrabianego dla potrzeb techniki laserowej najistotniejsza jest zdolność pochłaniania promieniowania laserowego zależna z kolei od długości fali promieniowania laserowego i właściwości powierzchni obrabianych laserowo [2].

Dobór długości fali promieniowania laserowego zależy od zdolności absorpcyjnej tego promieniowania przez materiał. Ogólnie materiały metalowe dobrze absorbują promieniowanie nadfioletowe, słabiej widzialne i bardzo słabo podczerwień.

Pochłanianie przez metale i niemetały promieniowania nadfioletowego zawiera się w przedziale od ok. 10% do 90%, promieniowania widzialnego

– w obszarze od kilku do ok. 20%, bliskiej i średniej podczerwieni – kilka procent, aby dla $\lambda > \sim 5 \mu\text{m}$ zmaleć prawie do zera dla metali i rosnąć do ponad 90% dla dielektryków [2]. Wartościowo promieniowanie emitowane przez laser Yb: YAG jest pochłaniane podobnie jak lasera CO₂.

Ogólnie zdolność absorpcyjna promieniowania laserowego przez powierzchnie jasne, gładkie, błyszczące i lustrzane jest mała. Dotyczy to szczególnie srebra, złota, aluminium, brązów, miedzi (np. monochromatyczny współczynnik pochłaniania promieniowania lasera CO₂ przez polerowaną miedź wynosi zaledwie 2%). Pochłanianie rośnie wraz ze wzrostem nierówności powierzchni, korozyjności środowiska (kwasowości, wilgotności) i stopniem skorodowania, które z kolei rosną ze wzrostem temperatury. Największą pochłaniania odznaczają się powierzchnie chropowate, ciemne, matowe, utlenione, skorodowane. Pochłanianie dielektryków (ceramik) jest większe niż metali. Poza ww. czynnikami pochłanianie promieniowania przez warstwę wierzchnią zależy od długości



Rys. 3. Charakter zależności profilu rozkładu temperatury T w nagrzewanym metalu przy różnych czasach nagrzewania τ i gęstości mocy q

fali padającego promieniowania oraz od stanu skupienia materiału pochłaniającego [2]. W celu zwiększenia absorpcyjności promieniowania laserowego na powierzchnię materiału modyfikowanego nanosi się powłoki absorpcyjne np. grafit, sadza, powłoki fosforanowe [3, 4].

Wzrost temperatury powierzchni nagrzewanego laserowo materiału powoduje wzrost absorpcji promieniowania (rys. 3). Dla metali obrabianych w atmosferze powietrza wzrost współczynnika pochłaniania występuje również w wyniku utleniania się powierzchni, a tlenki zazwyczaj – w tej samej temperaturze – lepiej pochłaniają promieniowanie niż metale. Dalszy bardzo gwałtowny, nawet skokowy wzrost absorpcji powoduje zmiana stanu skupienia nagrzewanego materiału (przetopienie). Powstający przy jeszcze większych gęstościach mocy i przy nagrzewaniu bardzo krótkimi impulsami promieniowania (np. nanosekundowymi) obłok plazmy ekranuje nagrzewany materiał [2].

4. GĘSTOŚĆ MOCY PADAJĄCEJ I POCHŁONIĘTEJ

Aby zapewnić możliwie wysoką efektywność nagrzewania laserowego, urządzenia, którego sprawność energetyczna wynosi zaledwie kilka procent, współczynnik pochłaniania monochromatycznego promieniowania laserowego powinien być możliwie duży, gdyż moc użyteczna P_u , która może być wykorzystana do obróbki, równa jest mocy pochłoniętej P_a , która z kolei równa się mocy emitowanej P_e przez laser pomniejszonej o współczynnik pochłaniania [2]:

$$P_u = P_a = a_\lambda P_e$$

Praktycznie współczynnik a_λ może być większy od 0 i mniejszy od 1, czyli zawierać się w przedziale $0 < a_\lambda < 1$. Zakładając przedział od $a_\lambda = 0,1$ do $a_\lambda = 0,9$ ze wzoru wynika, że wartość P_u może się różnić nawet 9 razy i przykładowo dla $P_e = 1000$ W np. może wynosić odpowiednio $P_u = 100$ W lub $P_u = 900$ W. Są to wartości różniące się o blisko rząd wielkości [2].

W technice laserowej nie tylko ważna jest moc pochłonięta (użyteczna) P_u , ale ważniejsza jest gęstość mocy pochłoniętej:

$$q_u = \frac{P_u}{d}$$

gdzie: d – średnica plamki laserowej. Ścisłej mówiąc, najważniejszy jest rozkład tej gęstości w plamce laserowej, bowiem od niego zależy wartość temperatury w różnych miejscach plamki laserowej, która dodatkowo zależy od zmiennego z temperaturą współczynnika pochłaniania. Najczęściej rozkład gęstości mocy

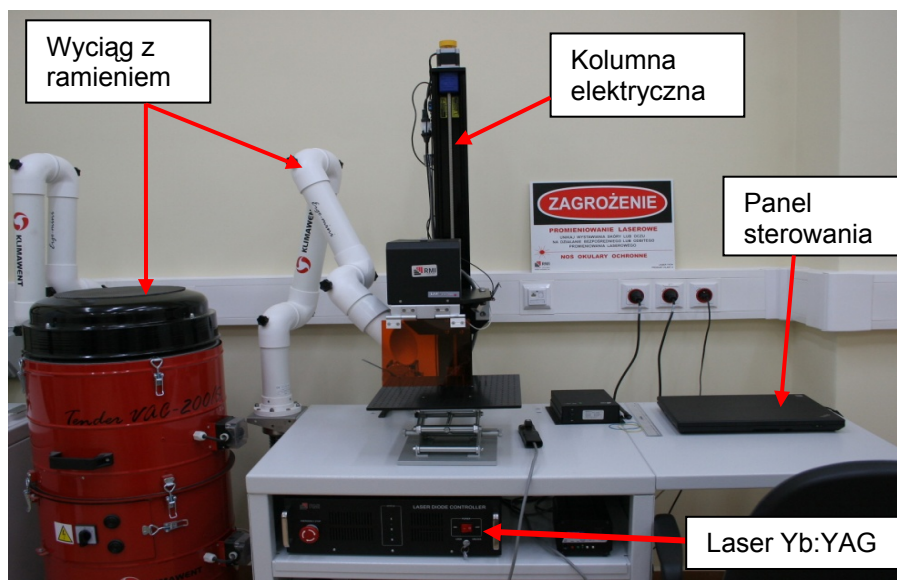
emitowanej przez laser ma charakter gaussowski, przydatny zwłaszcza w procesach cięcia i spawania, rzadziej gęstość mocy ma stałą wartość w całej plamce laserowej (np. w laserach diodowych i włóknowych) – przydatną zwłaszcza w obróbkach areologicznych [2].

5. CEL PRACY

Celem pracy było doświadczalne określenie wpływu gęstości mocy q monoimpulsowego promieniowania laserowego o długości fali $\lambda = 1064$ nm, emitowanego przez iterbowy laser włóknowy o mocy $P = 30$ W, na stereometrię powierzchni stali 41Cr4 po teksturuwaniu laserowym.

6. BADANIA I MATERIAŁY

W badaniach zastosowano iterbowy laser włóknowy Yb:YAG emitujący promieniowanie o długości fali $\lambda = 1064$ nm i mocy $P = 30$ W (rys. 4).



Rys. 4. Stanowisko laserowe wyposażone w iterbowy laser włóknowy Yb:YAG o długości fali promieniowania $\lambda = 1064$ nm i mocy $P = 30$ W, głowicę Galvo, kolumnę elektryczną do precyzyjnego ogniskowania wiązki laserowej, panel sterujący oraz wyciąg z ramieniem

Badaniom zostały poddane próbki ze stali 41Cr4. Jest to stal konstrukcyjna wyższej jakości do ulepszania cieplnego stosowana w produkcji wałów, tulei, elementów przekładni zębatych. Na próbkach pojedynczymi impulsami wykonane

zostały mikrokratery (mikrozasobniki). Każdy mikrokrater wykonany został przy innej gęstości mocy promieniowania laserowego w zakresie od $0,32 \div 1,06 \text{ MW/cm}^2$.

7. WYNIKI BADAŃ

W ramach przeprowadzonych eksperymentów, stosując różną gęstość mocy promieniowania laserowego ($\lambda = 1064 \text{ nm}$), uzyskano różne kształty geometryczne mikrokraterów (tab. 1).

TABELA 1

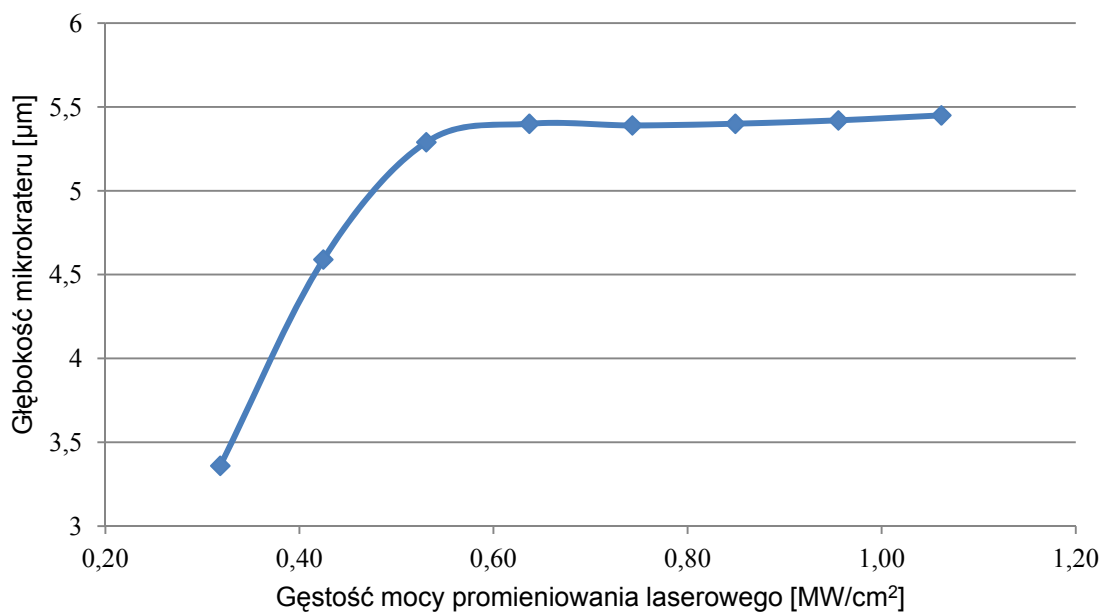
Wyniki wpływu różnej gęstości promieniowania laserowego $\lambda = 1064 \text{ nm}$ na głębokość i średnicę mikrokraterów po teksturowaniu laserowym

L.p.	Ilość impulsów	Moc promieniowania [W]	Gęstość mocy promieniowania [MW/cm^2]	Głębokość mikrokrateru [μm]	Średnica mikromikrokrateru [μm]
1	1	9	0,32	3,36	42,40
2	1	12	0,42	4,59	51,04
3	1	15	0,53	5,29	55,17
4	1	18	0,64	5,40	66,48
5	1	21	0,74	5,39	68,90
6	1	24	0,85	5,40	64,86
7	1	27	0,96	5,42	70,43
8	1	30	1,06	5,45	76,39

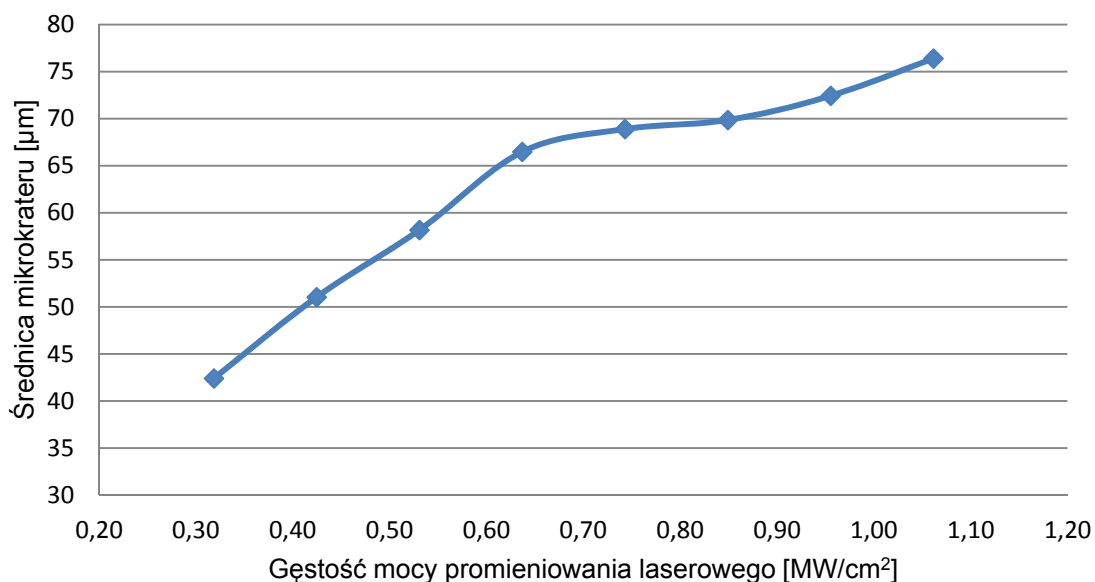
Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono głębokość i średnicę mikrokraterów w funkcji gęstości mocy promieniowania laserowego.

Z wyników badań zamieszczonych na rysunku 5 wynika, że około 2-krotny wzrost gęstości mocy (od $0,32 \div 0,53 \text{ MW/cm}^2$) powoduje niemal liniowy przyrost głębokości mikrokraterów (od $3,36$ do $5,29 \mu\text{m}$). Po przekroczeniu gęstości mocy $0,53 \text{ MW/cm}^2$ zmniejsza się intensywność wzrostu głębokości mikrokraterów od $5,29 \mu\text{m}$ do $5,45 \mu\text{m}$. Przyczyną tego jest prawdopodobnie tzw. „efekt ekranowania plazmą laserową”, który znacznie lub nawet całkowicie ogranicza (odbija, rozprasza) promieniowanie laserowe.

Z rysunku 6 wynika, że wraz ze wzrostem gęstości mocy promieniowania laserowego zwiększa się także średnica wytworzonych mikrokraterów w zakresie $42,4 \div 76,39 \mu\text{m}$. Tak znaczący wzrost średnicy uzyskanych mikrokraterów spowodowany jest prawdopodobnie efektem zwiększania się wymiarów obłoku plazmy laserowej, która bezpośrednio oddziałuje z powierzchnią stali 41Cr4. Wraz ze wzrostem gęstości mocy promieniowania laserowego wzrasta również temperatura plazmy oraz generowana jest także coraz większa amplituda ciśnienia. Efekty tych zjawisk są wyraźnie widoczne na rysunku 7 a, c, e.



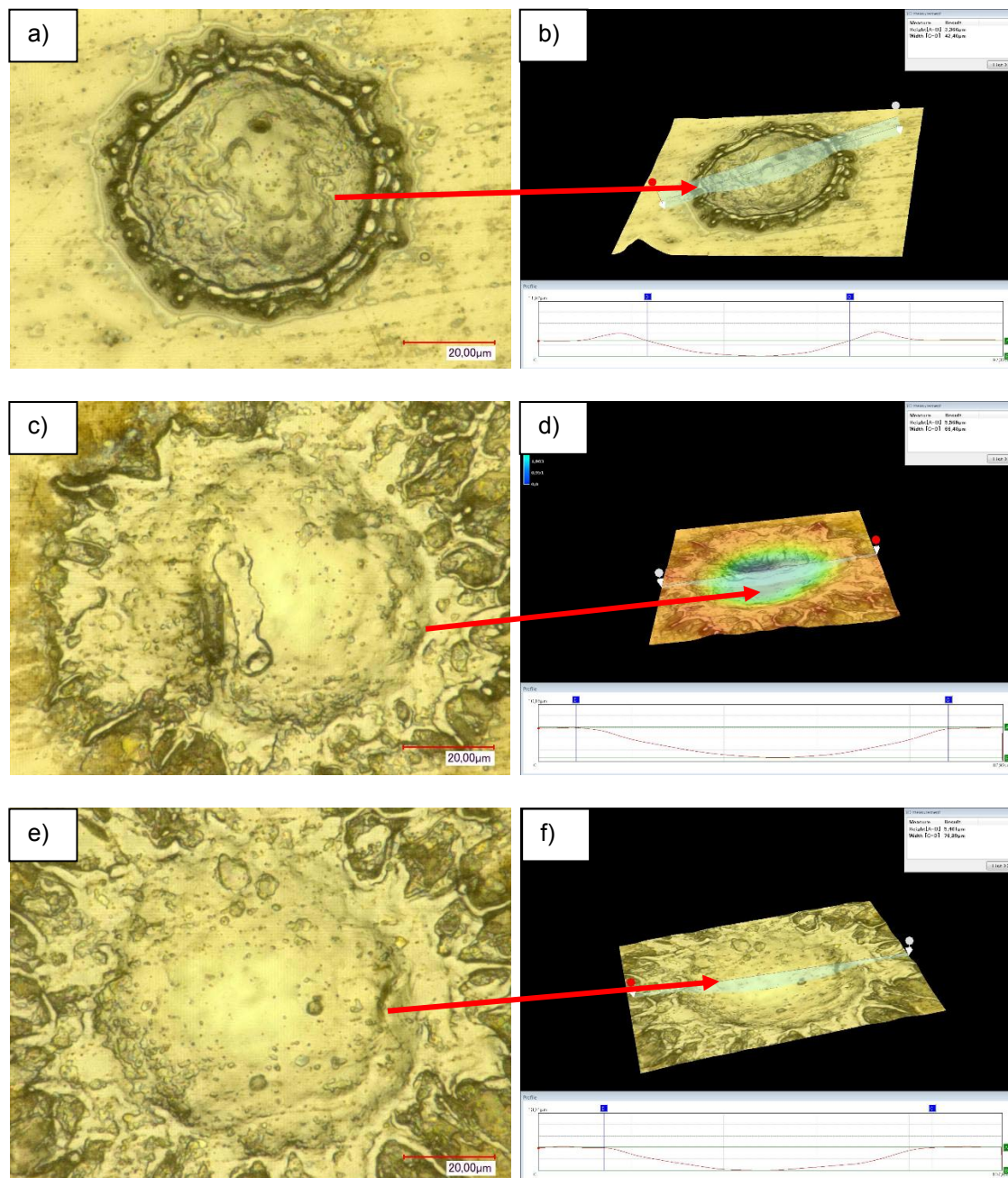
Rys. 5. Głębokość mikrokraterów w funkcji gęstości mocy promieniowania laserowego: stal 41Cr4, laser włóknowy Yb:YAG, długość fali promieniowania $\lambda = 1064$ nm, czas ekspozycji na promieniowanie $\tau \sim 100$ ns



Rys. 6. Średnica mikrokraterów w funkcji gęstości mocy promieniowania laserowego: stal 41Cr4, laser włóknowy Yb:YAG, długość fali promieniowania $\lambda = 1064$ nm, czas ekspozycji promieniowania $\tau \sim 100$ ns

Na rysunku 7 przedstawiono charakterystyczną stereometrię powierzchni stali 41Cr4 powstałą po ablacyjnym teksturowaniu laserowym przy gęstościach mocy w zakresie od 0,32 do 1,06 MW/cm². Przy małej gęstości mocy promie-

niowania laserowego $q = 0,32 \text{ MW/cm}^2$ mikrokrater posiada dość regularne kształty (rys. 7a). Głębokość wynosi $3,36 \mu\text{m}$, a średnia $42,40 \mu\text{m}$. Wokół mikrokrateru widać wyraźną mikrowypływkę. Prawdopodobnie ze względu na małą amplitudę ciśnienia generowanego w plazmie laserowej obserwuje się niewielki efekt ekstruzji ciekłego materiału. Przy większych gęstościach mocy w zakresie



Rys. 7. Stereometria powierzchni stali 41Cr4 po ablacyjnym teksturoowaniu laserowym przy różnych gęstościach mocy promieniowania: a, b) $q = 0,32 \text{ MW/cm}^2$, c, d) $q = 0,64 \text{ MW/cm}^2$, e, f) $q = 1,06 \text{ MW/cm}^2$, a, c, e) stereometria powierzchni, b, d, f) profil kształtu mikrokraterów, laser włóknowy Yb:YAG, $\lambda = 1064 \text{ nm}$, $\tau \sim 100 \text{ ns}$

0,64 ÷ 1,06 MW/cm² wyraźnie widać znacznie zwiększoną strefę wyrzuconego materiału wokół mikrokrateru. Stwierdzono także brak wyraźnej granicy pomiędzy zasobnikiem, a materiałem. Przy tak wysokich gęstościach mocy promieniowania głębokość zasobników zawiera się w przedziale 5,4 ÷ 5,45 μm, natomiast ich średnica wynosi 66,48 ÷ 76,39 μm. Zjawisko to potęguje się wraz ze wzrostem gęstości mocy, gdyż wzrasta zarówno temperatura jak i amplituda ciśnienia.

W celu lepszego zobrazowania idei procesu ablacyjnego teksturowania laserowego oraz wpływu gęstości mocy promieniowania na geometrię powierzchni, na rysunku 8 przedstawiono profile powstałych mikrokraterów. Wyraźne różnice widać porównując małe gęstości mocy (np. 0,32 MW/cm²) i duże (np. 0,64 MW/cm²). Przy gęstościach mocy powyżej 0,64 MW/cm² nie zaobserwowano wyraźnej różnicy w kształcie zasobnika.

8. WNIOSKI

1. W celu zwiększania gęstości mocy promieniowania laserowego padającego na powierzchnię materiału mogą być wykorzystywane dwie metody:

- ogniskowanie wiązki laserowej przy stałej mocy promieniowania,
- zwiększanie mocy promieniowania przy zachowaniu stałej wielkości plamki laserowej.

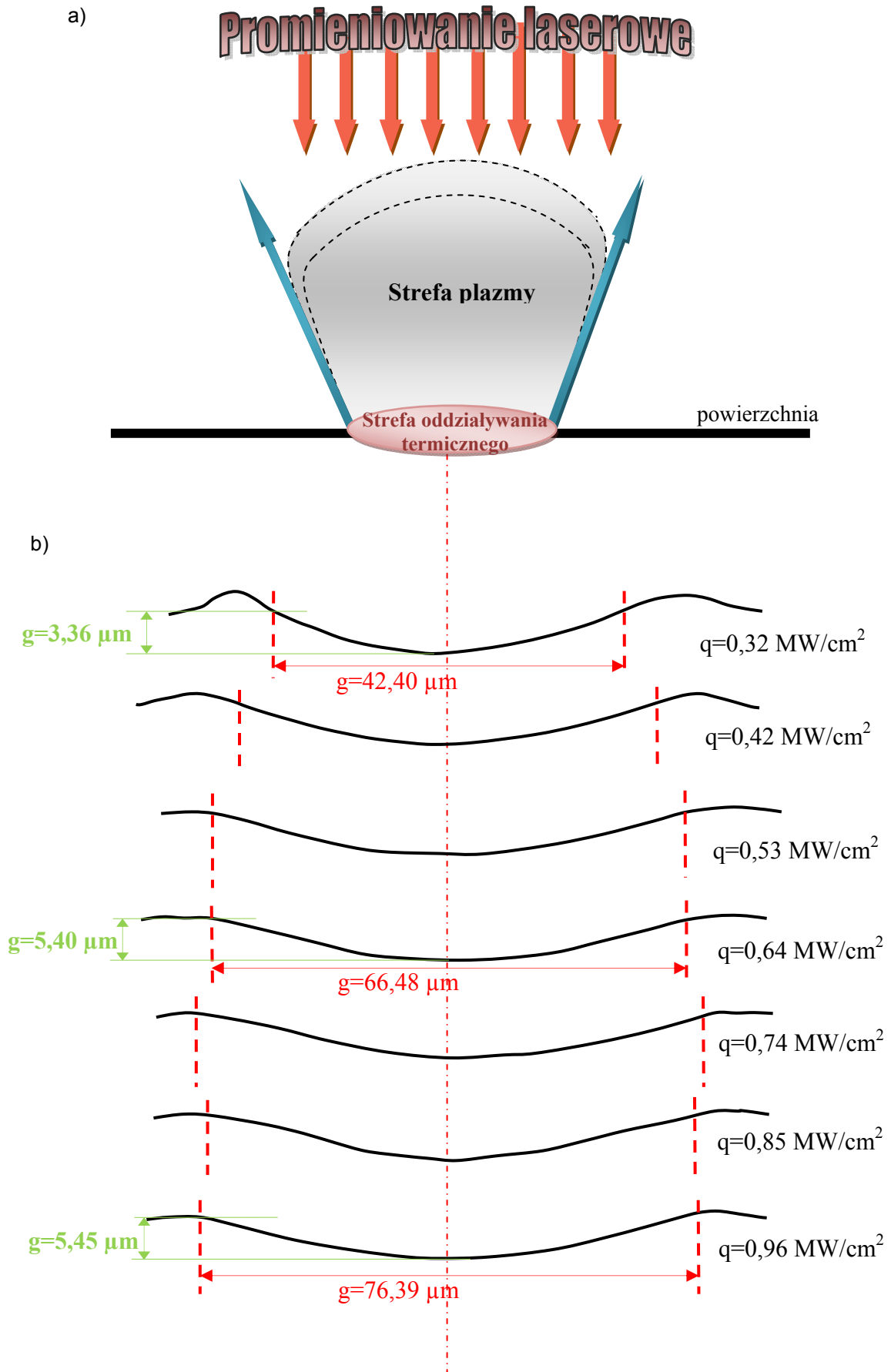
W badaniach laboratoryjnych oddziaływania promieniowania laserowego ($\lambda = 1064$ nm) z powierzchnią stali 41Cr4 zastosowano drugi wariant, czyli zwiększono moc promieniowania. Przy ustalonym ogniskowaniu związanym z odpowiednim systemem optycznym (głowica Galvo), efekt generowania plazmy laserowej wyraźnie wzrasta. Zwiększa się strefa oddziaływania plazmy laserowej powodując zwiększanie strefy modyfikowanego materiału (nagrzewanie, topnienie, ablacja z efektem termicznym).

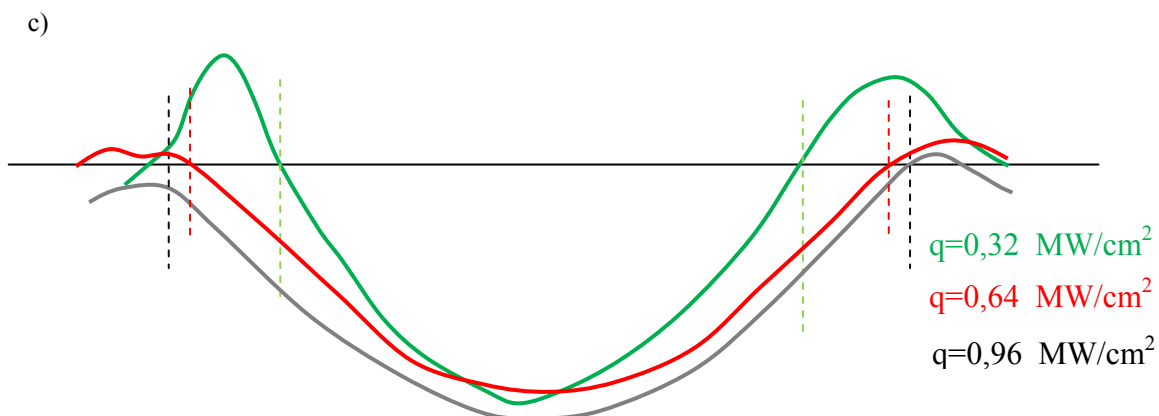
2. W wyniku przeprowadzonych badań wpływu gęstości mocy promieniowania laserowego o długości fali $\lambda = 1064$ nm na efektywność jednoimpulsowego teksturowania laserowego, uzyskano następujące parametry geometryczne mikrokraterów olejowych na powierzchni stali 41Cr4:

- głębokość mikrokraterów – 3,36 ÷ 5,45 μm,
- średnica mikrokraterów – 42,40 ÷ 76,39 μm.

3. Wraz ze wzrostem gęstości mocy promieniowania laserowego do $q = 0,53$ MW/cm² wyraźnie wzrasta efektywność ablacyjnego teksturowania laserowego, szczególnie głębokość i średnica mikrokraterów.

4. Zwiększając gęstość mocy promieniowania laserowego $q > 0,53$ MW/cm² efektywność ablacyjnego teksturowania laserowego wzrasta minimalnie. Może to być spowodowane powstaniem ekranującego obłoku plazmy, uniemożliwiającego dalsze efektywne oddziaływanie wiązki laserowej na stal 41Cr4.





Rys. 8. Schemat poglądowy oraz profile kształtu mikrokraterów po oddziaływaniu pojedynczego impulsu laserowego o różnej gęstości mocy promieniowania na powierzchnię stali 41Cr4: a) schemat poglądowy, b) charakterystyczne profile mikrokraterów, c) porównawcze zestawienie wybranych profili z uwypukleniem różnic kształtu; laser włóknowy Yb:YAG, $\lambda = 1064 \text{ nm}$, $\tau \sim 100 \text{ ns}$

LITERATURA

1. Burakowski T., Wierzchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. WNT, Warszawa 1995.
2. Burakowski T.: Rola pochłaniania promieniowania w procesie nagrzewania laserowego. Prace Instytutu Elektrotechniki. Zeszyt 245/2010. Warszawa 2010
3. Cruciani D., Cantello M., Lavona G., Ramous E., Tiziani A.: Laser surface treatment with different absorption coating. Raport No C3-1. XI Congress International de Electrotermia, Malaga 1988
4. Przybyłowicz J., Przybyłowicz K.: Egzotermiczne powłoki antyrefleksyjne przy obróbce laserowej stali. Mat. Konf. II Konferencji Naukowej „Obróbki powierzchniowe”, Kule 13-15.10.1993, s. 117-119.

Rękopis dostarczono dnia 26.04.2012 r.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE EFFECT OF DENSITY OF POWER LASER $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ON THE EFFECTIVENESS OF LASER STEEL ONE PULSE TEXTURING 41Cr4

Tadeusz BURAKOWSKI, Wojciech NAPADŁEK,
Adam WOŹNIAK, Izabela KALMAN

ABSTRACT *This study attempts to determine the effect of the experimental efficiency of the one pulse laser texturing of the alloy 41Cr4. The study used modern ytterbium fiber laser pulse and*

solid galvo head with wavelength $\lambda = 1064 \text{ nm}$ and nanosecond pulse duration. The geometrical analysis produced microkraters performed using an optical microscope with fiber-optic image transmission. One study found that an increase in the radiation power density $q = 0,6 \text{ MW/cm}^2$ significantly affect the efficiency (depth) of ablative laser texturing. After crossing the power density is a significant reduction in the efficiency of laser ablation process. This is probably connected with the phenomenon of plasma shielding generated in the laser pulse.

Keywords: *laser beam, wavelength of radiation, power density, steel 41Cr4*



Prof. dr hab. Inż. Tadeusz BURAKOWSKI. Zainteresowania naukowe prof. T. Burakowskiego chronologicznie dotyczą: techniki raketowej, podczerwieni, termometrii i termokinetyki, urządzeń grzejnych, energochłonności obróbki cieplnej, inżynierii materiałowej i inżynierii powierzchni. Ostatnie dwadzieścia lat Profesor poświęcił inżynierii powierzchni, w której to dziedzinie najpełniej uwidoczniły się jego przemysłowa, badania i możliwości. Jest uznawany za „ojca” polskiej inżynierii powierzchni. Założyciel (w 1991 r.) i przewodniczący (do dziś) Międzysekcyjnego Zespołu Inżynierii Powierzchni Komitetu Budowy Maszyn PAN. Łączny dorobek Profesora obejmuje ponad 650 pozycji (ok. 180 autorskich), w tym 6 monografii (w 6 językach, m.in. polskim, chińskim, rosyjskim, angielskim), 21 podręczników i książek, 180 artykułów naukowych (42 za granicą), ok. 220 artykułów technicznych, 180 wygłoszonych referatów (63 za granicą) i 31 patentów. W ostatnich latach wiele uwagi poświęca nowoczesnym technologiom laserowym mającym zastosowanie w inżynierii powierzchni (m.in. mikroobróbce laserowej w zakresie czyszczenia oraz umacniania warstwy wierzchniej materiałów z wykorzystaniem fal uderzeniowych generowanych impulsem laserowym). Kilkadziesiąt prac jego współautorstwa znalazło zastosowanie przemysłowe, w tym kilka konstrukcji urządzeń i aparatury pomiarowej. W 1985 r. uzyskał zespołową nagrodę Mistrza Techniki NOT. Jest członkiem trzech rad programowych czasopism PAN. Jest redaktorem działowym w dwóch czasopismach naukowo-technicznych. Członek wielu sekcji naukowych w kraju i za granicą.

Dr inż. Wojciech NAPADŁEK jest autorem lub współautorem ponad dwustu publikacji naukowo – technicznych z dziedziny mechaniki i budowy maszyn, a w szczególności pojazdów mechanicznych. Specjalizuje się w inżynierii produkcji oraz technologii napraw pojazdów mechanicznych. Szczególne zainteresowania naukowe to inżynieria powierzchni wykorzystująca nowoczesne technologie wiązkowe (laserowe i plazmowe), zarówno w skali makro-, mikro- oraz nanotechnologii. Jest współtwórcą kilku wdrożeń przemysłowych z tej dziedziny. Bierze udział w wielu projektach badawczych i celowych. Obecnie zajmuje się oddziaływaniem promieniowania laserowego z materiałem w zakresie spawania, napawania, teksturowania, czyszczenia laserowego oraz umacniania warstwy wierzchniej materiałów z wykorzystaniem fal uderzeniowych generowanych impulsem laserowym.



Dr inż. Adam WOŹNIAK prowadzi badania w zakresie opracowania podstaw technologii modyfikacji warstwy wierzchniej elementów silników spalinowych z wykorzystaniem nowoczesnych technologii inżynierii powierzchni, opracowania podstaw technologii wytwarzania systemów warstw wierzchnich i powłok narażonych na szoki cieplne i zużycie tribologiczne, wykorzystania pokryć ceramicznych i kompozytowych do kształtowania właściwości użytkowych elementów silników spalinowych pojazdów mechanicznych. Autor lub współautor wielu publikacji, referatów i komunikatów prezentowanych w czasopiśmie i na konferencjach naukowych.



Mgr inż. Izabela KALMAN ukończyła Wojskową Akademię Techniczną na Wydziale Mechanicznym. Obecnie jest doktorantką i prowadzi badania w zakresie inżynierii powierzchni wykorzystując przede wszystkim technologie laserowe. Szczególnie interesuje się modyfikacją laserową powłok lakierowych stosowanych w pojazdach samochodowych.

Współautorka kilku publikacji i referatów prezentowanych w czasopiśmie i na konferencjach naukowych.

