

Topografia powierzchni a walory użytkowe elementów po obróbce elektroerozyjnej i powierzchniowej zgniotem

Machining surface topography and functional values of parts after EDM and burnishing process

Streszczenie

Celem badań była ocena skutków modyfikacji topografii powierzchni kształtowanej obróbką elektroerozyjną a następnie poddanej nagniataniu dynamicznemu odśrodkowemu przez zastosowanie głowicy do mikromłoteczkowania. Głowica ta jest alternatywnym sposobem obróbki sekwencyjnej po EDM, do wykorzystywanej we wcześniejszych badaniach głowicy do roto pennu. Badania te stanowią kontynuację pracy nad modyfikacją warstwy wierzchniej zgniotem powierzchniowym elementów obrobionych elektroerozyjnie.

Słowa kluczowe: EDM; obróbka powierzchniowa zgniotem; struktura geometryczna powierzchni SGP; właściwości eksploatacyjne

Abstract

The aim of the research was the assessment of the surface topography modifications effects shaped by electrodischarge machining and then subjected to dynamic centrifugal burnishing by applying the microhammering head. This head is an alternative method of sequential treatment after EDM, to the roto penn head used in the earlier studies. These studies are a continuation of work on the modification of the surface layer by surface cold work treatment of electrodischarge machined components.

Keywords: EDM; cold work treatment; geometrical structure of the surface; exploitation properties

Wprowadzenie

W wielu publikacjach autora [1,2] wielokrotnie poruszony był temat modyfikacji stanu warstwy wierzchniej (WW) po obróbce elektroerozyjnej przez zastosowanie sekwencji obróbek EDM i obróbki powierzchniowej zgniotem (OPZ). Obróbka ta realizowana była przez głowice do roto pennu a ocenie poddawane były czynniki mające istotny wpływ na polepszenie właściwości eksploatacyjnych tj. zmiany struktury metalograficznej powierzchni, rozkłady mikrotwardości, badania wytrzymałościowe czy naprężenia własne w WW.

Ta część badań ukierunkowana jest na analizę struktury geometrycznej powierzchni, mającej istotny wpływ na wiele właściwości funkcjonalnych takie jak wytrzymałość zmęczeniowa, odporność na zużycie i korozję, naciski kontaktowe, przepływ czy szczelność połączeń [3,4]. Dogłębna i umiejętna analiza SGP daje możliwość diagnozowania procesu obróbki oraz oddziaływań układu OUPN. Nie bez znaczenia jest dokonanie prawidłowego wyboru parametrów do oceny struktury geometrycznej powierzchni. Parametrów, dzięki którym jesteśmy w stanie dokonać oceny czy dana struktura spełnia niezbędne walory użytkowe [5,6].

Jest wiele publikacji opisujących strukturę geometryczną powierzchni po obróbce elektroerozyjnej [7,8], będącej wynikiem nakładania się śladów pojedynczych wyładowań

elektrycznych o punktowym izotropowym charakterze. Badania prowadzone w różnych ośrodkach naukowych pokazują, że kształt powstałych kraterów jest ściśle powiązany z zastosowanymi parametrami procesu i warunkami, w jakich dany proces przebiega (polaryzacja, rodzaj dielektryka, materiał elektrody). Określenie jednoznacznych czynników determinujących kształtowanie się powierzchni po procesie drążenia jest utrudnione. Ponadto struktura ta charakteryzuje się względnie wysoką chropowatością i wierzchołkami o małym promieniu zaokrąglenia co w rezultacie może wpłynąć niekorzystnie na elementy współpracujące ze sobą [2,9÷11].

Wprowadzenie obróbki powierzchniowej zgniotem po EDM miało na celu zmniejszenie wysokości nierówności występujących na powierzchni po obróbce poprzedzającej nagniatanie, nadanie im bardziej korzystnego kształtu, jak i wytworzenie zmian własności fizycznych materiału w warstwie wierzchniej przedmiotu, powodujących wzrost twardości WW i korzystny rozkład naprężeń ściskających. Zmiany te w konsekwencji mają istotnie polepszyć podstawowe właściwości eksploatacyjne obrabianych elementów.

Podobnie jak w przypadku EDM jest wiele czynników określających chropowatość powierzchni po nagniataniu,

Dr inż. Anna Podolak-Lejtas – Politechnika Warszawska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: apodolak@meil.pw.edu.pl

do których należą przede wszystkim, kinematyka procesu nagniatania, konstrukcja narzędzia czy własności materiału obrabianego.

- Wg Przybylskiego [12] do najważniejszych czynników wpływających na chropowatość powierzchni można zaliczyć:
- promień zaokrąglenia R czynnej powierzchni elementu nagniatającego;
 - kształt i rozkład nierówności powierzchni po obróbce poprzedzającej;
 - usytuowanie elementu nagniatającego w stosunku do powierzchni obrabianej.

Listę tych czynników można rozszerzyć w zależności od rodzaju i specyfiki pracy zadanej obróbki powierzchniowej zgniotem. Dla technologii nagniatania dynamicznego odśrodkowego do tej listy można dołączyć prędkość obwodową tarczy, liczbę uderzeń kulek, czy masę kulek.

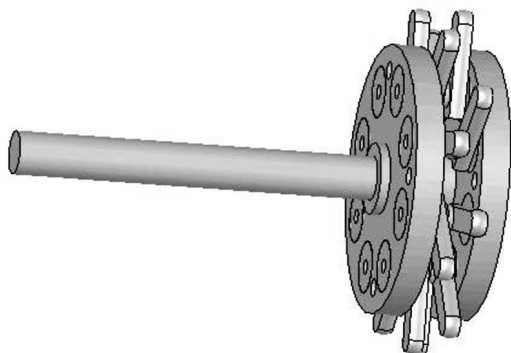
Jak już wcześniej zostało wspomniane, do modyfikacji powierzchni po drażeniu wykorzystano głowice do mikromłoteczkowania. Wstępne badania wykazały wysoką trwałość i niezawodność tych głowic, wysoką odporność części roboczej mikromłoteczek na zużycie ściernie oraz wysoką zdolność głowic do wygładzania powierzchni hartowanych elementów.

Pierwotnie głowica ta była projektowana z myślą wykorzystania jej do obróbki części obrobionych uprzednio laserowo. W wyniku procesu topnienia – podczas OL (obróbka laserowa) materiału wiązką laserową na powierzchni powstaje charakterystyczny ślad – „ścieżka” o szerokości zbliżonej do średnicy wiązki laserowej. Powoduje to, że w kierunku prostopadłym do osi ścieżki występują maksymalne wysokości chropowatości związane z maksymalną wysokością walca tj. naniesionego materiału. Uderzenia młotków powodują miejscowe odkształcenia plastyczne, będące źródłem umocnienia i wygładzenia nierówności powierzchni [13].

Głowica do mikromłoteczkowania została skonstruowana w Zakładzie Obróbek Wykańczających i Erozyjnych Politechniki Warszawskiej (rys. 1). Mechanizm pracy tej głowicy polega na cyklicznym, skoncentrowanym uderzaniu powierzchni obrabianej przez elementy w postaci mikromłoteczek zakończonych czaszami kulistymi.

Podstawowymi elementami głowicy są:

- korpus w postaci podwójnej tarczy z trzpieniem mocującym głowicę w uchwycie szlifierki;
- mikromłoteczki o promieniu części roboczej r , zamocowane obrotowo na osiach usytuowanych w odległości R od osi obrotu głowicy;
- osie mikromłoteczek wykonane z igieł łożyskowych;
- elastyczne wkładki, w których mocowane są osie mikromłoteczek;
- tarcze ograniczające przemieszczenia osiowe osi igiełek oraz chroniące głowicę przed oddziaływaniem zewnętrznym;
- elementy zderzakowe wykonane z elastycznego materiału.



Rys. 1. Widok głowicy GM-3 wyposażonej w 16 mikromłoteczek
Fig. 1. View of the microhammering head

Istotnym, opatentowanym elementem głowicy jest elastyczna wkładka, w której mocowane są osie mikromłoteczek. Dzięki niej siły od uderzeń mikromłoteczek o obrabianą powierzchnię są tłumione i nie przenoszą się na korpus głowicy i szlifierkę. Praca głowicy jest spokojna, a mikromłoteczki i osie nie ulegają uszkodzeniom.

Podczas obróbki głowica zamocowana w uchwycie szlifierki wykonuje ruch obrotowy z prędkością kilku tysięcy obrotów na minutę. Głowica jest usytuowana nad obrabianą powierzchnią na takiej wysokości, by kąt uderzenia młoteczek w obrabianą powierzchnię wynosił od kilkunastu do dwudziestu kilku stopni. Młoteczki po uderzeniu w powierzchnię odbijają się od niej wykonując ruch wahadłowy względem osi, na której są zamocowane. Zawieszenie osi w elastycznych wkładkach oraz możliwość wahadłowego ruchu młoteczek względem własnej osi po uderzeniu zapewnia spokojną pracę głowicy i wysoką trwałość jej elementów.

Podczas badań stosowano narzędzie o średnicy 30 mm z 16 mikromłoteczkami wykonanymi z hartowanej stali ŁH15 (rys.1).

Metodyka badań

Badania stanu WW realizowano na próbkach obrobionych elektroerozyjnie przy zastosowaniu typowych parametrów obróbki zalecanych przez producenta obrabiarki (tabl. I). Parametry te zostały dobrane tak, aby uzyskać zróżnicowane wysokości chropowatości, jak i grubości warstwy wierzchniej.

Dla powierzchni obrobionych przy zastosowaniu określonych parametrów EDM realizowano następnie obróbkę mikromłoteczkowaniem z dwiema prędkościami obrotowymi głowicy i przy dwóch czasach obróbki. Dobór określonych parametrów mikromłoteczkowaniem miał zapewnić różne stany powierzchni i głębokości zgniotu.

- $n = 4300$ obr/min, $v = 6,8$ m/s, $t = 2,5$ min;
- $n = 4300$ obr/min, $v = 6,8$ m/s, $t = 5$ min;
- $n = 6500$ obr/min, $v = 10,5$ m/s, $t = 2,5$ min;
- $n = 6500$ obr/min, $v = 10,5$ m/s, $t = 5$ min.

Efekty obróbki zarówno po EDM, jak i po sekwencji tych procesów (EDM+mikromłoteczkowanie) oceniano na podstawie badań struktury geometrycznej powierzchni parametrów 3D.

Badania realizowano przy pomocy:

- centrum erozyjnego ROBOFORM 30;
- głowicy do mikromłoteczkowania;
- szlifierki Bosch – Professional;
- profilometru skanującego FORM TALYSURF Series 2.

Tablica I. Zestawienia parametrów obróbki elektroerozyjnej
Table I. Comparative presentation of parameters for the EDM

Nastawa na generatorze	U [V]	I [A]	Ti [μs]
402	120	24	200
432	80	48	400
303	160	6	100

Analiza struktury geometrycznej powierzchni po sekwencji obróbek EDM i mikromłoteczkowaniu

Odwzorowanie kształtu i pomiary chropowatości powierzchni w zakresie parametrów 3D wykonano przy pomocy profilometru skanującego FORM TALYSURF Series 2. Podczas analizy topografii powierzchni uwzględniono

następujące parametry:

- parametry amplitudowe powierzchni;
- parametry krzywej nośności;
- parametry przestrzenne i hybrydowe.

Na rysunku 2 zostały przedstawione dla porównania widoki 3D dla wybranych próbek po EDM ($I = 24 \text{ A}$, $T_i = 200 \mu\text{s}$) i po sekwencji obróbek EDM i mikromłoteczkowaniem ($n = 4300 \text{ obr/min}$, $t = 2,5 \text{ min}$).

W tabelicy II przedstawiono zestawienia podstawowych parametrów amplitudowych, hybrydowych, służących do ilościowej oceny stanu analizowanej powierzchni dla wybranych konfiguracji parametrów EDM i OPZ.

Oznaczenie próbek np.: E303 – obróbka elektroerozyjna z nastawami 303 na generatorze, EDM 303_OPZ4300_25 – sekwencja obróbek EDM z nastawami 303 i OPZ ($n = 4300 \text{ obr/min}$, $t = 2,5 \text{ min}$).

Istotne informacje odnośnie kształtu i nośności powierzchni możemy otrzymać z krzywej nośności zwanej krzywą Abbotta-Firestone'a – AFC. Właściwości nośne mogą być oceniane za pomocą parametrów przestrzennych takich jak [3]:
 S_k – wysokość chropowatości rdzenia, μm ;
 S_{pk} – zredukowana wysokość wniesienia, μm ;
 S_{vk} – zredukowana głębokość wgłębienia, μm ;
 $Sr1$ – udział nośny wierzchołków, %;
 $Sr2$ – udział nośny wgłębień, %.

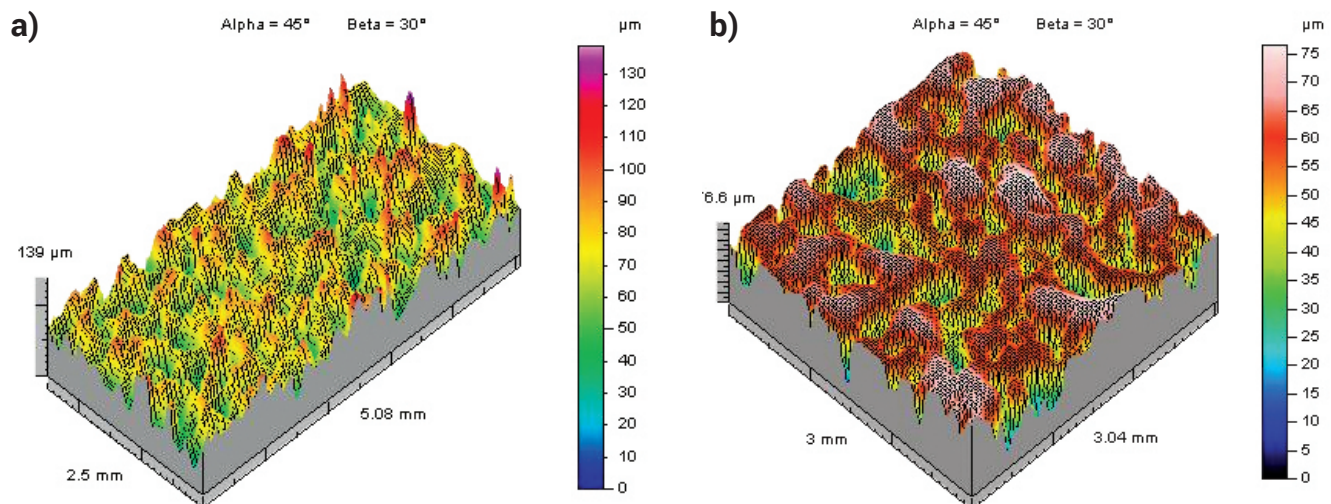
Na podstawie porównania krzywych udziału nośnego (rys. 3) można zaobserwować, iż zastosowanie obróbki powierzchniowej zgniotem może istotnie polepszyć właściwości trybologiczne, świadczyć może o tym spadek parametru S_{pk} .

W przypadku obróbki EDM wartość tego parametru wynosi od $3,52$ do $24 \mu\text{m}$ (w zależności od parametrów EDM), po zastosowaniu OPZ wartość parametru S_{pk} zmniejsza się nawet 6-krotnie, zwiększając znacznie odporność na ścieranie takich powierzchni.

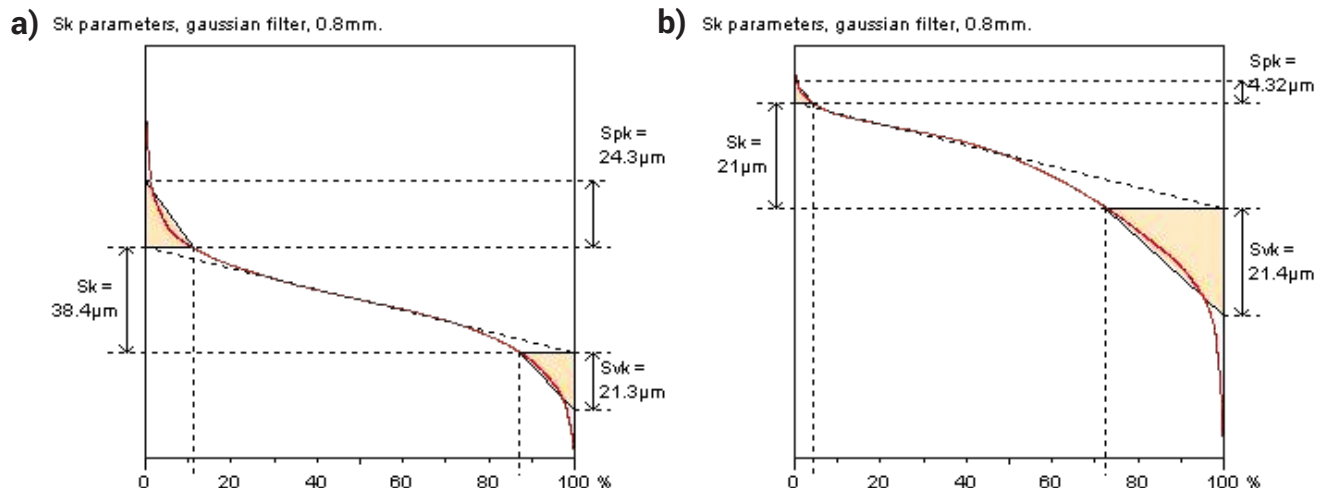
W związku z tym, że wygładzenie powierzchni po obróbce łącznej sięga w głównej mierze tylko wierzchołków nierówności, wartość parametru S_{vk} utrzymuje się na zbliżonym poziomie. Przez co powierzchnie cały czas zachowują odpowiednie warunki zapewniające smarowanie współpracujących powierzchni.

Na rysunku 4 można zaobserwować zmianę kształtu udziału materiałowego i rozkładu ADF (rozkład rzędnych profilu). Rozkład rzędnych profilu w przypadku obróbki erozyjnej zbliża się do rozkładu normalnego, świadczy o tym parametr S_{ku} , gdzie zbliżony jest do wartości 3. Nagniatanie zaś wprowadzając zmiany kształtu profilu powoduje kumulowanie się materiału ponad linią, widzimy co najmniej 2-krotny wzrost parametru S_{ku} w porównaniu z EDM.

Ponadto ocena wizualna powierzchni obrobionych mikromłoteczkami wykazuje na znacznie dłuższy kontakt młotka z powierzchnią, niż jest to w przypadku głowicy rotopeen [1]. Jest ona błyszcząca z wyraźną ścieżką przejść młotków po powierzchni. Może być to wynikiem ułożenia elementów nagniatających w jednej płaszczyźnie. Zarówno ruchome umocowanie młotków w tarczy nie jest bez znaczenia. W momencie kontaktu młotka z powierzchnią następuje jego przemieszczenie, poślizg do pozycji, w której zostaje on zablokowany przez gniazdo kolejnego elementu nagniatającego.



Rys. 2. Obrazy 3D powierzchni po obróbkach: a) EDM, b) sekwencja obróbek EDM i OPZ
 Fig. 2. 3D images obtained from the scanning profilometer: a) EDM b) EDM + cold work treatment

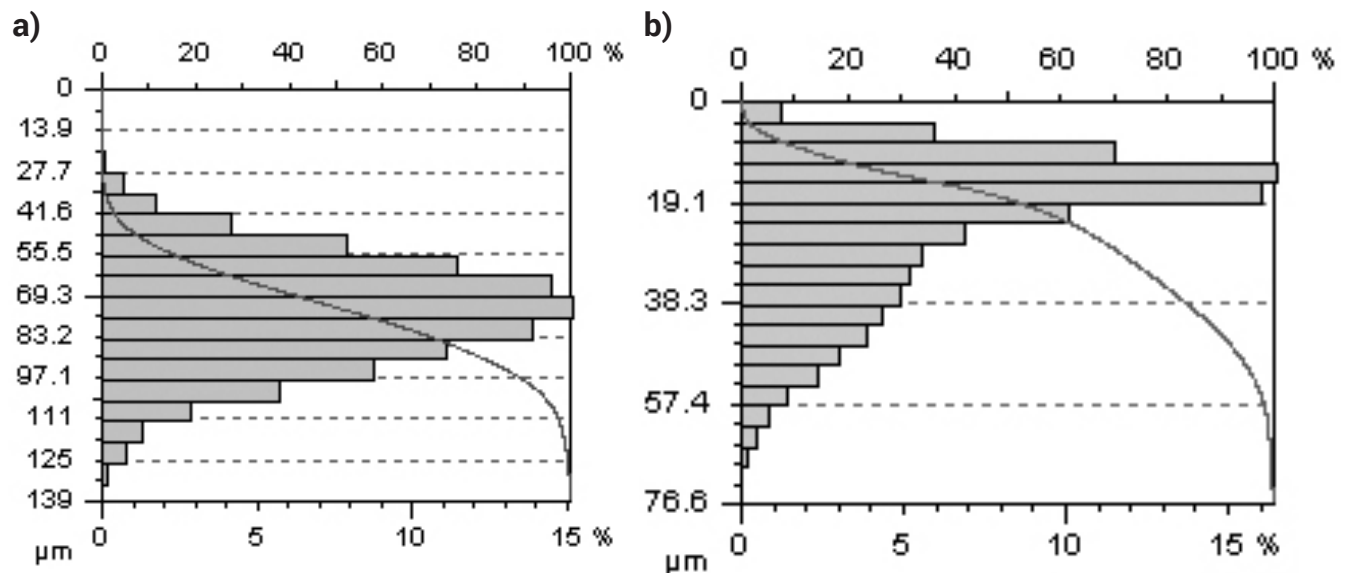


Rys. 3. Parametry krzywej nośności: powierzchnia po: a) EDM, b) EDM + OPZ
 Fig. 3. Abbot-Firestone Curve parameters surface after: a) EDM process, b) EDM + cold work treatments

Tablica II. Zestawienia pomiarów mikrostereometrii powierzchni 3D obrobionych EDM i OPZ

Table II. Influence of the combined EDM and microhaammering process parameters on surface roughness

Rodzaj obróbki	Parametry amplitudowe					Parametry hybrydowe i przestrzenne		
	Sa [μm]	St [μm]	Sp [μm]	Sku	Ssk	Sdq	Spk [μm]	Svk [μm]
EDM_303	4,42	41,4	16,8	3,29	-0,49	0,265	3,52	7,39
EDM303_M4300_2.5	2,43	32	8,42	6,96	-1,55	0,153	1,58	6,47
EDM303_M6500_2.5	1,35	27,7	4,98	15,3	-2,51	0,0977	0,842	4,4
EDM402	14,4	139	74,4	2,94	-0,126	0,44	11,2	14,4
EDM402_M4300_2.5	11,2	76	23,2	3,21	-0,931	0,315	2,26	13,4
EDM402_M6500_2.5	8,63	72	20,2	4,01	-1,19	0,285	2,21	13,1
EDM432	22,9	248	151	3,92	-0,21	0,461	24,3	21,3
EDM432_M4300_2.5	17,5	136	47,2	4,12	-0,61	0,322	4,32	21,4
EDM432_M6500_2.5	15,7	138	43,2	6,81	-0,874	0,42	4,19	19,4



Rys. 4. Rozkład rzędnych dla powierzchni po: a) EDM, b) EDM + OPZ

Fig. 4. Amplitude Density Function for surface after: a) EDM process b) EDM + cold work treatments

Wnioski końcowe

Analiza mikrostereometrii i danych liczbowych wyników pomiarów SGP pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- mikrogeometria powierzchni obrobionych EDM i następnie poddanych obróbce mikromłoteczkowaniem charakteryzuje się rozległymi, bardzo łagodnymi wierzchołkami oraz obecnością względnie głębokich mikro wgłębień jako pozostałości po SGP EDM;
- charakter SGP jest dla tych przypadków podobny w całym zakresie badanych parametrów;
- przedłużanie czasu obróbki oraz zwiększanie prędkości obrotowej narzędzi w badanym zakresie parametrów nie powoduje istotnego polepszenia stanu SGP, powoduje natomiast istotne skrócenie trwałości narzędzia;
- wartość amplitudowych parametrów powierzchni obrobionych EDM i mikromłoteczkowaniem zmniejsza się St i Sa o ok. 30÷40% natomiast Sp ok. trzykrotnie;
- krzywizny wierzchołków zmniejszają się ok. 10-krotnie, a pochylenia nierówności o ok. 30%;
- chropowatość powierzchni po obróbce mikromłoteczkowaniem ma bardziej łagodny charakter niż po EDM;
- powierzchnie z tego typu SGP mogą bardzo dobrze pracować w przypadkach, gdy wymagana jest wysoka nośność i obecność równomiernie rozłożonych kieszeni smarnych.

Literatura

- [1] Nowicki B., Podolak-Lejtas A., Dmowska A.: A new method of investigating crater and flash made by individual discharge using scanning profilometers, *WEAR* 270, 2011, s.121-126, ISSN 0043-1648.
 - [2] Podolak-Lejtas A., Nowicki B., Dmowska A.: Surface layer properties after successive EDM or EDA and then superficial roto-peen machining, *Advances in Tribology*, 2012, pp. 12.
 - [3] Oczóś K., Liubimov V.: Struktura geometryczna powierzchni, Oficyna wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003.
 - [4] Nowicki B.: Zaawansowane metody opisów i pomiarów struktury geometrycznej powierzchni, *Mechanik* 1, s. 36-41, 2007.
 - [5] Grzesik W.: Wpływ obróbki sekwencyjnej na topografię powierzchni stali utwardzanej, *Mechanik* nr 5-6, s. 350-363, 2014.
 - [6] Grzesik W.: Wpływ topografii powierzchni na właściwości eksploatacyjne części maszyn, *Mechanik* nr 8-9, s. 587-593, 2015.
 - [7] Świercz R., Oniszczyk-Świercz D.: Wpływ parametrów obróbki elektroerozyjnej na właściwości użytkowe stali o wysokiej przewodności cieplnej, *Mechanik* nr 1, s. 29-34, 2015.
 - [8] Świercz R., Oniszczyk-Świercz D.: Obróbka elektroerozyjna – badanie impulsów elektrycznych napięcia i natężenia prądu, *Mechanik* nr 2, s. 112-113, 2017.
 - [9] Kurth J.P., Van Humbeeck J., Stevens L.: Micro structural investigation and metallographic analysis of the white layer of a surface machined by electro discharge machining, *ISEM XI, Losanna*, pp. 849-862.
 - [10] Świercz R., Oniszczyk-Świercz D.: Experimental investigation of surface layer properties of high thermal conductivity tool steel after electrical discharge machining, *Metals*, vol. 12, 2017, doi:10.3390/met7120550.
 - [11] Radek N., Żórawski W.: Technologia wytwarzania i właściwości powłok węglkowo-ceramicznych nanoszonych elektroiskrowo-modyfikowanych wiązką laserową, *Przegląd Spawalnictwa*, vol.84(8), s. 11-15, 2012.
 - [12] Przybylski W.: Technologia obróbki nagniataniem, *Wydawnictwo Naukowo-Techniczne*, Warszawa 1987.
 - [13] Radziejewska J., Kalita W.: Badanie wpływu parametrów obróbki hybrydowej na mikrostrukturę warstw wierzchniej, *Przegląd Spawalnictwa* vol. 81(10), s. 20-26, 2009.
-