

Norbert RADEK<sup>1</sup>  
Bogdan ANTOSZEWSKI<sup>1</sup>

### **MIKROTEKSTUROWANIE POWIERZCHNI ŚLIZGOWYCH PAR TARCIA TECHNOLOGIĄ LASEROWĄ I ELEKTROEROZYJNĄ**

*W pracy przedstawiono aspekty technologiczne wytwarzania tekstury powierzchniowej metodami elektroerozyjną i laserową. Wymienione tekstury będą miały zastosowanie na powierzchniach roboczych par ślizgowych węzłów tarcia takich jak łożyska ślizgowe wzdłużne i uszczelnienia czołowe pomp. W przedstawionych badaniach omawia się związki pomiędzy parametrami procesu a geometrią pojedynczego elementu tekstury.*

### **EDM AND LASER MICROTTEXTURING OF SLIDING SURFACES OF FRICTION PAIRS**

*The technological aspects of production of superficial texture in report were introducing the method the EDM and laser. Exchanged the texture will be used on surfaces on the sliding rings of bearings and mechanical seals of pumps. The relationships introduced in the investigations presents relations among parameters of process and the geometry of individual unit of texture.*

#### **1. WSTĘP**

Stan powierzchni elementów pary ślizgowej ma istotny wpływ na przebieg procesów tarcia i zużywania. W wielu przypadkach stan ten decyduje o wartości strat a pośrednio wpływa na globalne wskaźniki pracy maszyny takie jak sprawność ogólna czy też jak np. w odniesieniu do silników spalinowych emisja toksycznych składników spalin. Z tego punktu widzenia kształtowanie topografii powierzchni nabiera ogromnego znaczenia. Współcześnie stosowane technologie umożliwiające lokalne oddziaływanie stwarzają coraz szersze możliwości precyzyjnego decydowania o kształcie i rozmiarach obiektów tworzących mikro i makro-geometrię powierzchni. Technologia teksturowania polegająca na wytwarzaniu różnymi technikami powierzchni niejednorodnych staje się obecnie często stosowaną metodą na poprawę warunków smarowania węzłów tarcia [1÷3]. Należy tu zaznaczyć, że obecnie stosuje się teksturowanie kształtujące geometrię natomiast teksturowanie kształtujące własności fizyczne powierzchni jest dostrzegane jako niewykorzystana możliwość [4]. W niektórych zastosowaniach osiągnięto tak znaczną skuteczność działania tekstury, że można mówić o przygotowywaniu do standaryzacji [5].

<sup>1</sup>Centrum Laserowych Technologii Metali, Politechnika Świętokrzyska, Al. 1000-lecia P. P. 7,  
25-314 Kielce, POLSKA; Telefon: 041 34-24-518, Fax: 041 34-24-504, E-mail: norrad@tu.kielce.pl

Do najczęściej stosowanych do tekstuowania technologii należy zaliczyć technologie wiązkowe laserowe, elektronowe i jonowe a także mikro-elektroerozyjne i litograficzne.

## 2. METODYKA TEKSTUOWANIA MIKRO-OBROBKA ELEKTROEROZYJNA

Jedną z metod tekstuowania powierzchni jest drażenie elektroerozyjne [6÷8]. Obróbka ta kwalifikowana jest do obróbek ubytkowych i jest stosowana głównie w przypadku materiałów trudnoskrawalnych oraz elementów o skomplikowanych kształtach. Mimo wielu zalet obróbka elektroerozyjna (EDM) posiada także wady. Jedną z głównych wad obróbki elektroerozyjnej jest stan warstwy wierzchniej tj. warstwa zmienia właściwości pod wpływem ciepła powstającego w wyniku wyładowania elektrycznego, naprężeń rozciągających, mikropełnięć [9].

W przeprowadzonych badaniach zastosowano elektrody robocze (ER) wykonane z TiC o średnicy  $\phi = 153,5 \mu\text{m}$  i  $\phi = 93,3 \mu\text{m}$  oraz dielektryk w postaci nafty kosmetycznej. Próbkę w kształcie prostopadłościanu były wykonane ze stali NC6. Mikrotekturowanie przeprowadzono na obrabiarce micro-EDM Sarix SX-100 HPM wykorzystując generator SX-MFPS, który umożliwia wykonywanie mikro-otworów z wysoką precyzją i jakością powierzchni obrabianej.

Na podstawie badań wstępnych przyjęto następujące parametry  $\mu$ -EDM: natężenie prądu  $I = 80 \text{ mA}$ , napięcie  $U = 95 \text{ V}$ , częstotliwość powtarzania  $f = 120 \text{ kHz}$ . Pozostałe parametry zgodne z zestawem parametrów technologicznych SX T204 (dostarczone przez producenta obrabiarki).

Wgłębenia zostały wykonane przy różnych energiach impulsu dla dwóch przypadków (różne średnice elektrody roboczej):

1. Mikro-wgłębenia o wymiarach nominalnych - średnica otworu  $D_o = 150 \mu\text{m}$  i głębokość otworu  $h_o = 7 \mu\text{m}$ , wykonane przy użyciu elektrody o średnicy  $\phi = 153,5 \mu\text{m}$ .
2. Mikro-wgłębenia o wymiarach nominalnych - średnica otworu  $D_o = 90 \mu\text{m}$  i głębokość otworu  $h_o = 9 \mu\text{m}$ , wykonane przy użyciu elektrody o średnicy  $\phi = 93,3 \mu\text{m}$ .

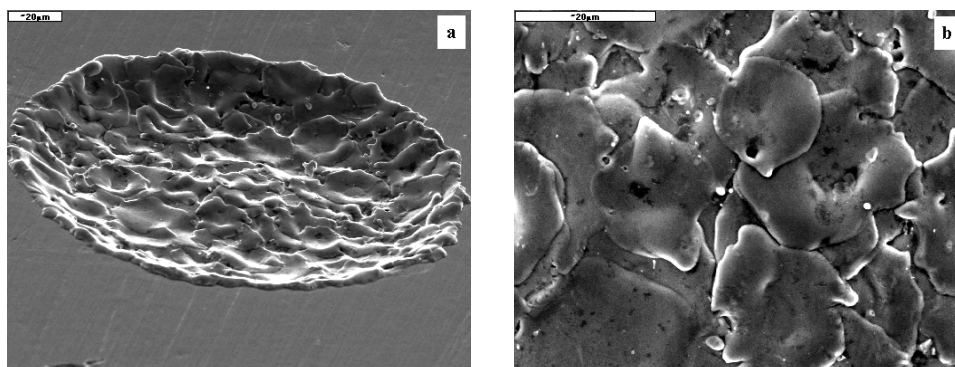
### 2.1. WYNIKI BADAŃ

Do badań efektów erozji po  $\mu$ -EDM wykorzystano elektronowy mikroskop skaningowy Joel JSM-5400. Przykładowe fotografie przedstawiono na rysunku 1.

Widoczne na fotografiach efekty mikro erozji (rys. 1a) są odwzorowaniem geometrii elektrody, przy czym dno wgłębienia ma kształt zbliżony do cząstki kuli. Rysunek 1b przedstawia widok elementów struktury powierzchni po obróbce  $\mu$ -EDM. Są tu widoczne pojedyncze ziarna tworzące strukturę materiału, które w procesie erozji segregują się (nie ulegają wzajemnemu stapianiu i agregacji) co wskazuje, że każde z nich bierze udział w elektroerozji oddzielnie. Tworzy się przy tym specyficzna mikrochropowatość powierzchni.

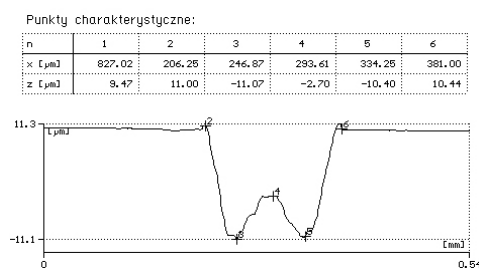
Powierzchnie takie po obróbkach poprzez docieranie i dogładzanie tworzą twarde płaskie obszary przenoszące obciążenia normalne i obszary wgłębien, w których podczas smarowania cieczonego mogą być generowane siły hydrodynamiczne. Powierzchnie o takim ukształtowaniu mogą znaleźć zastosowanie np. w ślizgowych węzłach tarcia czy też w procesach wymagających rozwiniętych powierzchni.

Pomiary mikrogeometrii przeprowadzono za pomocą przyrządu TALYSURF 4 przy wykorzystaniu programu SUFORM. W/w przyrząd znajduje się w Laboratorium Pomiarów Wielkości Geometrycznych Politechniki Świętokrzyskiej. Przykładowe protokoły pomiarów parametrów mikrogeometrii badanych próbek przedstawiono na rysunkach 2÷3.

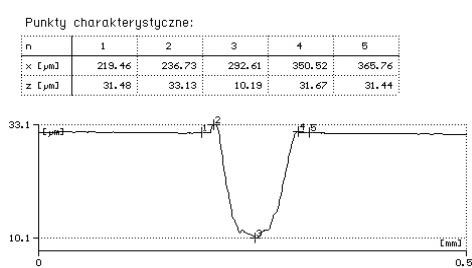


Rys. 1. Mikro-drażenie w stali NC6: a) widok pojedynczego wgłębienia (pow. 750x), b) widok efektu pojedynczego wylądowania (pow. 2000x)

Z obserwacji profili wynika, że mikro-drażenie elektroerozyjne przy zastosowaniu elektrody o średnicy  $\phi = 153,5 \mu\text{m}$  nie nastąpiło całkowite usunięcie produktów obróbki z drażonych wgłębień, w efekcie czego powstały niewielkie wzniesienia (wzgórki), których struktura składa się z przetopionego, a następnie skryształizowanego materiału (biała warstwa). Prawdopodobną przyczyną wystąpienia tego efektu mogły być zbyt duże czasy trwania impulsów elektrycznych. Natomiast inny przebieg ma profil powierzchni po mikro-drażeniu elektroerozyjnym przy zastosowaniu elektrody o średnicy  $\phi = 90 \mu\text{m}$  na którym widzimy brak wzniesień w dnie wydrążonego wgłębienia. Może to oznaczać, że do danej średnicy elektrody dobrano optymalne parametry mikro-obróbki elektroerozyjnej.



Rys. 2. Profil powierzchni po mikro-drażeniu elektroerozyjnym (średnica elektrody  $\phi = 153,5 \mu\text{m}$ )



Rys. 3. Profil powierzchni po mikro-drażeniu elektroerozyjnym (średnica elektrody  $\phi = 93,5 \mu\text{m}$ )

### 3. METODYKA TEKSTUROWANIA LASEROWEGO

Obróbka laserowa kwalifikowana jest do obróbek ubytkowych i jest zazwyczaj realizowana przy gęstościach mocy  $10^6$ ÷ $10^9$  W/cm<sup>2</sup>. Obecnie w skali światowej w przetwórstwie materiałów stanowi około 2% spośród wszystkich obróbek laserowych. Polega ona na lokalnym oddziaływaniu impulsu laserowego, który powoduje odparowanie usuwanego materiału. Podczas tej obróbki zalecany jest nadmuch gazem (powietrzem lub gazem obojętnym) w celu usunięcia z drążonej szczeliny stopionego materiału, który mógł nie ulec odparowaniu. Największy wpływ na głębokość wgłębień ma gęstość mocy oraz czas trwania impulsu wiązki laserowej [1].

Przedmiotem badań były pierścienie z SiC wykonane z atestowanego materiału o wymiarach: średnica zewnętrzna -  $d_o = 35,3$  mm, średnica wewnętrzna -  $d_i = 25,1$  mm, wysokość -  $h = 7$  mm. Teksturowanie powierzchni pierścieni zostało wykonane laserem Nd:YAG (impulsowy tryb pracy), model ESI 5200. Laser pracuje z trzecią harmoniczną (długość fali  $\lambda = 355$  nm). Na podstawie badań doświadczalnych przyjęto następujące parametry erozji laserowej: zakres średnic plamki laserowej  $d = 0,78$ ÷ $150$   $\mu$ m; zakres mocy lasera  $P = 0,37$ ÷ $0,4$  W; zakres prędkości przemieszczania wiązki  $V = 15,7$ ÷ $23,56$  mm/s; odległość od ogniska  $\Delta f = 0$  mm; częstotliwość powtarzania  $f = 6400$  Hz.

Wgłębienia zostały wykonane w dwóch etapach (dwa kroki). W pierwszym etapie laser pracował po torze spirali drążąc wgłębienie o odpowiedniej średnicy. W drugim kroku za pomocą pojedynczych impulsów laserowych (uderzeń) z zadaną częstotliwością oraz zadaną ich ilością następowało czyszczenia dna otworu z pozostałych produktów obróbki.

#### 3.1. WYNIKI BADAŃ

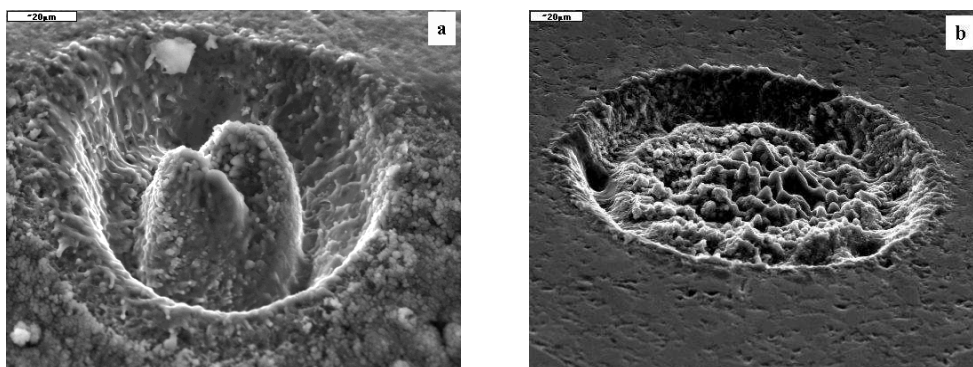
Do badań efektów erozji laserowej wykorzystano elektronowy mikroskop skaningowy Joel JSM-5400 oraz profilografometr FORM TALYSURF-120L. Przykładowe fotografie przedstawiono na rysunkach 4÷6.

Widoczne na fotografiach efekty erozji laserowej (rys. 5a i 5b) układają się w regularnych odstępach tworząc zaplanowaną strukturę powierzchni. Widoczne są wzniesienia i wgłębienia, które powstają w wyniku przemian fazowych oraz zmian strukturalnych i towarzyszącym im zmianom objętości właściwej w strefach oddziaływania wiązki laserowej.

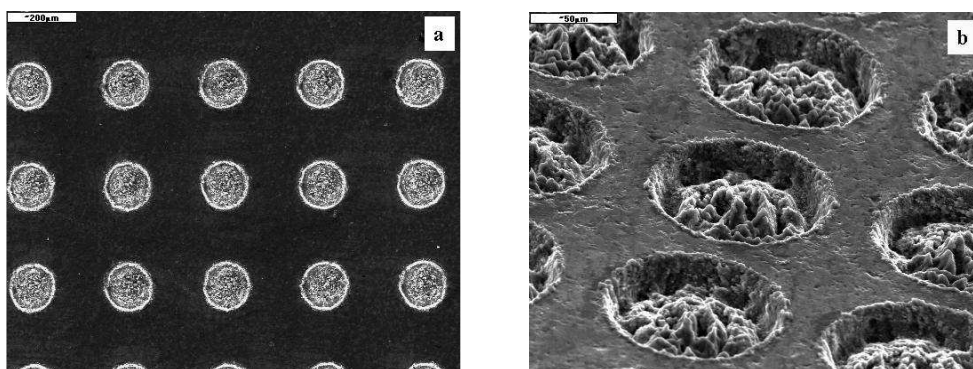
Z obserwacji mikroskopowych wynika (rys. 4a i 4b), że lokalne oddziaływanie promienia laserowego nie spowodowało całkowitego usunięcia materiału z drążonych wgłębień. Prawdopodobną przyczyną wystąpienia tego efektu była zbyt mała gęstość mocy. Pod wpływem działania wiązki laserowej w pierwszej kolejności nastąpiło odparowanie składników struktury o niższej temperaturze parowania i stąd powstały niewielkie wzniesienia i wgłębienia, które odwzorowują różnice w składzie elementów struktury materiału.

Na rysunkach 4a i 4b przedstawiono widok efektów oddziaływania impulsów wiązki laserowej na materiał SiC. Wykonany ruch wiązki po dośrodkowej spirali jak widać na rysunku 4a pozostawia środek wgłębienia z nieusuniętym materiałem. Wyraźnie jest widoczny ślad końcowego przejścia wiązki. Po oczyszczeniu dna wgłębienia za pomocą serii pojedynczych impulsów uzyskuje się rezultat jak na rysunku 4b. Dno wgłębienia w skali mikronowej jest nierówne odzwierciedla oddziaływanie pojedynczych impulsów lasera oraz różnorodność składników struktury materiału. Jednak można przyjąć, że wartość głębokości wydrążenia jest jednakowa na całej powierzchni dna. Wgłębienia

wykonywane dla osiągnięcia efektów tribologicznych charakteryzują się pewną regularnością. W przedstawionym przykładzie mamy do czynienia z symetrią dwukierunkową (rys. 5a i 5b). Przy modelowaniu tekstury można przyjąć, że tworzą ją wgłębienia o kształcie walca lub dokładniej ściętego stożka.

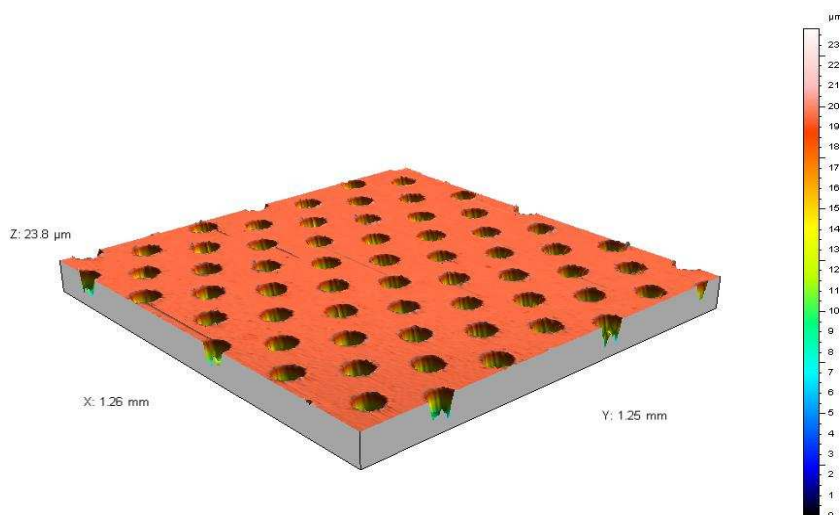


Rys. 4. Pojedyncze wgłębienia w pierścieniu z SiC wykonane technologią laserową:  
a) widok drążenia po pierwszym etapie - przemieszczanie wiązki po spirali - pow. 1000x, b) widok po czyszczeniu dna wgłębienia - pow. 750x



Rys. 5. Widok zespołu wgłębień wykonanych technologią laserową na pierścieniu z SiC  
(a-pow. 100x, b-pow. 500x)

Szczegółowe parametry geometryczne tekstury można zidentyfikować badając ją na profilografometrze FORM TALYSURF-120L firmy Taylor-Hobson Limited. Rysunek 6 przedstawia profil powierzchni w widoku 3D wraz z mapą izometryczną. Natomiast w zestawieniu niżej zawarto zbiór parametrów charakteryzujących geometrie powierzchni według normy ISO 25178.



Rys. 6. Mapa izometryczna powierzchni teksturowanej – profil powierzchni 3D

#### Parametry wysokości ISO 25178

Sq	3.71 μm	Wysokość średniokwadratowa powierzchni
Ssk	-2.92	Asymetria powierzchni
Sku	9.03	Kurtoza powierzchni
Sp	4.26 μm	Maksymalna wysokość piku powierzchni
Sv	19.5 μm	Maksymalna wysokość wgłębienia powierzchni
Sz	23.8 μm	Maksymalna wysokość powierzchni
Sa	1.45 μm	Średnia arytmetyczna wysokość powierzchni

#### Parametry funkcyjne (Ogólne)

Smr	0.0048 %	Polowy stosunek materiałowy powierzchni
Smc	4.17 μm	Odwrotny polowy stosunek materiałowy powierzchni
Sxp	12.1 μm	Skrajna wysokość szczytu

#### Parametry przestrzenne

Sal	0.0316 mm	Długość autokorelacji powierzchni
Str	0.802	Wydłużenie struktury powierzchni
Std	148°	Kierunkowość struktury powierzchni

#### Parametry hybrydowe

Sdq	0.338	Średniokwadratowy gradient powierzchni
Sdr	5.14%	Rozwinięty stosunek pola międzyfazowego powierzchni

#### Parametry funkcyjne (Sk)

Vm	2.94e-005 mm <sup>3</sup> /mm <sup>2</sup>	Objętość materiału powierzchni
Vv	0.00147 mm <sup>3</sup> /mm <sup>2</sup>	Objętość pustej przestrzeni powierzchni
Vmp	2.94e-005 mm <sup>3</sup> /mm <sup>2</sup>	Objętość piku materiału powierzchni
Vmc	8.23e-005 mm <sup>3</sup> /mm <sup>2</sup>	Objętość rdzenia materiału powierzchni
Vvc	9.77e-005 mm <sup>3</sup> /mm <sup>2</sup>	Objętość rdzenia pustej przestrzeni powierzchni

Vvv	0.00137	mm <sup>3</sup> /mm <sup>2</sup>	Objętość pustej przestrzeni wgłębienia powierzchni
<b>Parametry cech</b>			
Spd	102	1/mm <sup>2</sup>	Gęstość pików powierzchni
Spc	0.14	1/mm	Średnia arytmetyczna krzywizna piku powierzchni
S10z	209	μm	Wysokość dziesięciu punktów powierzchni
S5p	95.4	μm	Wysokość pięciu punktów powierzchni
S5v	114	μm	Wysokość pięciu wgłębień powierzchni
Sda	0.626	mm <sup>2</sup>	Pole średniej doliny
Sha	1.13	mm <sup>2</sup>	Obszar średniego wzniesienia
Sdv	1.57e-006	mm <sup>3</sup>	Objętość średniej doliny
Shv	8.31e-007	mm <sup>3</sup>	Objętość średniego wzniesienia

#### 4. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych badań wstępnych można wysunąć następujące spostrzeżenia:

- stosując mikro-drażenie elektroerozyjne można uzyskać wgłębienia, które odwzorowują kształt elektrody a powierzchnia dna wgłębienia jest zbliżona do czaszy kuli,
- stosując mikro-drażenie laserowe można uzyskać różne kształty wgłębienia przy czym standardowe procedury urządzenia laserowego zapewniają uzyskanie wgłębień których kształt można przybliżyć walcem lub ściętym stożkiem,
- obydwie rozpatrywane metody teksturowania umożliwiają wytwarzanie regularnych wgłębień rozmieszczonych według zaplanowanego wzoru – dostępna aparatura przygotowana jest do nanoszenia tekstury na małogabarytowych częściach z płaskimi powierzchniami, wykonanie tekstury na częściach cylindrycznych wymaga dodatkowego oprzyrządowania i oprogramowania,
- stosowanie metody elektroerozyjnej jest ograniczone do materiałów przewodzących prąd elektryczny natomiast metoda laserowa nie posiada takich ograniczeń,
- powierzchnie teksturowane obróbką elektroerozyjną i laserową mogą znaleźć zastosowanie w różnych dziedzinach np. w ślizgowych węzłach tarcia poprawiając warunki smarowania, w elementach obciążonych cieplnie poprawiając wymianę ciepła, w katalizatorach i reaktorach chemicznych zwiększając powierzchnię czynną.

#### 5. LITERATURA

- [1] Ryk G., Klingerman Y., Etsion I. Ł.: *Experimental investigation of laser surface texturing for reciprocating automotive components*, Tribology Transactions, 45, 2002, 4, 444-449.
- [2] Dausinger F., Hügel H., Konov V.: *Micro-machining with ultrashort laser pulses: from basic understanding to technical applications*, Proceedings of Conference ALT'02, 5-20 September 2002, Adelboden, Switzerland.
- [3] Tönshoff H. K., Ostendorf A., Körber K., Barsch N.: *Ablation and cutting of planar silicon devices using femtosecond laser pulses*, Applied Physics, 2003, A 77, 237-242.
- [4] Antoszewski B.: *Właściwości laserowo i plazmowo modyfikowanych ślizgowych węzłów tarcia na przykładzie uszczelnień czołowych*, Politechnika Świętokrzyska - Rozprawy -1999, 17, Kielce, 135.
- [5] Tobias A.: *Laser honing creates an environmental breakthrough*, Australian Manufacturing Technology, 2007, 7, 50-51.

- 
- [6] Ho S. K., Aspinwall D. K., Voice W.: *Microtexturing and surface alloying for joining applications*, Proceeding of International Symposium for Electro-Machining XV, Pittsburgh, Pennsylvania - USA, 2007, 615-620.
  - [7] Son S., Lim H., Kumar A.S., Rahman M.: *Influences of pulsed power condition on the machining properties in micro EDM*, Journal of Materials Processing Technology 190 (2007), 73-76.
  - [8] Kao C.C., Shih A. J.: *Sub-nanosecond monitoring of micro-hole electrical discharge machining pulses and modeling of discharge ringing*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006), 1996-2008.
  - [9] Miernikiewicz A.: *Doświadczalno-teoretyczne podstawy obróbki elektroerozyjnej (EDM)*, Politechnika Krakowska - Rozprawy - nr 274 - Kraków 2000.