



Organizator:
Politechnika Warszawska
Instytut Techniki Wytwarzania

Przewodniczący:
Lucjan Dąbrowski
ld@meil.pw.edu.pl
http://snoe.meil.pw.edu.pl

Szkoła Naukowa Obróbek Erozyjnych

SNOE

Artykuły naukowe z 2014 r.

Patronat naukowy: SEKCJA PODSTAW TECHNOLOGII KOMITETU BUDOWY MASZYN POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Obróbka powierzchniowa zgniotem jako źródło umocnienia warstwy wierzchniej po obróbce elektroerozyjnej

Cold work treatment as a source of strengthening the surface layer after the electro discharge machining

ANNA PODOLAK-LEJTAS*

Przedstawiono analizę oddziaływania pojedynczego narzędzia (kulki/mikromłoteczka) na mikrogeometrię powierzchni i umocnienie WW. Przeprowadzono badania nad zastosowaniem obróbki powierzchniowych zgniotem do modyfikacji warstwy wierzchniej elementów po obróbce elektroerozyjnej.

SŁOWA KLUCZOWE: obróbka powierzchniowa zgniotem, roto peen, warstwa wierzchnia, obróbka elektroerozyjna.

The paper presents analysis of a single tool impact (ball / microhammer) on the surface microgeometry and strengthening of the surface layer. Studies were carried out using a cold work treatment to modify the surface layer of the element after electro discharge machining.

KEYWORDS: cold work treatment, roto peen, surface layers, electro discharge machining.

Założeniem procesu wytwarzania jest stworzenie przedmiotu łączącego w sobie cechy konstrukcyjne a zarazem jakościowe. Większość tych cech wyznaczana jest przez powstającą podczas procesu technologicznego warstwę wierzchnią. Można przyjąć, że jest ona efektem procesów zachodzących podczas obróbki w zewnętrznej strefie materiałów tj. procesów cieplnych, fazowych i mechanicznych oraz wzajemnych oddziaływań. Trzeba pamiętać, że każdy proces obróbkowy „posiada” procesy fizyczne determinujące konstytuowanie stanu warstwy wierzchniej. W przypadku obróbki elektroerozyjnej EDM warstw wierzchnia jest wynikiem lokalnych wyładowań iskrowych [2,5], w wyniku których powstaje przetopiona strefa

o zmienionej mikrostrukturze z mikropęknięciami, niekorzystnym stanem naprężeń oraz względnie wysoką chropowatością [1,3]. Taki stan WW wymaga zastosowania dodatkowych procesów technologicznych, które zapewniłyby pozytywne cechy WW i pożądane właściwości eksploatacyjne. Najczęściej spotykane metody to:

- obróbka ścierna, w wyniku której następuje usunięcie WW i wygładzeni powierzchni,
- obróbka strumieniem kulek szklanych lub ceramicznych, efekt który zbliżony jest do mechanicznego polerowania, następuje całkowite usunięcie WW wytworzonych w procesie EDM a stan wynikowy WW jest typowy dla obróbki ścierniej,
- obróbka powierzchniowa zgniotem z zastosowaniem strumienia kulek stalowych lub żeliwnych (shoot peening, kulowanie).

Obróbka kulowaniem należy do obróbek dynamicznych, których siły nagniatania są okresowo zmienne oddziaływając w sposób dynamiczny na przedmiot. Wywołują w strefie styku z przedmiotem, odkształcenia plastyczne i sprężyste, będące źródłem zmian w pod powierzchniowych warstwach wierzchnich. Odkształcenia te powodują zmiany orientacji. Zmiany te powodują wzrost twardości WW, korzystny rozkład naprężeń oraz uodpornienie jej na działanie takich czynników eksploatacyjnych jak zmęczenie, zużycie ściernie, korozyjne [4,7].

W badaniach zostały wykorzystane dwie głowice do lokalnej obróbki powierzchniowej zgniotem to jest głowica do roto peenu i do mikromłoteczkowania. Obróbka tymi narzędziami polega na cyklicznym uderzaniu powierzchni obrabianej twardymi elementami roboczymi o małym promieniu i sterowanej prędkości obrotowej w zakresie 3000 do 8000 obr/min. Ten rodzaj obróbki jest alternatywą do obróbki shoot peenieng. Narzędzie do obróbki roto peen wykonane jest z dwóch elastycznych płatków wykonanych z tkaniny na bazie włókna szklanego na których umieszczone są kulki z węgla wolframu o promieniu $r = 0,5$ mm. Powierzchnie obu płatków połączone są ze sobą, co umożliwia łatwiejsze zamocowanie ich w szczelinie wrzeciona.

*dr inż. Anna Podolak – Lejtas (apodolak@meil.pw.edu.pl)

Technologia mikromłoteczkowania podobnie jak roto peen została oparta na nagniataniu dynamicznym - odśrodkowym. Podstawowe elementy głowicy to:

- korpus w postaci podwójnej tarczy z trzpieniem mocującym głowicę w uchwycie szlifierki,
- mikromłoteczki o promieniu części roboczej $r = 1$ do 1,5 mm wykonane ze stali ŁH15, 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,
- elementy zderzakowe wykonane z elastycznego materiału.

Oba narzędzia dzięki niewielkim rozmiarom głowicy ($\varnothing = 30 \div 40$ mm) umożliwiają obróbkę powierzchni płaskich oraz krzywoliniowych o niewielkich rozmiarach (rys.1). Procesy fizyczne zachodzące podczas trwania obróbki głowicami, powinny spowodować umocnienie materiału, wprowadzić w WW naprężenia ściskające i zamknąć lub spowodować zanik mikropęknięć. A to powinno skutkować wzrostem wytrzymałości zmęczeniowej i polepszeniem właściwości użytkowych elementów obrobionych elektroerozyjnie.

Badania wpływu warunków obróbki roto peen i mikromłoteczkowania na stan WW po tych obróbkach i możliwość zastosowania tych obróbek do modyfikacji WW po EDM prowadzone były wieloetapowo. Pierwszy etap badań to ocena wpływu oddziaływań pojedynczej kulki roto peen i mikromłoteczka na mikrogeometrię powierzchni. Drugi etap to ocena wpływu oddziaływań narzędzia roto peen i głowicy do mikromłoteczkowania na stan WW po tych obróbkach.



Rys. 1. Narzędzia do obróbki powierzchniowej zgniotem a) roto peen b) głowica do mikromłoteczkowania

Badania dynamicznego oddziaływania narzędzia

Intensywność oddziaływania poszczególnych narzędzi do obróbki powierzchniowej zgniotem oceniano na podstawie pomiarów wielkości śladów, jakie powstają na obrabianej powierzchni wskutek pojedynczego uderzenia mikromłoteczka lub jednej kulki narzędzia do roto peen, w warunkach obróbki dynamicznej. Badania te powinny umożliwić prognozowanie sił dynamicznego oddziaływania poszczególnych narzędzi na powierzchni obrabianej.

Badania dynamicznego oddziaływania pojedynczego narzędzia wykonano na stanowisku zbudowanym na bazie szlifierki, do której przymocowano szlifierkę ręczną wyposażoną w narzędzia do roto peen lub mikromłoteczkowania. Na stole szlifierki usytuowany został magnetyczny uchwyt do mocowania próbek. Szybki przesuw stołu z badaną próbką zapewniał nie pokrywanie się kolejnych śladów uderzeń mikromłoteczek/kulek na badanej powierzchni. Stanowisko to umożliwia uzyskiwanie serii niestykających się śladów oddziaływania elementów roboczych na badanej powierzchni łatwych do pomiaru na profilometrze skaningowym.

W badaniach wykorzystano próbki Almena typ C o wymiarach 76 x 19 x 15 o różnyh: 49 HRC, 45 HRC, 40 HRC, 34 HRC.

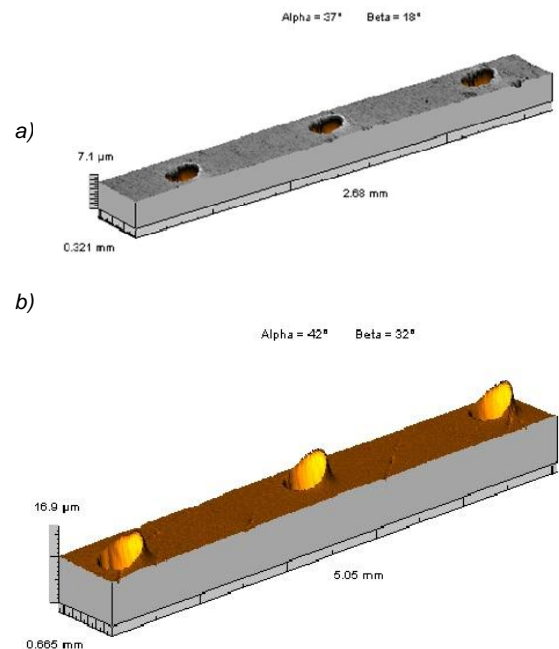
Wykonano uderzenia pojedynczym narzędziem przy 3 prędkościach:

- $n = 4300$ obr/min co odpowiada $v = 6,8$ m/s,
- $n = 5600$ obr/min co odpowiada $v = 8,8$ m/s,
- $n = 6700$ obr/min co odpowiada $v = 10,5$ m/s.

Na profilometrze skaningowym dokonano pomiarów trójwymiarowej charakterystyki śladów uderzeń (3D) i obliczono następujące cechy śladów uderzeń (do każdej wielkości wybrano po 5 śladów uderzenia):

- powierzchnia - S [mm²],
- głębokość - G [μm],
- średnica - d [mm].

Przedstawiono obrazy 3D śladu dynamicznego oddziaływania pojedynczego narzędzia roto peen i mikromłoteczka (rys. 2) oraz w tabeli 1 umieszczono wyniki pomiarów cech geometrycznych powstałych śladów uderzenia w warunkach dynamicznych kulki roto peen i mikro-młoteczka dla próbek o twardości 34 HRC.



Rys. 2. Obrazy 3D powierzchni po uderzeniu pojedynczego narzędzia: a) roto peen (kulka), b) mikromłoteczka

Tab. 1. Wyniki pomiarów cech geometrycznych powstałych śladów uderzenia w warunkach dynamicznych kulki roto peen i mikromłoteczka dla próbek o twardości 34 HRC.

n [obr/min]	ROTO PEEN	μMŁOTECZKOWANIE
Powierzchnia [mm²]		
4300	0,0190	0,063
5600	0,0242	0,104
6700	0,0254	0,121
Głębokość [μm]		
4300	4,87	7,278
5600	6,016	14,76
6700	3,602	16,88
Średnica [mm]		
4300	0,196	0,264
5600	0,17	0,3092

Z analizy obrazów 3D i wyników uzyskanych z pomiarów na profilometrze skaningowym można zaobserwować [6]:

- ślady powstałych czas po uderzeniu pojedynczym mikromłoteczkiem są około 3 razy większe od śladów po roto peenie związane jest to z znacznie większą masą mikromłoteczka niż kulki,
- charakterystyka zmian powierzchni śladu dynamicznego oddziaływania pojedynczej kulki narzędzia roto peen na obrabianą powierzchnię jest nieliniowa o charakterze asymptotycznym,
- charakterystyka oddziaływań mikromłoteczków na obrabiane powierzchnie, w badanym zakresie prędkości i twardości, ma charakter zbliżony do liniowej i umożliwia wyznaczenie równoważnych statycznych sił oddziaływania narzędzi na obrabianą powierzchnię i wymiarów śladów tych oddziaływań,
- kształt charakterystyki zmian powierzchni śladu dynamicznego oddziaływania pojedynczej kulki narzędzia roto peen na obrabianą powierzchnię może wynikać z oporów aerodynamicznych płaska narzędzia roto peen, jego odchylenia się w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu i wynikających stąd zmian kątów uderzenia kulek w obrabianą powierzchnię,
- stosowanie prędkości powyżej 6000 obr/min nieznacznie wpływa na siły wzajemnego oddziaływania, wpływa natomiast na liczbę uderzeń w jednostce czasu.

Badanie wpływu parametrów obróbki roto peen i mikromłoteczkowania na stan WW po tych obróbkach

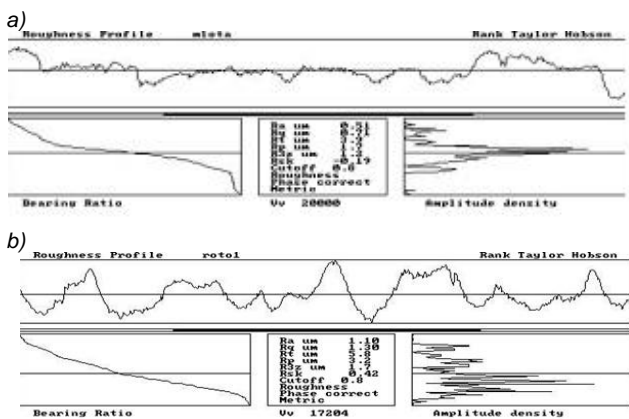
Drugi etap badań to ocena wpływu oddziaływań narzędzia roto peen i głowicy do mikromłoteczkowania na stan WW:

- chropowatość powierzchni,
- rozkład mikrołoteczności w WW,
- strzałki ugięcia próbek jako miary naprężeń własnych WW.

Jako zmienne niezależne przyjęto prędkość obrotową narzędzi: $n = 3560; 4330; 5020; 5920$ i 7100 obr/min, oraz czas obróbki i wynosił on odpowiednio: $t = 90; 180; 360; 600$ i 900 sekund.

Pomiary chropowatości zostały wykonane przy pomocy profilometru Talysurf – M10.

Na rysunku 3 przedstawiono profilogramy chropowatości powierzchni obrabianych metodą roto peen i mikromłoteczkowaniem.



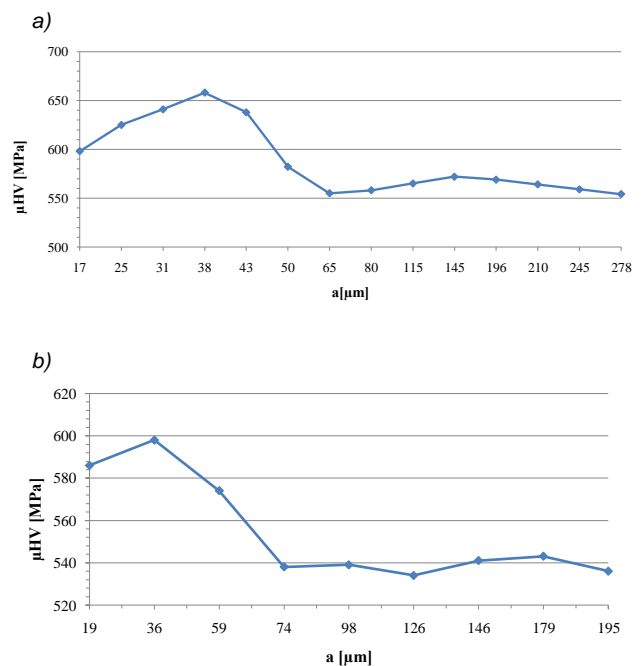
Rys. 3. Profilogramy chropowatości powierzchni po obróbce a) mikromłoteczkowaniem, b) rotopeen

Analiza wyników pomiarów i profili wykazała, że znacznie większą chropowatość powierzchni uzyskujemy po obróbce roto peen. Wielkości te są prawie 3 -krotnie większe od uzyskanych po obróbce mikromłoteczkowaniem [58]. Chropowatość powierzchni R_a dla obróbki roto peen wynosi $1,3 \div 3,3$ μm , natomiast dla mikromłoteczkowania $0,3 \div 0,6$ μm . Na uzyskane wartości chropowatości ma wpływ [6]:

- rodzaj elementu nagniatającego i opisujące go wielkości fizyczne i geometryczne (promień narzędzia i materiał)
- siła z jaką elementy uderzają o powierzchnie (jest ona zależna od masy zarówno mikromłotków jak i kulek),
- sposób umocowania elementów nagniatających.

Ponad to, przez większe promienie zaokrąglenia mikromłoteczków powierzchnia po tej obróbce ma łagodniejszy charakter, jest ona błyszcząca z wyraźną ścieżką przejść mikromłotków po powierzchni. Może być to wynikiem ułożenia elementów nagniatających w jednej płaszczyźnie.

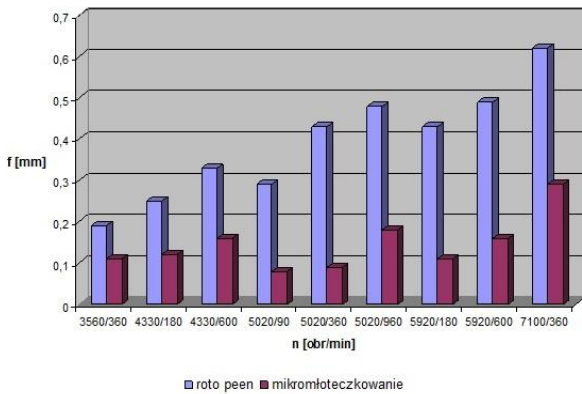
Przeprowadzona analiza pomiarów mikrołoteczności wykazała, istotny wzrost twardości w WW zarówno dla roto peenu jak i mikromłoteczkowania. Przyrost mikrołoteczności dla obu obróbek (w zależności od parametrów) wahają się w granicach od 100 do 200 jednostek a głębokości ich zalegania wynoszą od 50 do 90 μm . Na rysunku 4 przedstawiono wykresy mikrołoteczności w funkcji odległości od krawędzi dla próbek Almena obrabianych roto peen i mikromłoteczkowaniem.



Rys. 4. Wykres mikrołoteczności w funkcji odległości od krawędzi dla próbek Almena obrabianych a) roto peen $n = 3560$ obr/min, $t = 360$ s b) mikromłoteczkowaniem $n = 3560$ obr/min, $t = 360$ s, peen $n = 3560$ obr/min, $t = 360$ s

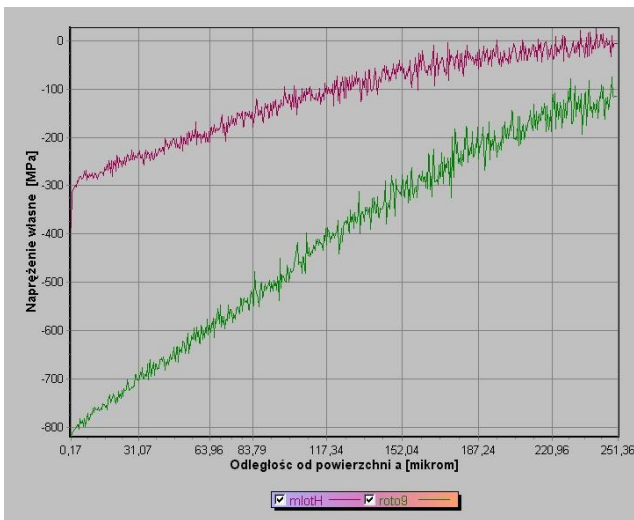
Dokonano również pomiaru strzałek ugięcia, które są miarą stanu naprężeń w WW. Pomiar strzałki ugięcia odbył się na jednostronnie obrabianych próbkach. Dla obróbki roto peen wartość mierzonej strzałki ugięcia jest prawie 3-krotnie większa od f mierzonego dla próbek obrabianych głowicą do mikromłoteczkowanie pomimo takich samych wartościach parametrów procesu (prędkość i czas). Może to wynikać z różniacej oba procesy liczby elementów, kinematyki narzędzia jak i intensywności przeprowadzonych procesów. Liczba uderzeń, z jaką obrabiana jest powierzchnia po roto peen jest kilka razy większa niż po obróbce głowicą z młoteczkami [6].

Na rysunku 5 przedstawiono zestawienia strzałek ugięcia próbek Almena dla obu obróbek.



Rys. 5. Zestawienie strzałki ugięcia próbek Almena dla obróbki rotopeen i mikromłoteczkowaniem

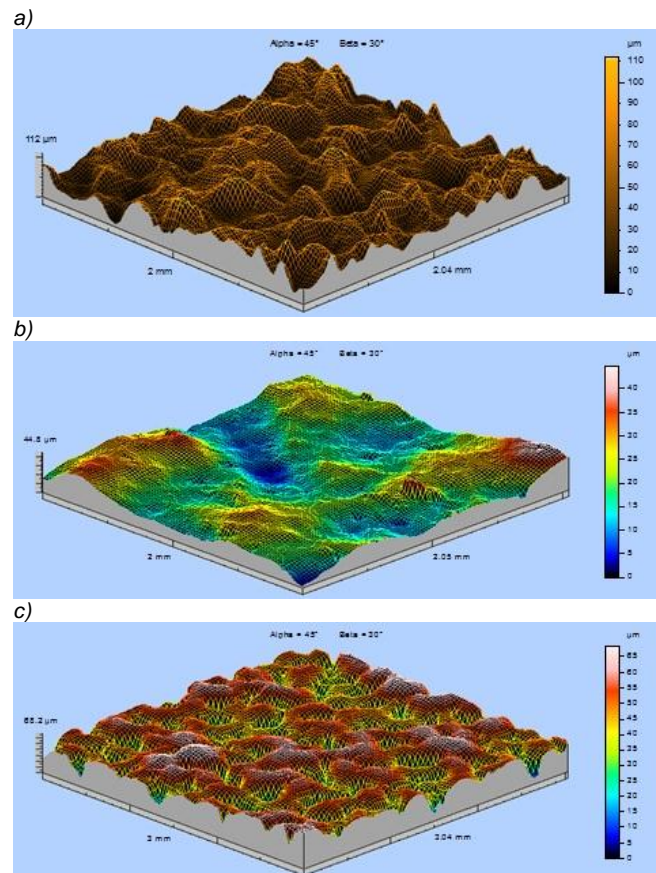
Z danych literaturowych [4,7,8] wynika, iż obróbki powierzchniowe zgniotem charakteryzują się powstawaniem naprężeń ściskających. Są one wynikiem odkształceń plastycznych, temperatury i przemian strukturalnych. Naprężenia te można wykorzystać do kompensacji stanu technologicznego naprężeń. Dla potwierdzenia tych danych dokonano pomiaru naprężeń metodą Weissmana- Philipsa próbek po obróbce roto peen i mikromłoteczkowaniu. Z przedstawionych wykresów (rys.6) wynika, że powstałe naprężenia są to naprężenia ściskające i mają trend liniowy. Próbkę obrabianą głowicą z młotkami szybciej osiąga stan, w którym naprężenia ściskające, przechodząc przez warstwę obojętną (równowagą oddziaływań WW i rdzenia) przyjmują wartości dodatnie tworząc naprężenia rozciągające. Powstałe naprężenia ściskające w warstwie podpowierzchniowej dla tego sposobu nagniatania przyjmują wartości ok.3-razy mniejsze niż dla rotopeenu. Jest to związane z wielkością zgniotu powstałego podczas umacniania materiału.



Rys. 6. Rozkłady naprężeń własnych po mikromłoteczkowaniu (kolor czerwony) i po roto peenie (kolor zielony)

Z przeprowadzonych badań obróbki powierzchniowej zgniotem wynika, że wykorzystanie głowic do rotopeenu i mikromłoteczkowania, stwarza możliwości znacznego rozszerzenia zakresu zastosowania tej obróbki. Wytworzenie określonych zmian własności fizycznych materiału w warstwie wierzchniej przedmiotu, powoduje wzrost twardości WW i korzystny rozkład naprężeń oraz uodpornienia WW na działanie takich czynników eksploatacyjnych, jak zmęczenie, zużycie ściernie, korozję. Dowodem na taki stan rzeczy są dalsze badania oraz wyniki zastosowania tych obróbek do modyfikacji warstwy wierzchniej po obróbce

elektroerozyjnej. Na rysunku 7 widoczne są mapy warstwicowe wykonane za pomocą profilometru skanującego próbek po obróbce EDM i obróbkach łączonych EDM+ roto peen i EDM + mikromłoteczkowaniem.



Rys. 7. Mapy warstwicowe próbek po a) EDM, b) EDM+ roto peen, c) EDM + mikromłoteczkowaniem

Z analizy obrazów wynika, iż:

- oddziaływanie kulek narzędzi roto peen na wierzchołki chropowatości o średniej i wysokiej chropowatości ze względu na małe wartości ich promieni krzywizny jest bardzo skuteczne i wierzchołki te ulegają silnym odkształceniom przyjmując kształt zbliżony do płaskiego,
- mikrogeometria powierzchni obrabianych EDM i następnie poddanych obróbce mikromłoteczkowaniem charakteryzuje się rozległymi, bardzo łagodnymi wierzchołkami oraz obecnością względnie głębokich mikro wgłębień jako pozostałości po SGP EDM. Powierzchnie z tego typu SGP mogą bardzo dobrze pracować w przypadkach, gdy wymagana jest wysoka nośność i obecność równomiernie rozłożonych kieszeni smarnych.

Natomiast analiza rozkładów mikrotwardości w głąb warstwy wierzchniej wykazała, że zastosowanie obróbki powierzchniowej zgniotem po EDM powoduje istotny wzrost mikrotwardości WW:

- EDM+RP mikrotwardość wzrasta z około 800 μ HV do około 1100 μ HV, a głębokość ich zalegania w zależności od parametrów sięga do 60 μ m,
- EDM+ mikromłoteczki głębokość zmian mikro-twardości sięga do około 50 μ m w głąb materiału mikrotwardość jest o około 400 jednostek większa niż mikrotwardość rodzimego materiału.

Podsumowanie

- opracowane charakterystyki śladów oddziaływania narzędzi (kulka, mikromłoteczek) pozwalają na wyznaczenie

nie sił oddziaływania narzędzi na obrabianą powierzchnię w warunkach obróbki

- obróbki roto peen i mikromłoteczkowanie umożliwiają efektywne wygładzanie powierzchni i umocnienie WW, są skutecznymi sposobami modyfikacji stanu WW po EDM i umożliwiają poprawę najważniejszych właściwości użytkowych,
- zastosowanie po EDM obróbki OPZ z użyciem głowic do roto peenu i mikromłoteczkowania do modyfikacji WW umożliwia kilkukrotne zmniejszenie wysokości chropowatości, nadanie jej korzystnych cech tj. dużych wartości promieni zaokrąglenia wierzchołków, małych pochyleń nierówności i dużych wartości udziałów nośnych dla małych zbliżeń,
- naprężenia dla obróbki z głowicą do mikromłoteczkowania przyjmują wartości ok. 3 razy mniejsze niż dla roto peenu – jest to związane z wielkością zgniotu powstałego podczas umocnienia materiału,
- zmiany w WW po mikromłoteczkowaniu mają bardziej łagodny przebieg, może być to związane z geometrią narzędzia, siłą z jaką elementy uderzają o powierzchnię, sposobu umocowania elementów nagniatających.

LITERATURA

1. Górecki R., Polański Z, Metrologia warstwy wierzchniej. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 1983.
2. Kurth J.P., Van Humbeeck J., Stevens L., Lauwers B., Study of the white layer of a surfach machnie by die- sinking elektro-discharge machining. Ann. Cirp 44(1), 169-172,(1995).
3. 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, 849 - 862.
4. Nakonieczny A., Dynamiczna powierzchniowa obróbka plastyczna kulowanie shot peening. Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa 2002.
5. Oniszczyk D., Świercz R. "Investigation into the impact of electrical pulse character on surface texture in the EDM and WEDM process", Advances in Manufacturing Science and Technology, Angielski, ISSN 0137-4478, pp. 43-53
6. Podolak-Lejtas A., Modyfikacja warstwy wierzchniej zgniotem powierzchniowym elementów obrobionych elektroerozyjnie. Rozprawa doktorska. Warszawa, 2010.
7. Przybylski W., Technologia obróbki nagniataniem. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 1987.
8. Szulc S., Stefko A., Obróbka powierzchniowa części maszyn. Wydawnictwo Naukowo- Techniczne, Warszawa 1976.