

Dobór parametrów laserowej mikroobróbki powierzchniowej elementów panewek brązowych

Streszczenie. W opracowaniu przedstawiona zostanie doświadczalna metoda doboru parametrów obróbki laserowej zapewniającej ablacyjne usuwanie materiału. W eksperymencie zastosowany będzie laser generujący wiązkę promieniowania ultrafioletowego w impulsach pikosekundowych z częstotliwością do 400 kHz (laser TruMicro 5325c). Istotą proponowanej metody jest ocena jakości "kraterów" powstałych w wyniku oddziaływania impulsów laserowych na metal.

Abstract. The paper will be presented experimental parameter selection method providing ablative laser treatment removal of material. In the experiment will be used laser for generating a laser beam of ultraviolet light in picosecond pulses at a frequency of 400 kHz (laser TruMicro 5325c). The essence of the proposed method is to assess the quality of "craters" caused by the action of laser pulses on metal. **Selection of parameters of laser micromachining on the bronze acetabulum surface element**

Słowa kluczowe: ablacja laserowa, mikroobróbka, mikrodrążenie, panewki brązowe.

Keywords: laser ablation, micromachining, microdrilling, bronze acetabulum.

Wstęp

Potencjał zawarty w użytych materiałach szybko się wyczerpuje i dlatego konieczne są działania polegające na wykorzystaniu najnowocześniejszych technologii, w tym technologii inżynierii powierzchni dających oczekiwane korzystne efekty ekonomiczne i eksploatacyjne.

Z jednej strony oferowane są działania umożliwiające nadawanie częściom maszyn cech właściwych pewnym szczególnym materiałom. Dzieje się to drogą nakładania wszelkiego rodzaju powłok dzięki którym tanie materiały mogą posiadać pewne szczególne cechy powierzchniowe. Ma to znaczenie wówczas, gdy rdzeń materiału ma wystarczającą wytrzymałość a istotna jest poprawa właściwości na powierzchni elementu np. twardości, odporności na ścieranie, odporności na zacieranie, itp.

Z drugiej strony użyteczność eksploatacyjną części maszyn można poprawić poprzez odpowiednią obróbkę powierzchniową, której celem jest wydobycie i "uzbrojenie" powierzchni materiału w te właściwości, które są istotne w danym zastosowaniu [2, 3, 4, 5, 6]. Możliwości wykorzystania tego niewykorzystanego dotychczas potencjału pojawiają się wraz z rozwojem nowoczesnych technologii które mogą oddziaływać na materiał skoncentrowanym strumieniem energii.

Jedną z metod osiągnięcia wymienionych wyżej celów jest mikroobróbka z wykorzystaniem lasera emitującego promieniowanie w zakresie ultrafioletu o długości fali 343 nm w ultrakrótkich impulsach o czasie trwania kilku pikosekund. Niektóre z metali czy stopów metali wykazują właściwości przeciwcierne - polegają one na znacznie większej wytrzymałości cienkiej warstwy metalu do przenoszenia obciążeń normalnych niż stycznych. Ta łatwość pokonywania naprężeń stycznych w cienkich warstwach materiału sprzyja wzajemnemu przemieszczaniu się ciał i zapewnia wzajemny poślizg. Przyjmuje się, że współczynnik tarcia takich materiałów zawiera się w granicach 0,001 – 0,05 przy tarcu ze smarowaniem oraz 0,004 – 0,5 bez smarowania. Przeciwcierne materiały mogą występować jako elementy objętościowe lub jako cienkie powłoki. Przy zastosowaniu jako materiałów przeciwciernych stopów na osnowie miedzi często występuje nadmierne zużycie w okresie docierania jak i zwiększone niebezpieczeństwo powstania zjawiska zatarcia. Stąd dla uniknięcia tych niekorzystnych zjawisk zachodzi konieczność kształtowania warstw powierzchniowych ułatwiających docieranie. Powstawanie zatarcia w procesie docierania poprzedzone jest serią

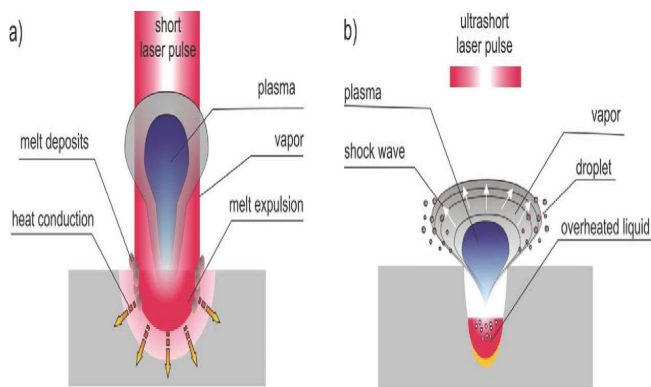
pojedynczych aktów kontaktu wierzchołków mikronierówności, którym towarzyszą sczepienia adhezyjne oraz narosty, wyrwy i inne. W liczbie tych innych czynników na krytyczną liczbę pojedynczych aktów sczepień wpływa stopień umocnienia powierzchni i jej skłonność do odkształceń plastycznych a zwłaszcza głębokość rozprzestrzeniania się odkształceń plastycznych. Jeśli plastyczna deformacja zachodzi w cienkich łatwo deformujących się warstwach powierzchniowych to współpracujące powierzchnie nie będą się zcierały. Przy stosowaniu jako materiału panewek stopów miedzi zachodzi z racji stosunkowo dużej twardości tych stopów niebezpieczeństwo nadmiernego zużycia panewki i zatarcia w trakcie docierania. W takim przypadku przeciwdziałanie tym niekorzystnym zjawiskom jest niezbędne. Rozwiązanie problemu może być dwójakiego rodzaju, w pierwszym przypadku nakłada się cienkie warstwy z materiałów przeciwciernych ułatwiających docieranie np. nakładanie stopów SnSb czy In metodą elektroiskrową, innym rozwiązaniem jest utworzenie specjalnej struktury powierzchniowej (tekstury) zapewniającej dobre smarowanie oraz wysoką nośność pary ślizgowej. Teksturowanie jako jeden z rodzajów mikroobróbki powierzchniowej najefektywniej wykonuje się stosując technologię laserową.

W przedstawionym artykule zawarto zagadnienia dotyczące technologii teksturowania a w szczególności problem doboru parametrów procesu dla materiału z którego wykonane są panewki łożysk ślizgowych.

Dobór parametrów mikroobróbki laserowej

Aspekt mikroobróbki laserowej należy rozważać w dwóch płaszczyznach mianowicie - wydajności obróbki i jakości obróbki. Jakość obróbki można rozpatrywać pod kątem dominującego procesu usuwania materiału jak i dokładności odwzorowania zaplanowanej geometrii obróbki. Jeszcze innym aspektem mikroobróbki laserowej jest rodzaj obrabianego materiału oraz właściwości stosowanego lasera, takie jak długość fali promieniowania, czas trwania impulsu, częstotliwość impulsów, energia impulsu, fluencja. Przedmiotem naszego zainteresowania jest mikroobróbka z wykorzystaniem lasera impulsowego pikosekundowego emitującego promieniowanie w zakresie ultrafioletu o długości fali 343 nm w odniesieniu do materiałów konstrukcyjnych, takich jak: węgiel krzemowy, stal, brąz. Uwzględniając jakość obróbki obszar zainteresowania ograniczono do takich warunków usuwania materiału, w których dominującym procesem będzie ablacja.

Teoretyczne podejście do zagadnienia doboru parametrów jest przedmiotem wielu opracowań [1],[5]. Można zauważyć, że w zależności od czasu trwania impulsu rozpatruje się dwa podstawowe modele ablacji. Dla impulsów mikro i nanosekundowych (Rys.1a) uznaje się, że w ablacji decydującą rolę odgrywają procesy przewodzenia ciepła, topienia, odparowania i kształtowania się plazmy. Energia impulsu jest pochłaniana przez materiał w wyniku przewodzenia. W zależności od powstałego rozkładu temperatury stopiony materiał odparowuje lub przechodzi w stan plazmy. Ablacja jest tu osiągnięta zarówno przez topienie jak i wyrzucanie stopionego materiału o czym decyduje czas trwania impulsu.



Rys.1 Model oddziaływania impulsu laserowego z podłożem a) model klasyczny impulsów mikro i nanosekundowych, b) impulsy ultra krótkie piko i femtosekundowe [1]

Masę materiału usuniętego przez ablację opisuje zależność:

$$(1) \quad m = \frac{N \cdot E_{pulse}}{c_p \cdot (T_V - T_0) + \Delta H_m + \Delta H_v}$$

gdzie ; m -masa materiału usuniętego przez ablację, N - liczba impulsów lasera, E_p - energia impulsu laserowego, c_p - pojemność cieplna, T_V - temperatura parowania, T_0 - temperatura otoczenia, ΔH_m - entalpia topnienia, ΔH_v - entalpia parowania.

Dla impulsów ultrakrótkich (Rys.1b) wcześniej opisane modele oddziaływania promieniowania z materią tracą swoją ważność. Ze względu na ekstremalną intensywność oddziaływania impulsów ultrakrótkich w absorpcji do znaczenia dochodzą nieliniowe zjawiska dotyczące wielu fotonów. Przy tak krótkich impulsach energia nie może być przekazana z gazem elektronowym do sieci jonowej w sposób natychmiastowy. Tak zachodzące procesy prowadzą do powstawania ogromnych ciśnień, koncentracji temperatury, zmian gęstości, jonizacji i powstawania plazmy. Ze względu na krótki czas materiał nie może parować w sposób ciągły. Ciekły materiał doprowadzany jest do stanu przegrzania cieczy. Zjawiska te w połączeniu z wysokim ciśnieniem tworzą szybko rozwijający się obłok kropelek cieczy i pary, co w literaturze określane jest jako eksplozja fazy.

Masę materiału usuniętą przez ablację w tym przypadku można obliczyć według wzoru:

$$(2) \quad m = N \cdot \rho \cdot A \cdot \alpha^{-1} \cdot \ln\left(\frac{F\alpha}{F_{th}}\right)$$

gdzie: N - liczba impulsów laserowych, ρ - gęstość materiału, A - powierzchnia plamki, α - głębokość penetracji promieniowania, F_α - fluencja lasera, F_{th} - fluencja progowa dla materiału.

Wymienione wyżej czynniki wskazują, że dobór parametrów procesu mikroobróbki jest zadaniem trudnym i wymagającym indywidualnego podejścia. Schemat działania w tym zakresie obejmuje eksperyment na próbce materiału przeznaczonego do obróbki, który polega na określeniu fluencji progowej a w dalszej kolejności na wyborze parametrów obróbki.

Badania eksperymentalne

Ekspertyment prowadzono wykorzystując stanowisko badawcze którego wyposażenie stanowiły:

- **pompowany diodowo impulsowy laser dyskowy** z generacją trzeciej harmonicznej. Model TruMicro 5325c o następującej charakterystyce: długość fali – 343 nm, moc średnia – 5 W, minimalny czas trwania impulsu - 6,2 ps, częstotliwość impulsu do 400 kHz, maksymalna energia impulsu - 12,6 μ J;

- **skaner (XY)** dla promieniowania ultrafioletowego 343 nm model **intelliSCAN 14**: apertura - 14 mm, obiektyw F-Theta o ogniskowej $f = 160$ mm, długość Rayleigha - 0,76 mm, średnica plamki - 18,2 μ m, maksymalna prędkość znakowania - 1,5 m/s;

- **stół współrzędnościowy XYZ U** firmy Aerotech : zakres ruchu XY: 200 mm na 200 mm, Z 275 mm, U ruch ciągły, nośność XY 70 kg, Z, U 10 kg, powtarzalność pozycjonowania dla osi XYZ : +/- 0.0001 mm i +/- 0.001 stopnia dla osi U , rozdzielczość pomiaru przemieszczenia - 0,5 mikrometra dla XY i 1 mikrometr dla Z.

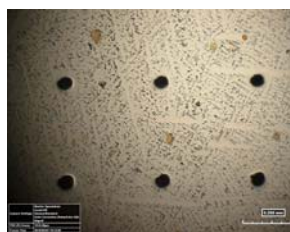
W tabeli 1 przedstawiono podstawowe dane materiału podlegającego obróbce.

Tabela 1. Wykaz podstawowych właściwości brązu B101

Lp.	Właściwość	Brąz B101
1	Gęstość [g/cm ³]	8,96
2	Temperatura topnienia [°C]	960
3	Temperatura wrzenia [°C]	2560
4	Ciepło właściwe [J/g K]	0,385
5	Entalpia topnienia [kJ/kg]	205
6	Entalpia parowania [kJ/kg]	5100

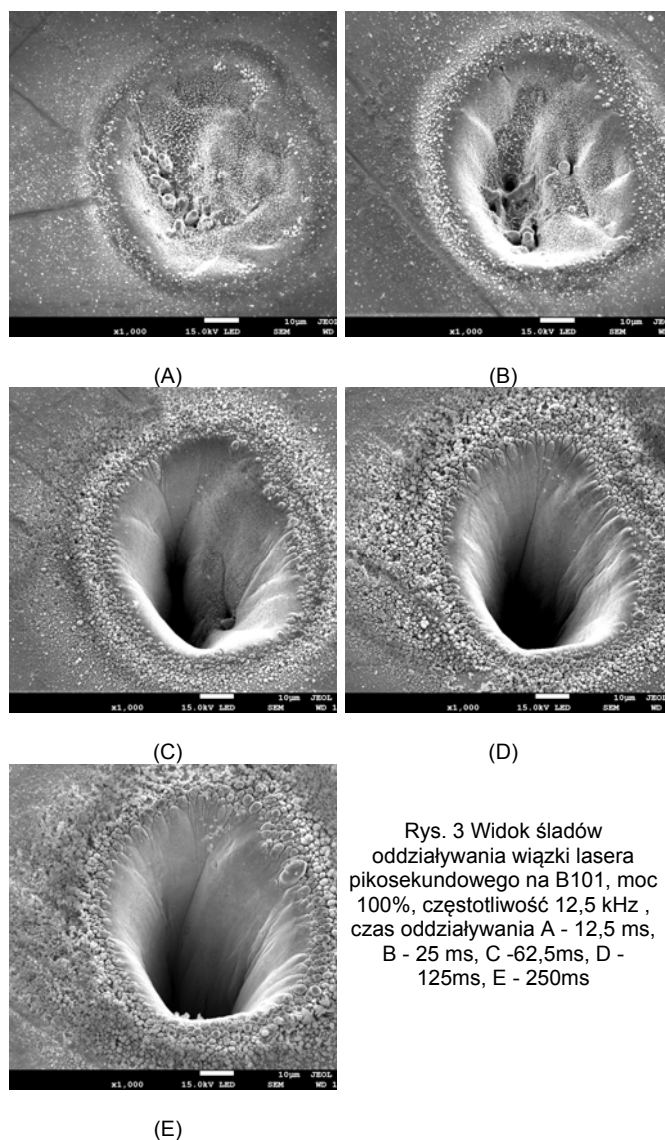
Ekspertyment polegał na ocenie oddziaływania impulsów laserowych na badany materiał przy zmianie częstotliwości impulsów w zakresie od 6,25 kHz do 400 kHz, czasu ich trwania w zakresie od 12,5 ms do 250 ms oraz mocy lasera 100% i 50%. Ocena polegała na obserwacjach kształtu i postaci powstałego śladu oddziaływania wiązki lasera na materiał i identyfikowaniu takich procesów jak topnienie materiału, ubytek bez śladów topnienia, wybuch materiału. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy zestaw widoków efektów obróbki przy zmieniających się parametrach. Fotografie wykonano na mikroskopie skaningowym JSM 5400 JEOL.

Na podstawie tych obserwacji zostały wybrane graniczne parametry obróbki przy których następuje ablacja.



Rys. 2 Widok powierzchni próbki brązowej z teksturą (pow.200x)

Rysunek 2 przedstawia przykładowy wycinek tekstury na brązie B101 w powiększeniu 200x. Fotografię wykonano na mikroskopie Hirox KH-8700.



Rys. 3 Widok śladów oddziaływania wiązki lasera pikosekundowego na B101, moc 100%, częstotliwość 12,5 kHz, czas oddziaływania A - 12,5 ms, B - 25 ms, C - 62,5ms, D - 125ms, E - 250ms

Analiza uzyskanych wyników

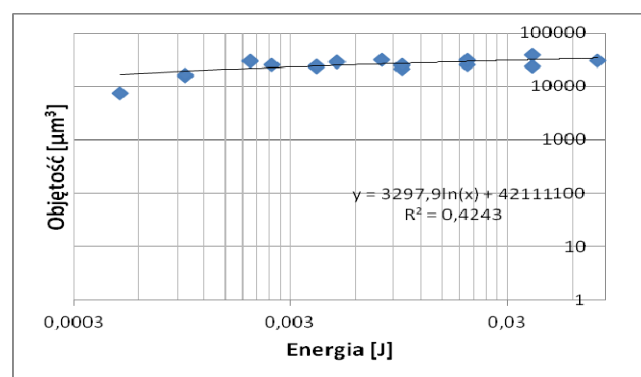
Przy częstotliwości 6,25 kHz w pojedynczym akcie ekspozycji laser oddziaływał na materiał impulsami o ilości od 78 do 1562. Przy małej liczbie impulsów widoczne są tu słabe skutki działania wiązki laserowej. Są one widoczne w centralnej części śladu i mają postać opisaną wcześniej jako eksplozja fazy. Wraz ze zwiększaniem ilości impulsów od 390 do 1562 z częstotliwością 6,25 kHz (62,5 ms – 390 impulsów; 125 ms – 781 impulsów; 250 ms – 1562 impulsy) coraz bardziej widoczne jest uformowane wgłębienie którego średnica oraz głębokość rosną wraz z ilością impulsów. Na obrzeżach wgłębień pojawiają się produkty wybuchu w postaci drobnych cząsteczek. Podobne obserwacje można poczynić z analizy rysunków przy częstotliwości 12,5 kHz. Tu wraz ze zwiększaniem liczby impulsów od 156 do 3125 widoczna jest ekspansja wybuchu od powierzchni w centrum śladu do wnętrza powstającego wgłębienia. (62,5 ms – 781 impulsów; 125 ms – 1562 impulsy; 250 ms – 3125 impulsów).

Dalsze zwiększanie ilości impulsów powoduje zbliżony w swoim wyglądzie obraz skutków działania impulsów

laserowych. Już od ilości impulsów 625 obserwuje się wyraźnie ukształtowane wgłębienie, które przy większej liczbie impulsów przyjmuje formę regularnego lejka, która to forma utrzymuje się do oddziaływań zawierających nawet 100 000 impulsów. Zapewne wraz ze wzrostem ilości impulsów rośnie również głębokość lejka, ale takich pomiarów nie udało się wykonać. Jednocześnie widoczne są wyraźnie zmiany na ściankach opisywanego lejka. Wraz ze wzrostem ilości impulsów ściany lejka stają się pofałdowane. Świadczy to o rosnącym udziale zjawisk (biorących udział w ablacji) o charakterze termicznym. Fałdy tworzą się w wyniku przetopienia ścian lejka co następuje w powstałym kanale jako wynik odbić i rozpraszania impulsów laserowych. Wgłębienia mają kształt zwężającego się lejka, gdyż coraz większa ilość produktów eksplozji fazy nie wydostaje się na zewnątrz i często zostaje "trafiona" kolejnym impulsem lasera. Dla oddziaływań o stałej częstotliwości wraz ze zwiększaniem ilości impulsów daje się zaobserwować zwiększoną ilość drobnych cząsteczek (produktów wybuchu) na obrzeżach wgłębienia które ulegają nadtopieniu tworząc swego rodzaju wypływkę (400 kHz, 250 ms – 100 000 impulsów).

Obniżenie mocy o 50% a tym samym i energii pojedynczego impulsu wpływa na widoczne osłabienie efektów obróbki. Mimo to wyraźnie ukształtowane wgłębienie pojawia się podobnie jak przy 100% mocy, dopiero przy oddziaływaniu z 781 impulsami. Widoczne tu wgłębienia są pod względem regularności zdecydowanie gorsze niż te, które powstały przy 100% mocy. Występują tu nierównomierne pofałdowania ścianek lejka a samo wgłębienie ma nieregularny kształt i rozmiar mniejszy niż przy 100% mocy. Dopiero przy 100 000 impulsów jakość powstałego wgłębienia jest porównywalna z tymi powstałymi przy 100% mocy, przy czym mają one mniejszą o około 20% średnicę (400 kHz, 250 ms – 100 000 impulsów).

Na podstawie opisaney analizy obrazów śladów obróbki brązu B101 dla osiągnięcia najlepszej jakości i wydajności rekomenduje się prowadzenie obróbki przy częstotliwości 50 kHz stosując od 625 do 12 500 impulsów.



Rys. 4 Zależność objętości usuniętego przez ablacje materiału od energii impulsu

W dalszym etapie postępowania wykonano pomiary objętości powstałych wgłębień zgodnie z planem eksperymentu. Zastosowano do tego mikroskop HIROX KH-8700 i jego standardowe oprogramowanie. Należy tu zaznaczyć, że pomiary objętości były możliwe tylko dla niezbyt głębokich wgłębień, stąd też dla 100% mocy lasera ze względu na znaczne głębokości wgłębień wyniki nie stanowiły dostatecznie wiarygodnego materiału do dokładnej obróbki matematycznej. Uzyskane wyniki pomiarów objętości

(50% mocy lasera) poddano obróbce matematycznej w celu uzyskania zależności objętości usuniętego przez ablację materiału od energii impulsu (Rys.4). Najlepsze dopasowanie uzyskanych wyników eksperymentu zapewniła zależność logarytmiczna. Tym samym można uznać, że przedstawiony we wstępie model opisujący logarytmiczną zależność masy usuniętego materiału w zależności od fluencji przy oddziaływaniu ultrakrótkimi impulsami potwierdza się w praktyce. Oznacza to, że we wszystkich przypadkach, w których dokonano pomiarów objętości mamy do czynienia z "zimną ablacją" a tym samym obróbka przy tych parametrach nie będzie wywoływała niekorzystnych efektów termicznych (utwardzenie w strefie wpływu ciepła oraz zmiany strukturalne). Jeżeli te efekty wystąpią to ich zasięg będzie minimalny.

Podsumowanie

W konsekwencji przeprowadzonych badań eksperymentalnych należy stwierdzić, że dobór odpowiednich parametrów obróbki należy opierać na dwóch kryteriach: jakościowym – pozwalającym przeprowadzić obróbkę bez efektów cieplnych oraz kryterium wydajnościowym - zapewniającym akceptowalną wydajność procesu obróbki.

Praca została współfinansowana z projektu badawczego APVV SK-PL_0034-12: Badania tribologiczne powłok nanoszoną obróbką elektroiskrową.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Bogdan Antoszewski, Politechnika Świętokrzyska, Centrum Laserowych Technologii Metali, Katedra Inżynierii Eksploatacji, ul. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, e-mail: ktrba@tu.kielce.pl; dr hab. inż. Norbert Radek, Politechnika Świętokrzyska, Centrum Laserowych Technologii Metali, Katedra Inżynierii Eksploatacji, ul. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, e-mail: norrad@tu.kielce.pl; mgr inż. Szymon Tofil, Politechnika Świętokrzyska, Centrum Laserowych Technologii Metali, Katedra Inżynierii Eksploatacji, ul. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, e-mail: norrad@tu.kielce.pl; mgr inż. Szymon Tofil, Politechnika Świętokrzyska, Centrum Laserowych Technologii Metali, Katedra Inżynierii Eksploatacji, ul. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, e-mail: tofil@tu.kielce.pl; doc. Ing. Jozef Bronček, PhD., Wydział Mechaniczny, Departament elementów maszyn i konstrukcji, Uniwersytet w Żylinie, Strojnicka fakulta, Univerzitna 8215/1, 010 26 Zilina, e-mail: jozef.broncek@fstroj.utc.sk

LITERATURA

1. Chichkov BN., Momma C., Nolte S., von Alvensleben F., Tunnermann A.: *Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solid*, *Applied Physics A: Material Science & Processing* 63:109, (1996)
2. Erdemir A.: *Review of engineered tribological interfaces for improved boundary lubrication – Tribology International* 38 (2005) 249-256
3. Volchok A.: Halperin G., Etsion I.: *The effect of surface regular microtopography on fretting fatigue life – Wear* 235 (2002) 509-515
4. Wakuda M., Yamauchi Y., Kanazaki S., Yasuda Y.: *Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact – Wear* 254 (2003) 356-363
5. Antoszewski B.: *Mechanical Seals With Sliding Surface Texture – Model Fluid Flow and Some Aspects of the Laser Forming of the Texture*, *Procedia Engineering*, 2012, 39, 51-62.
6. Zowczak W.: *On the modelling of laser subtractive manufacturing*, *Proceedings of Kielce University of Technology, Electricity* 40, pp. 163-172, (2002)