

Otrzymano: 19 czerwca 2017 / Zaakceptowano: 25 września 2017 / Zamieszczono na WWW: 17 listopada 2017

*ablacja laserowa,
mikroobróbka laserowa,
węglik krzemu*

Łukasz NORZYMBERCZYK^{1,2*}

WPLYW WYBRANYCH PARAMETRÓW ABLACJI LASEROWEJ NA WYDAJNOŚĆ OBRÓBKĘ ORAZ CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI SPIEKANEGO WĘGLIKA KRZEMU

W pracy przedstawiono badania wpływu mocy, czasu trwania oraz częstotliwości impulsów lasera ablacyjnego na wydajność obróbki i chropowatość powierzchni spiekane węglika krzemu. Wydajność obróbki odniesiono do jednego cyklu obróbkowego, zaś do oceny chropowatości przyjęto średnią arytmetyczną rzędnych profilu R_a oraz największą wysokość profilu chropowatości R_z . Stosując plan Hartleya wyznaczono funkcje obiektu badań. Stwierdzono, że największy wpływ na przyjęte kryteria oceny ma czas trwania impulsu lasera, natomiast mniejszy jest wpływ mocy oraz częstotliwości impulsów lasera.

1. WPROWADZENIE

W wielu dziedzinach techniki widoczne jest dążenie do uzyskiwania powierzchni funkcjonalnych, cechujących się określonym kształtem, topografią powierzchni, układem śladów obróbkowych czy stanem warstwy wierzchniej. W zakresie techniki uszczelnień mechanicznych przykładami takich powierzchni mogą być czoła pierścieni ślizgowych, które w znaczący sposób determinują jakość pracy całego uszczelnienia. Liczne publikacje (m.in. [1,2,3]) oraz badania własne prowadzone w firmie ANGA Uszczelnienia Mechaniczne Sp. z o.o. dowodzą, że skutecznym sposobem zwiększenia trwałości oraz skuteczności uszczelnienia jest teksturowanie powierzchni czołowych pierścieni. W przypadku pierścieni wykonanych z takich materiałów jak węglik krzemu SiC, tlenek glinu Al_2O_3 czy węglik wolframu WC, teksturowanie prowadzone tradycyjnymi technikami jest utrudnione ze względu na ich bardzo wysoką twardość oraz doskonałą odporność chemiczną. Właściwości te nie są jednak przeszkodą przy zastosowaniu obróbki metodą ablacji laserowej.

Ablacja laserowa polega na usunięciu przez odparowanie warstwy wierzchniej materiału poddanego impulsowemu działaniu promieni lasera o odpowiedniej gęstości mocy [4]. Efektywność ablacji laserowej zależy zarówno od parametrów optycznych i termicznych materiału obrabianego, jak i od parametrów wiązki lasera. Do

¹ ANGA Uszczelnienia Mechaniczne Sp. z o.o., Kozy k. Bielska-Białej

² Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji

* E-mail: lnorymbarczyk@anga.com.pl

najistotniejszych z nich można zaliczyć częstotliwość impulsów lasera, gęstość energii oraz czas trwania impulsu [5].

2. METODYKA I ZAKRES BADAŃ

Celem badań było określenie wpływu mocy, czasu trwania impulsów lasera, a także ich częstotliwości, na wydajność obróbki i chropowatość powierzchni spiekane węglika krzemu. Obróbkę techniką ablacji laserowej przeprowadzono w firmie ANGA Uszczelnienia Mechaniczne Sp. z o.o. z siedzibą w Kozach. Obrabiarka wyposażona jest w głowicę laserową typ LH3ax (rysunek 1) oraz zespół rezonatora o mocy 30W klasy 2M Flexi-Pulse (impulsowy laser iterbowy Yb o długości fali 1055-1075 nm). Posiada ona także sondę pomiarową Renishaw TP1S oraz wbudowaną kamerę wysokiej rozdzielczości umożliwiającą uzyskanie wysokiej dokładności pozycjonowania.



Rys. 1. Głowica laserowa typ LH3ax obrabiarki
Fig. 1. The laser head type LH3ax of machine tool

Na powierzchni czołowej pierścienia uszczelniającego ze spiekane węglika krzemu SiC wykonano 33 równomiernie rozmieszczone wgłębenia o wymiarach 5×8 mm metodą ablacji laserowej. Pierścień został wcześniej obrobiony przez docieranie na docierarce jednotarczowej przy użyciu kompozytowego docieraka i zawiesziny ze ścierniwem diamentowym. Parametry chropowatości powierzchni przed obróbką techniką ablacji laserowej zestawiono w tabeli 1 (wartości średnie z 5 pomiarów, pomiary wg PN-EN ISO 4287:1999 oraz PN-ISO 4288:1997).

Tabela 1. Chropowatość powierzchni pierścienia z węgla krzemu przed ablacją
 Table 1. Roughness of the surface of a silicon carbide ring before the ablation

$Ra, \mu\text{m}$	$Rq, \mu\text{m}$	$Rz, \mu\text{m}$	$Rt, \mu\text{m}$	$Rp, \mu\text{m}$	$Rv, \mu\text{m}$
0,11	0,16	1,39	2,07	0,25	1,82

Przyjęto następujące wielkości wejściowe związane z parametrami obróbki: moc lasera N (w % mocy rezonatora), czas trwania impulsu lasera τ (w ns) oraz częstotliwość impulsów f (w kHz).

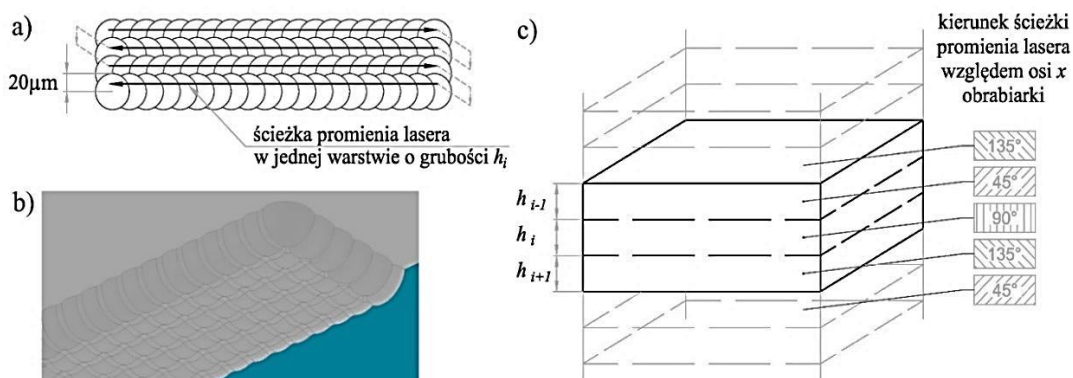
Wielkościami wyjściowymi były: średnia wydajność obróbki q odpowiadająca grubości warstwy usuniętej w jednym przejściu wyrażona w μm , średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości powierzchni Ra po ablacji oraz największa wysokość profilu chropowatości powierzchni Rz po ablacji w μm .

Jako wielkości stałe przyjęto: materiał przeznaczony do obróbki (spiekany węgiel krzemu SiC, tabela 2) oraz pozostałe parametry i warunki obróbki. Czas obróbki każdej z próbek wynosił $49,3 \pm 0,1$ s.

Tabela 2. Właściwości spiekane go węgla krzemu SiC [6]
 Table 2. Properties of the sintered silicon carbide SiC [6]

Masa właściwa	g/cm^3	3,10
Wytrzymałość na zginanie	MPa	350
Wytrzymałość na ściskanie	MPa	2000
Moduł Younga	GPa	350
Twardość	HV	3000
Wsp. przewodności cieplnej	W/mK	100
Wsp. rozszerzalności cieplnej	10^{-6} 1/K	3,5

Badania prowadzono w oparciu o plan statyczny, zdeterminowany, wieloczynnikowy Hartleya PS/DS-P:Ha₃ przy obszarze zmienności na hiperkuli [7] obejmującej 5 wartości wielkości wejściowych. Sposób prowadzenia wiązki lasera przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Sposób prowadzenia promienia lasera: a) ścieżka promienia lasera w jednej warstwie, b) wizualizacja fragmentu powierzchni obrobionej w pierwszym przejściu, c) kierunki ścieżki promienia lasera w kolejnych przejściach

Fig. 2. The way of laser beam: a) the path of the laser beam in a single layer, b) visualization of the machined surface in the first passage, c) directions of the path of the laser beam in successive passes

Dla każdego z 11 układów planu przyjęto 3 powtórzenia. Wgłębienia wykonano w kształcie jednakowych prostokątów o wymiarach 5×8 mm przyjmując dla każdej z nich 33 przebiegi (każdorazowe obniżenie ogniskowej o $0,3 \mu\text{m}$, nominalna głębokość wgłębienia $10 \mu\text{m}$). Wgłębienia po obróbce zostały oczyszczone włókniną ścierną w celu usunięcia z powierzchni produktów ablacji.

Oprogramowanie obrabiarki ogranicza możliwości swobodnego wyboru czasu trwania impulsów lasera τ jedynie do pewnego zbioru wartości, który w przybliżeniu odpowiada ciągowi logarytmicznemu. Z tego powodu zastosowano linearyzację wektora opisującego możliwe wartości zmiennej τ poprzez wprowadzenie zastępczej wielkości wejściowej τ_1 :

$$\tau_1 = \log_{10} \tau \quad (1)$$

gdzie: τ – czas trwania impulsu lasera.

Współczynnik determinacji dla przyjętej linearyzacji wyniósł $R^2=0,99$. Wartości liczbowe parametrów τ oraz τ_1 zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Linearyzacja wartości czasu trwania impulsu lasera
Table 3. Linearization of the laser pulse duration values

τ , ns	4	8	14	20	30	50	100
$\tau_1 = \log_{10} \tau$	0,60	0,90	1,15	1,30	1,48	1,70	2,00

Średnią wydajność obróbki q odpowiadającą grubości warstwy usuniętej w jednym przejściu wyznaczano poprzez pomiar całkowitej głębokości wgłębienia po obróbce, wyrażonej jako parametr Pt profilu przekroju poprzecznego, odniesionej do jednego przejścia lasera. Pomiary głębokości wgłębienia oraz chropowatości powierzchni przeprowadzono przy użyciu profilometru Form Talysurf 120 (Taylor Hobson) z końcówką wyposażoną w standardowy stożek diamentowy o promieniu $r_k=2 \mu\text{m}$.

W badaniach przyjęto następujące zakresy zmienności wielkości wejściowych: moc lasera 20-100%, czas trwania impulsu 4-100 ns (odpowiadające im wartości logarytmu: 0,60-2,00) oraz częstotliwość 50-100 kHz. Poziomy i wartości zmiennych niezależnych odpowiednie do realizacji planu PS/DS-P:Ha₃ zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Poziomy i wartości wielkości wejściowych
Table 4. Levels and values of the input parameters

Wielkości wejściowe	Wartości dla kodów ($\alpha = 1,732$)				
	$-\alpha$	-1	0	$+1$	$+\alpha$
x_i					
$x_1 = N$, %	20	37	60	83	100
$x_2 = \tau_1, \log_{10} \tau$, ns	0,60	0,90	1,30	1,70	2,00
$x_3 = f$, kHz	50	61	75	89	100

Dla każdej z wielkości wyjściowych założono funkcję obiektu badań w postaci wielomianu II-go stopnia z podwójną iteracją [7-9]:

$$z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (2)$$

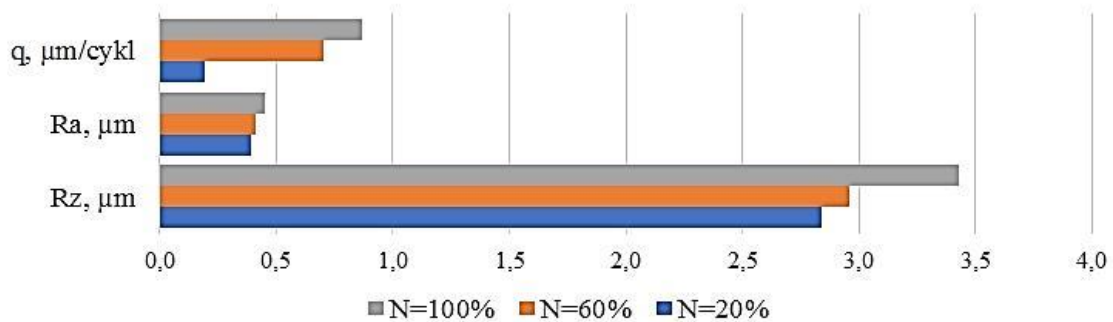
gdzie: $b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{13}, b_{23}$ są współczynnikami wielomianu.

3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

W oparciu o przyjęty plan PS/DS-P:Ha₃ przeprowadzono eksperyment oraz dokonano pomiarów: średniej wydajności obróbki q odniesionej do jednego przejścia, średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni Ra po ablacji, największej wysokości profilu chropowatości powierzchni Rz po ablacji. Nastawy wartości zmiennych wejściowych oraz wyniki pomiarów zmiennych wyjściowych dla poszczególnych układów planu eksperymentu zestawiono w tabeli 5. Wyniki pomiarów dla wartości kodowych: $-\alpha, 0, +\alpha$ zobrazowano na wykresach (rys. 3-5).

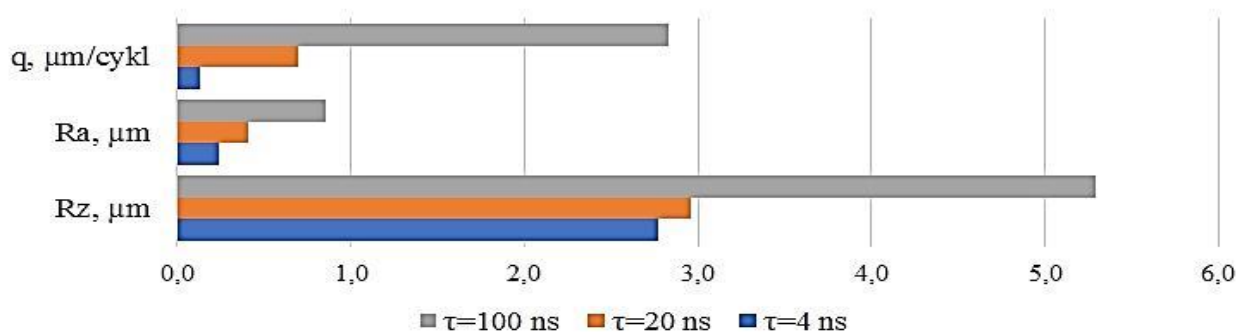
Tabela 5. Schemat realizacji eksperymentu oraz wyniki pomiarów
Table 5. The implementation scheme of the experiment and its results

Nr ukł.	Wielkości wejściowe			Wartości zmierzone			Wartości średnie		
	$X_1 = N$	$x_2 = \tau_1$	$x_3 = f$	$z_1 = q$	$z_2 = Ra$	$z_3 = Rz$	$\bar{z}_1 = \bar{q}$	$\bar{z}_2 = \bar{Ra}$	$\bar{z}_3 = \bar{Rz}$
	%	$\log_{10} ns$	kHz	$\mu m/cykl$	μm	μm	$\mu m/cykl$	μm	μm
1	37	0,90	89	0,23; 0,23; 0,23	0,30; 0,32; 0,29	2,93; 3,18; 3,04	0,23	0,30	3,05
2	83	0,90	61	0,33; 0,34; 0,34	0,34; 0,35; 0,32	2,45; 2,31; 2,32	0,34	0,34	2,36
3	37	1,70	61	0,96; 0,95; 0,97	0,47; 0,48; 0,46	3,41; 3,33; 3,45	0,96	0,47	3,40
4	83	1,70	89	2,30; 2,38; 2,33	0,85; 0,86; 0,99	4,81; 5,58; 6,22	2,34	0,90	5,54
5	20	1,30	75	0,18; 0,21; 0,18	0,37; 0,39; 0,41	2,72; 2,95; 2,86	0,19	0,39	2,84
6	100	1,30	75	0,86; 0,87; 0,89	0,43; 0,46; 0,45	2,97; 3,56; 3,75	0,87	0,45	3,43
7	60	0,60	75	0,13; 0,12; 0,13	0,23; 0,23; 0,26	2,45; 2,49; 3,36	0,13	0,24	2,77
8	60	2,00	75	2,83; 2,82; 2,84	0,74; 0,91; 0,92	4,94; 5,33; 5,61	2,83	0,86	5,29
9	60	1,30	50	0,47; 0,47; 0,48	0,33; 0,34; 0,36	2,51; 2,39; 2,39	0,47	0,34	2,43
10	60	1,30	100	0,94; 0,94; 0,93	0,46; 0,47; 0,45	3,05; 3,24; 3,00	0,93	0,46	3,10
11	60	1,30	75	0,72; 0,69; 0,69	0,42; 0,39; 0,41	3,29; 2,75; 2,83	0,70	0,41	2,96



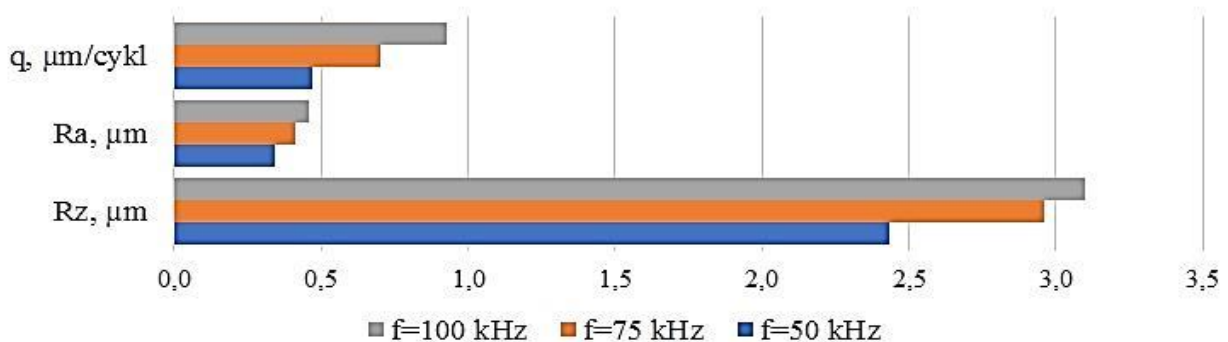
Rys. 3. Wpływ mocy N impulsów lasera na wydajność obróbki q oraz parametry chropowatości Ra i Rz dla ustalonych wartości czasu trwania impulsów i ich częstotliwości ($\tau=20$ ns, $f=75$ kHz)

Fig. 3. The effect of laser pulse power N on machining performance q and roughness parameters Ra and Rz for fixed pulse duration and frequency ($\tau=20$ ns, $f=75$ kHz)



Rys. 4. Wpływ czasu trwania impulsów lasera τ na wydajność obróbki q oraz parametry chropowatości Ra i Rz dla ustalonych wartości mocy impulsów i ich częstotliwości ($N=60\%$, $f=75$ kHz)

Fig. 4. The effect of laser pulse duration τ on machining performance q and roughness parameters Ra and Rz for fixed pulse power and frequency ($N=60\%$, $f=75$ kHz)



Rys. 5. Wpływ częstotliwości impulsów lasera f na wydajność obróbki q oraz parametry chropowatości Ra i Rz dla ustalonych wartości mocy impulsów i ich czasu trwania ($N=60\%$, $\tau=20$ ns)

Fig. 5. The effect of laser pulse frequency f on machining performance q and roughness parameters Ra and Rz for fixed pulse power and duration ($N=60\%$, $\tau=20$ ns)

W oparciu o przedstawione wyniki wyznaczono współczynniki regresji każdej z funkcji obiektu badań, określonych ogólnym wzorem (2). Obliczenia przeprowadzono przy użyciu pakietu R [10,11]. Otrzymano następujące kompletne modele obiektu badań:

a) średnia wydajność obróbki na jeden cykl:

$$q(x_1, x_2, x_3) = 3,018 + 0,01392x_1 - 5,874x_2 - 0,0206x_3 - 0,0000915x_1^2 + 1,633x_2^2 + 0,0000409x_3^2 - 0,02041x_1x_2 - 0,0002791x_1x_3 + 0,03114x_2x_3 \quad (3)$$

b) średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości Ra powierzchni po ablacji:

$$Ra(x_1, x_2, x_3) = 2,697 - 0,01222x_1 - 2,16x_2 - 0,0243x_3 + 0,00001715x_1^2 + 0,3208x_2^2 + 0,00001565x_3^2 + 0,007228x_1x_2 + 0,00001959x_1x_3 + 0,01778x_2x_3 \quad (4)$$

c) największa wysokość profilu chropowatości Rz powierzchni po ablacji:

$$Rz(x_1, x_2, x_3) = 12,9 - 0,1237x_1 - 10,38x_2 - 0,03614x_3 + 0,0001699x_1^2 + 2,378x_2^2 - 0,0001691x_3^2 + 0,05661x_1x_2 + 0,0004936x_1x_3 + 0,03478x_2x_3 \quad (5)$$

Analizę regresji otrzymanych funkcji przeprowadzono przy użyciu pakietu R [3,10]. Istotność modeli regresji weryfikowano za pomocą testu F -Snedecora. W każdym wypadku model kompletny był istotny, jednak analiza testem t -Studenta wykazała obecność nieistotnych współczynników regresji. Po ich eliminacji skorygowano pozostałe wartości współczynników regresji oraz sprawdzono istotność równania regresji. W efekcie otrzymano istotne, na poziomie istotności $\alpha=0,05$, niekompletne modele obiektu badań:

a) średnia wydajność obróbki na jeden cykl:

$$q(x_1, x_2, x_3) = 2,71 + 0,01518x_1 - 5,785x_2 - 0,01447x_3 - 0,000102x_1^2 + 1,598x_2^2 + 0,02041x_1x_2 - 0,0002791x_1x_3 + 0,03114x_2x_3 \quad (6)$$

b) średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości Ra powierzchni po ablacji:

$$Ra(x_1, x_2, x_3) = 2,415699 - 0,008688x_1 - 2,076069x_2 - 0,020775x_3 + 0,290744x_2^2 + 0,007228x_1x_2 + 0,017775x_2x_3 \quad (7)$$

c) największa wysokość profilu chropowatości Rz powierzchni po ablacji:

$$Rz(x_1, x_2, x_3) = 8,000319 - 0,061832x_1 - 8,003112x_2 + 2,24456x_2^2 + 0,054938x_1x_2 + 0,011103x_2x_3 \quad (8)$$

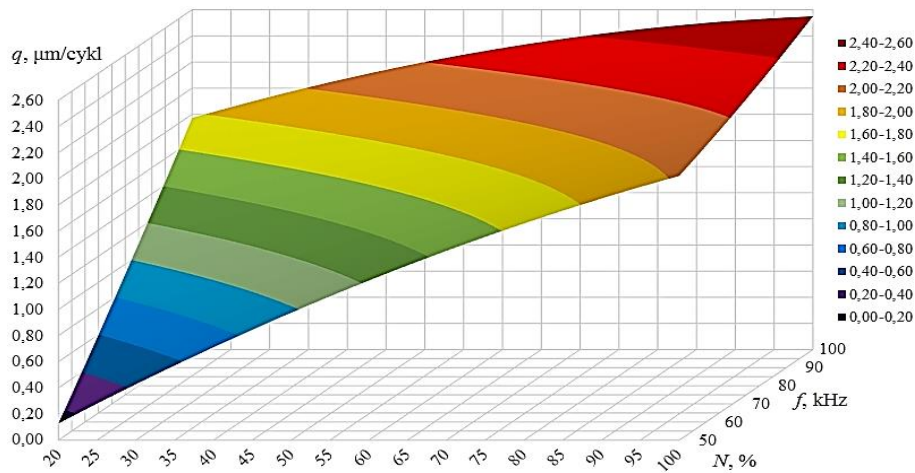
Wartości ekstremalne, tj. maksimum w przypadku średniej wydajności obróbki na jeden cykl q , minima w przypadku parametrów chropowatości Ra i Rz , wyznaczono w programie Scilab [12]. Ze względu na dyskretny charakter zmiennych (wynikający z możliwości oprogramowania obrabiarki) zastosowano metodę iteracyjnego przeszukiwania. Poszukiwane ekstrema wraz z odpowiadającymi im wartościami wielkości wejściowych zestawiono w tabeli 6.

Wartości ekstremalne wielkości wyjściowych występują dla tych samych wartości wielkości wejściowych, zarówno w przypadku modelu kompletnego jak i niekompletnego. Wyżej wymienione wartości ekstremalne są większe w przypadku modelu kompletnego. Największa względna różnica występuje dla wielkości wyjściowej Ra .

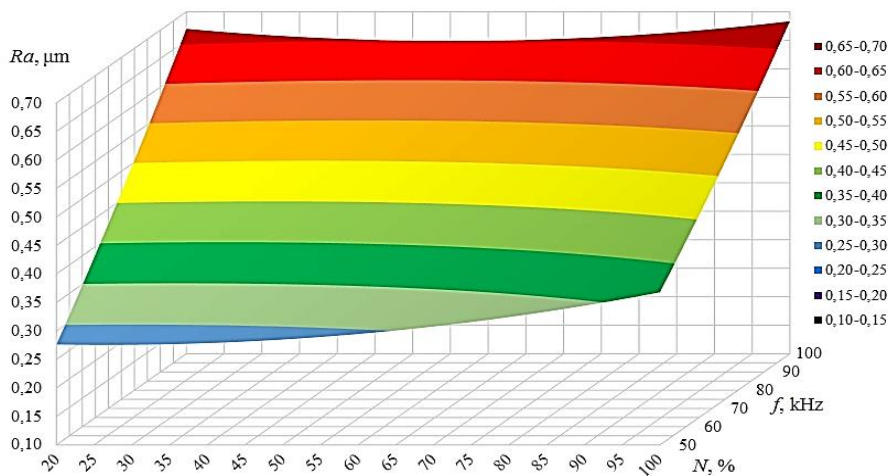
W oparciu o kompletne funkcje obiektu badań dla przyjętej wartości $x_2=1,7$, co odpowiada czasowi trwania impulsu $\tau=50$ ns, sporządzono wykresy przestrzenne (rys. 6-8). Obrazują one zależność wielkości wyjściowych q , Ra oraz Rz od mocy impulsów i ich częstotliwości.

Tabela 6. Wartości ekstremalne funkcji obiektu badań
Table 6. Extreme values of the object funk

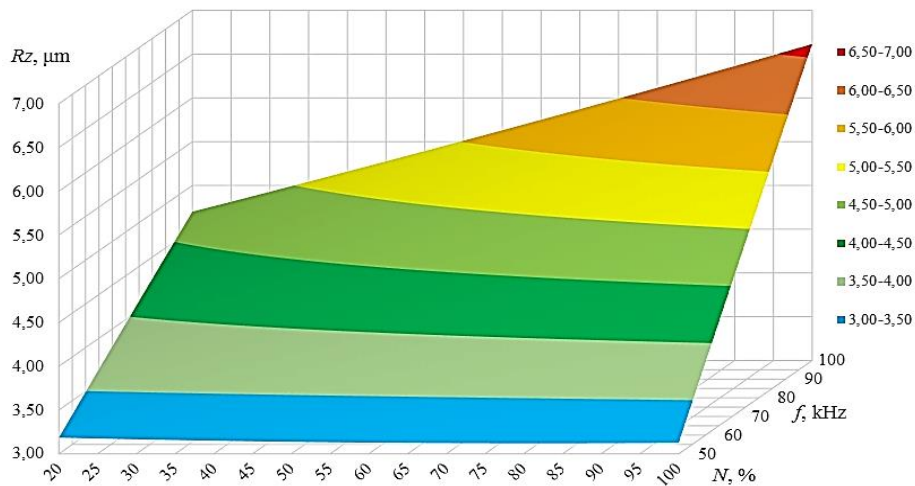
Model	Parametr	$z_1 = q$	$z_2 = Ra$	$z_3 = Rz$
kompletny	ekstremum	<i>maksimum:</i> 4,15 $\mu\text{m}/\text{cykl}$	<i>minimum:</i> 0,14 μm	<i>minimum:</i> 1,54 μm
	$x_1 = N, \%$	100	100	100
	$x_2 = \tau_1, \log_{10} \text{ ns}$	2,0	0,9	0,6
	$x_3 = f, \text{ kHz}$	100	100	50
niekompletny	ekstremum	<i>maksimum:</i> 4,10 $\mu\text{m}/\text{cykl}$	<i>minimum:</i> 0,09 μm	<i>minimum:</i> 1,45 μm
	$x_1 = N, \%$	100	100	100
	$x_2 = \tau_1, \log_{10} \text{ ns}$	2,0	0,9	0,6
	$x_3 = f, \text{ kHz}$	100	100	50



Rys. 6. Zależność wydajności q od mocy N impulsów lasera i ich częstotliwości f ($\tau=50 \text{ ns}$)
Fig. 6. The ablation performance q depending on the laser pulses power N and their frequency f ($\tau=50 \text{ ns}$)



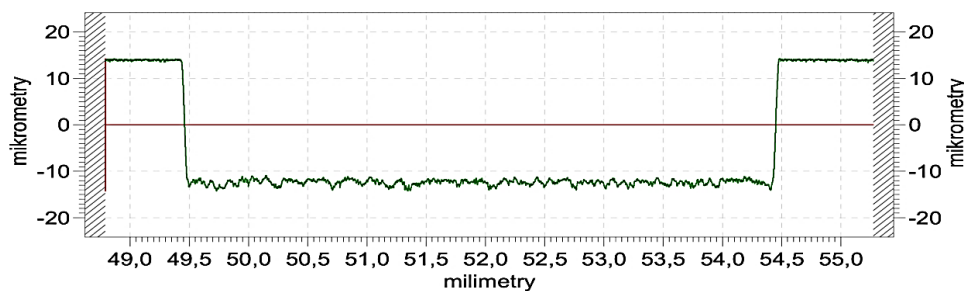
Rys. 7. Zależność wartości parametru chropowatości powierzchni Ra od mocy N impulsów lasera i częstotliwości f ($\tau=50 \text{ ns}$)
Fig. 7. Value of the roughness Ra parameter depending on the power of laser pulses N and frequency f ($\tau=50 \text{ ns}$)



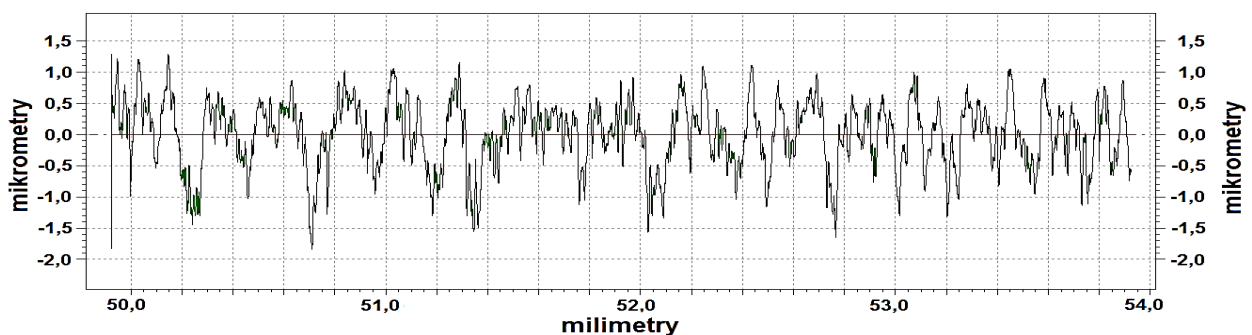
Rys. 8. Zależność wartości parametru chropowatości powierzchni R_z od mocy N impulsów lasera i częstotliwości f ($\tau=50$ ns)

Fig. 8. Value of the roughness R_z parameter depending on the power of laser pulses N and their frequency f ($\tau=50$ ns)

Przykładowy kształt wgłębienia pokazano na rysunku 9, z kolei przykładowy profil chropowatości powierzchni na rysunku 10.



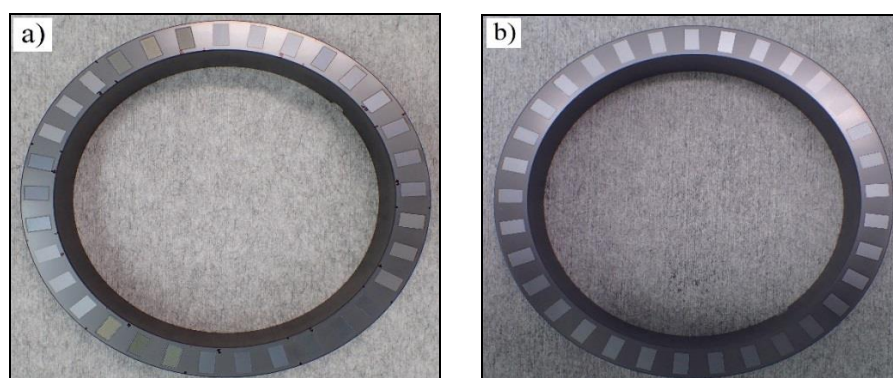
Rys. 9. Kształt wgłębienia po ablacji laserowej
Fig. 9. Shape of the recess after laser ablation



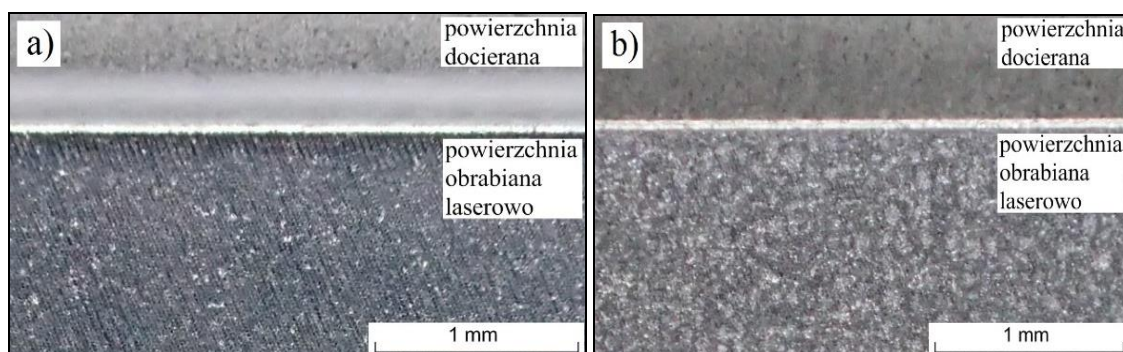
Rys. 10. Profil chropowatości powierzchni dna wgłębienia po ablacji laserowej
Fig. 10. Roughness profile of the sample surface at its depth after laser ablation

Pierścień z węgla krzemu SiC z wykonanymi wgłębieniami przedstawiono na rysunku 11a, zaś pierścień po oczyszczeniu powierzchni włókniną ścierną na rysunku 11b. Mikrografowie powierzchni docieranej i dna wgłębienia obrobionego laserowo

zamieszczono na rysunku 12a, natomiast po oczyszczeniu powierzchni włókniną ścierną na rysunku 12b.



Rys. 11. Pierścień z wykonanymi wgłębieniami przed (a) oraz po (b) oczyszczeniu powierzchni włókniną ścierną
Fig. 11. Ring with set of recesses before (a) and after (b) surface cleaning with an abrasive cloth



Rys. 12. Obraz powierzchni docieranej i dna wgłębienia obrobionego laserowo przed (a) oraz po (b) oczyszczeniu powierzchni włókniną ścierną
Fig. 12. Image of a lapped surface and bottom of the recess made by laser machining before (a) and after (b) surface cleaning with an abrasive cloth

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdza się, że największy wpływ na wydajność q , chropowatość powierzchni określoną parametrami Ra i Rz ma czas trwania impulsów lasera τ . Nieco mniejszy jest wpływ mocy N . Najmniejszy wpływ na wydajność obróbki q oraz chropowatość powierzchni Ra i Rz ma częstotliwość impulsów. Największą wydajność obróbki uzyskano dla następujących wartości wielkości wejściowych: $x_1=N=100\%$, $x_2=2,0$ ($\tau=100$ ns), $x_3=f=100$ kHz.

PODZIĘKOWANIE

Badania wykonano w ramach środków na badania własne firmy ANGA Uszczelnienia Mechaniczne Sp. z o.o.

LITERATURA

- [1] ANTOSZEWSKI B., 2012, *The effect of laser surface texturing on frictional performance of sliding pair*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, 31/103, 14-18.
- [2] WU W., CHEN G., FAN B., LIU J., 2016, *Effect of groove surface texture on tribological characteristics and energy consumption under high temperature friction*, PLoS ONE, 11,4.
- [3] WANG X., ADACHI K., OTSUKA K., KATO K., 2006, *Optimization of the surface texture for silicon carbide sliding in water*, Applied Surface Science, 253(2006), 1282-1286.
- [4] BURAKOWSKI T., MARCZAK J., NAPADŁEK W., 2006, *Istota ablacyjnego czyszczenia laserowego materiałów*, Prace Instytutu Elektrotechniki, 228, 125-135.
- [5] BUJAK J., 2006, *Ocena wpływu wybranych parametrów impulsowej wiązki laserowej na wydajność procesu ablacji tytanu*, Problemy Eksploatacji, 3/2006, 65-73.
- [6] Materiały informacyjne firmy ANGA Uszczelnienia Mechaniczne Sp. z o.o.
- [7] POLAŃSKI Z., 1984, *Planowanie doświadczeń w technice*, PWN, Warszawa.
- [8] PŁONKA S., OGIŃSKI L., 2004, *Podstawy eksperymentalnej optymalizacji parametrycznej operacji wytwórczych*, Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biała.
- [9] PŁONKA S., 2013, *Wielokryterialna optymalizacja procesów wytwarzania części maszyn*, Wydawnictwo WNT, Warszawa.
- [10] FARAWAY J., 2002, *Practical regression and anova using R*, University of Michigan.
- [11] MAINDONALD J., BRAUN J., 2010, *Data analysis and graphics using R*, Cambridge University Press, New York.
- [12] PINCON B., 2000, *Wprowadzenie do Scilaba*, Université Henri Poincaré, Nancy, (przekład z języka francuskiego).

THE EFFECT OF SELECTED LASER ABLATION PARAMETERS ON MACHINING CAPACITY
AND SURFACE ROUGHNESS OF SINTERED SILICON CARBIDE

The paper presents the study of influence of power, pulse width and frequency of laser ablation process on the machining efficiency and surface roughness of sintered silicon carbide surface. The machining efficiency was referred to one machining cycle and the arithmetic mean of the ordinates R_a and the highest roughness profile R_z were used to evaluate the roughness. Using Hartley's plan, the mathematical approximation of the model was investigated. It has been found that the maximum influence on considered parameters has the width of the laser pulse.

Keywords: *laser ablation, laser micromachining, silicon carbide*