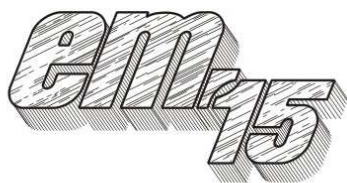


XII Międzynarodowa Konferencja - Electromachining 2015



UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZY
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Inżynierii Produkcji
STOWARZYSZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
MECHANIKÓW POLSKICH – Koło Uczelniane UTP

85-789 Bydgoszcz, ul. Kaliskiego 7
tel. (0 52) 340-87-47, fax. (0 52) 340-82-45,
e-mail: tomasz.paczkowski@utp.edu.pl

Wpływ laserowego nagniatania na stan warstwy wierzchniej materiałów po obróbce elektroerozyjnej

The influence of the Laser Shock Processing on the state of the surface layers after electrodischarge machining

ANNA PODOLAK - LEJTAS¹
JOANNA RADZIEJEWSKA²

Przedstawiono wstępne wyniki badań wpływu laserowej obróbki impulsowej (LSP) do modyfikacji warstwy wierzchniej elementów obrobionych elektroerozyjnie i porównanie jej efektów z obróbką powierzchniową zgniotem typu roto peen. W badaniach skupiono się nad oceną struktury geometrycznej powierzchni, strukturą metalograficzną i rozkładem mikrotwardości jako cechami decydującymi o jakości wyrobów.

SŁOWA KLUCZOWE: warstwa wierzchnia, Laser Shock Processing (LSP), EDM, mikrotwardość.

The paper presents preliminary analysis of the Laser Shock Processing influence on the surface layers modification of the parts after electrodischarge machining (EDM). The study focuses on the evaluation of surface texture, structure and microhardness distribution as the factor which determine the quality of products.

KEYWORDS: surface layers, Laser Shock Processing(LSP), EDM, microhardness.

Wstęp

Problematyka modyfikacji warstwy wierzchniej po obróbce elektroerozyjnej w literaturze była poruszana wielokrotnie [3, 6]. W procesie EDM warstwa wierzchnia tworzona jest w wyniku lokalnych wyładowań iskrowych energia, których powoduje lokalne topnienie i parowanie metalu oraz tworzenie charakterystycznych warstw wierzchnich. WW po EDM

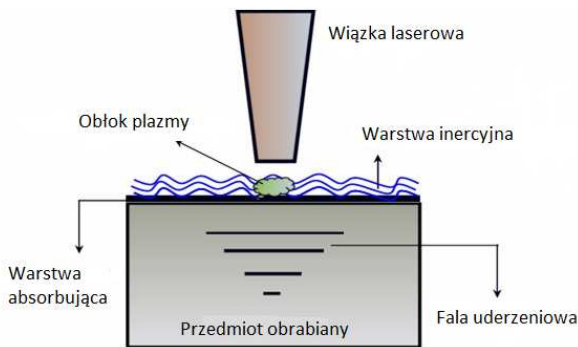
zawiera strefę przetopioną strefa o zmiennej mikrostrukturze z widocznymi pęknięciami, niekorzystnym stanem naprężeń w postaci naprężeń rozciągających oraz względnie wysoką chropowatością [3, 6, 8]. Pod nią występują zwykle strefy wpływów cieplnych i odpuszczona, niekorzystny stan warstwy wierzchniej po EDM w wielu przypadkach wymaga zastosowania dodatkowych procesów technologicznych, które nadadzą pożądane cechy warstwy wierzchniej a w konsekwencji wpłyną korzystnie na właściwości eksploatacyjne. Najszybszą metodą jest usunięcie WW przez zastosowanie obróbek ściernych z użyciem np. elektro-narzędzi Przez co otrzymujemy powierzchnie o wymaganej gładkości. Metodą tą otrzymujemy zwykle całkowite usunięcie WW powstałej w wyniku procesu EDM i wynikowy stan WW typowy dla obróbki ścierniej. Innym procesem, który poprawia stan WW po EDM jest obróbka powierzchniowa zgniotem (OPZ) stosowana, jako obróbka gładkościowa i umacniająca. Ponieważ obróbka ta jest obróbką bezubytkową, więc warstwa wierzchnia po obu procesach (EDM i OPZ) powstaje w skutek modyfikacji warstwy wierzchniej utworzonej w procesie EDM (oddziaływania cieplne) przez oddziaływania mechaniczne występujące podczas OPZ. Najczęściej stosuje się obróbkę strumieniem kulek ze stali bądź żeliwa (shot peening, śrutowanie, roto peen (RP)). W wyniku oddziaływań mechanicznych, których efektem są odkształcenia plastyczne, następują zmiany mikrostruktury oraz generowane są naprężenia ściskające w WW i w wyniku następuje znacząca poprawa wytrzymałości zmęczeniowej. Co w przypadku obróbek erozyjnych nie jest bez znaczenia gdyż zmiany zachodzące w WW po EDM znacząco obniżają wytrzymałość.

Na podstawie przeprowadzonych dotychczasowych badań własnych [6] oraz przeglądu literatury stwierdzono, iż zastosowanie obróbki nagniataniem (narzędzie nagniatające - głowica do roto- peen) po drążeniu elektroerozyjnym

¹dr inż. Anna Podolak - Lejtas (apodolak@meil.pw.edu.pl)
²dr hab. inż. Joanna Radziejewska (jora@meil.pw.edu.pl)

umożliwia kilkukrotne zmniejszenie wysokości chropowatości, nadanie jej korzystnych cech tj. dużych wartości promieni zaokrąglenia wierzchołków, małych pochyłeń nierówności i dużych wartości udziałów nośnych dla małych zbliżeń oraz umocnienie WW przez wprowadzenie naprężeń ściskających.

Alternatywą do obróbki tradycyjnego kulowania może być Laser Shock Processing (laserowe umocnienie udarowe) potocznie nazywane kulowaniem laserowym (rys. 1) [4, 5, 7]. Proces ten jest zbliżony do shot peeningu z tym, że uderzenia kulką zastępowane są impulsem laserowym. Wiązka laserowa skierowana jest na obrabianą powierzchnię, która pokryta jest cienką warstwą absorbującą promieniowanie oraz grubszą warstwą inercyjną hamującą szybkość rozchodzenia się plazmy. Warstwa absorbująca (farba, grafit) ma za zadanie zwiększyć pochłanianie promieniowania i nie dopuścić do zagłębienia się fali cieplnej w głąb materiału, natomiast warstwa inercyjna (szkło, woda) ma ograniczyć szybkość rozchodzenia się plazmy [1, 2]. Odkształcenia plastyczne spowodowane falą uderzeniową powodują propagowanie naprężeń ściskających w głąb materiału.



Rys. 1. Schemat obróbki LSP

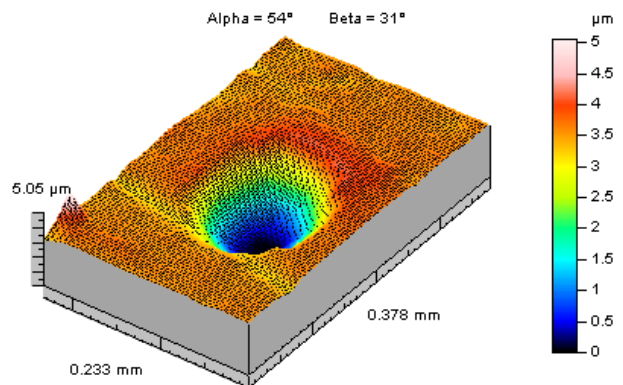
Celem przeprowadzonych badań było określenie czy zastosowanie obróbki LSP po drażeniu elektroerozyjnym pozwoli na uzyskanie równie korzystnych efektów jak po zastosowaniu po EDM dynamicznej obróbki nagniataniem. W badaniach skupiono się na ocenie takich czynników jak struktura geometryczna powierzchni, struktura metalograficzna i rozkład mikrotrwałości będących istotnymi elementami wpływającymi na właściwości eksploatacyjne części maszyn.

Metodyka badań

Badania przeprowadzone na próbkach wykonanych ze stali narzędziowej NC10 o wym. 20 x 10 x 5 mm, hartowanych do HRC 55, powierzchnie podlegające obróbce elektroerozyjnej szlifowano. Warunki obróbki EDM: polaryzacja prosta, elektroda grafitowa, dielektryk nafta. W związku z tym, że badania mają charakter rozpoznawczy ograniczono parametry elektryczne obróbki do dwóch wariantów odpowiadające kolejno obróbce zgrubnej – wysoko wydajnej (ozn. P1, I = 22 A, Ti = 220 μ s, Tp = 150 μ s, E = 0,2 J) i dokładnej (ozn. P2, I = 8 A, Ti = 13 μ s, Tp = 9 μ s, E = 0,05 J). Proces drażnienia został przeprowadzony na obrabiarce elektroerozyjnej firmy Charmilles Form 2LC ZNC. Badania laserowego umacniania powierzchni po EDM przeprowadzono na laserze o pracy impulsowej Nd:YAG generujący wiązkę o długości fali $\lambda = 1,0641 \mu$ m, długość impulsu 10 ns, energia impulsu 1J, warstwa absorbująca – grafit 5 μ m, warstwa inercyjna – woda destylowana 1 mm, średnica wiązki 2 mm, przesuw stolika 0,25 mm. Pozwoliło to na uzyskanie stopnia pokrycia powierzchni 8 impulsów/mm.

Wyniki badań i ich analiza

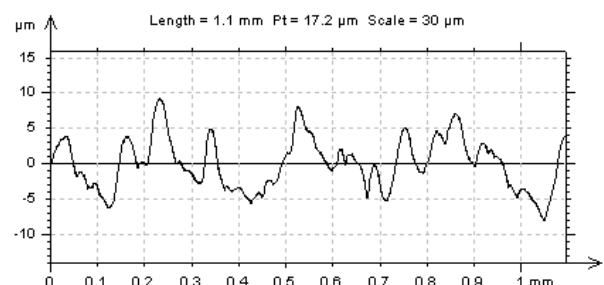
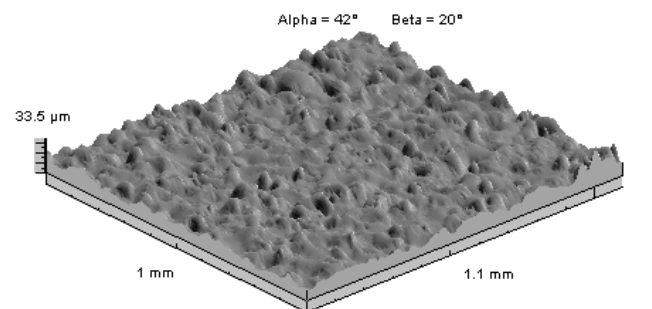
Proces kształtowania WW w procesach LSP oraz roto peen różnią się zasadniczo, LSP na obrabianą powierzchnię oddziałuje fala ciśnienia o równomiernych naciskach na całej powierzchni oddziaływania wiązki laserowej. Całkowita siła tego oddziaływania wynosi powyżej 2000 N, a ciśnienie rzędu 5 GPa przy energii impulsu 1 J. W przypadku obróbki roto peen występuje skoncentrowane mechaniczne oddziaływanie kulki z węgla spiekanego uderzającego w powierzchnię z prędkością $6 \div 10$ m/s. Na rys. 2 przedstawiono ślad uderzenia takiej kulki w powierzchnię stalowej próbki o twardości 40 HRC.



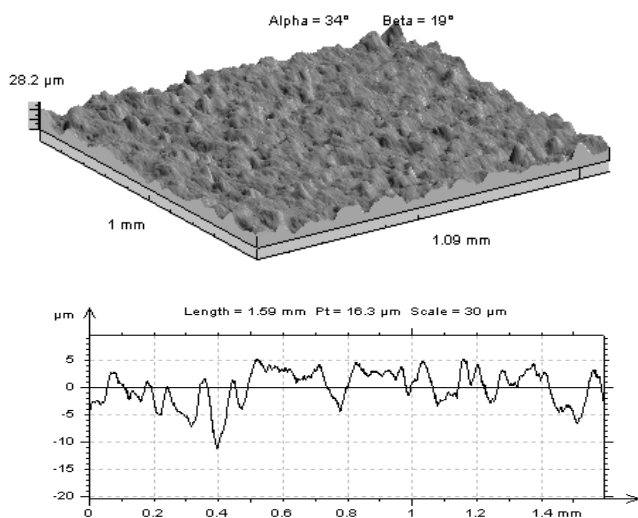
Rys. 2. Obraz z PS dynamicznego śladu oddziaływania kulki roto peen na próbkę o twardości 40 HRC z prędkości 6,8 m/s

Badania struktury geometrycznej powierzchni wykonano przy pomocy profilometru skanującego FORM TALYSURF Series 2 firmy Taylor – Hobson, obejmowały one pomiar mikrostereometrii powierzchni. Na rysunku 3 przedstawiono widoki 3D i profilogramy powierzchni obrabianych: a) EDM, b) EDM+LSP oraz obraz 3D powierzchni po obróbce EDM + roto peen.

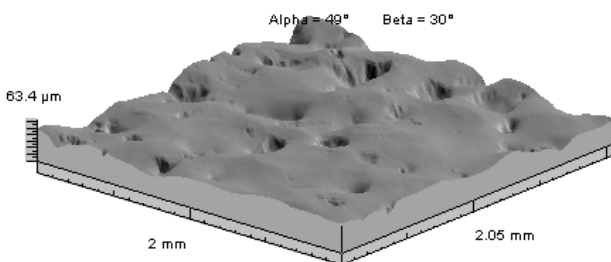
- a) $Sa = 3,05 \mu\text{m}$, $Sp = 19,2 \mu\text{m}$, $St = 33,5 \mu\text{m}$, $Sds = 665 \text{ pks/mm}^2$



- b) $Sa = 2,9 \mu\text{m}$, $Sp = 15,2 \mu\text{m}$, $St = 28,2 \mu\text{m}$,
 $Sds = 1509 \text{pks}/\text{mm}^2$



- c) $Sa = 1,3 \mu\text{m}$, $Sp = 6,3 \mu\text{m}$, $St = 15,3 \mu\text{m}$,
 $Sds = 185 \text{pks}/\text{mm}^2$



Rys. 3. Mikrostereometria i profilogramy wykonane na PS powierzchni obrabianych a) EDM (P2), b) EDM+ LSP, c) EDM+ RP

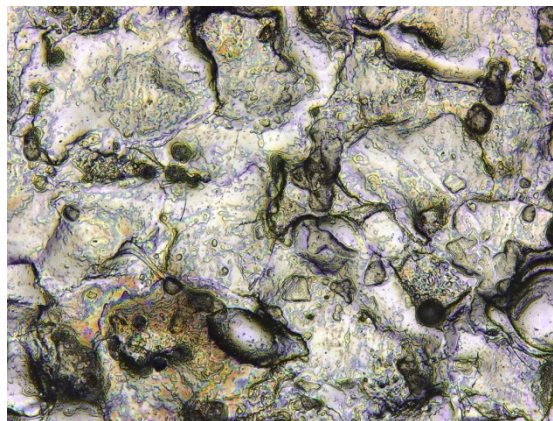
Analiza mikrostereometrii i danych liczbowych wyników pomiarów chropowatości powierzchni po obróbce elektroerozyjnej i po sekwencji obróbek EDM i LSP pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- występują niewielkie różnice wartości parametrów wysokościowych (rys. 3a, b) po sekwencji obróbek. Różnice te są spowodowane sposobem oddziaływania fali ciśnienia LPS i kulek roto peen na powierzchnię. W pierwszym przypadku wstępuje równomierne oddziaływanie a w drugim skumulowane,
- powierzchnie po EDM i LSP charakteryzują się niższymi wartościami parametrów chropowatości i bardziej jednorodną SGP,
- na rys. 3c przedstawiony został obraz SGP po obróbce łączonej EDM+ OPZ (roto peen). W zależności od zakresu parametrów obróbki nagniataniem widoczne jest wygładzenie wierzchołków sięgające dna (powierzchnie o wysokiej gładkości po EDM) oraz można zaobserwować mikrowgłębienia jako pozostałości po SGP powierzchni obrabianych EDM (przy parametrach zgrubnych),
- odkształcenia plastyczne będące następstwem oddziaływania fali uderzeniowej powodują zmianę kształtu wierzchołków chropowatości po EDM, struktura nadal charakteryzują się duża losowością,
- na profilogramach (rys. 3) można zaobserwować znaczne zagęszczenie wierzchołków po obróbce sekwencyjnej, czego dowodem jest wzrost parametru Sds będącego miarą gęstości wierzchołków powierzchni. W przypadku obróbki sekwencyjnej zauważalny wzrost

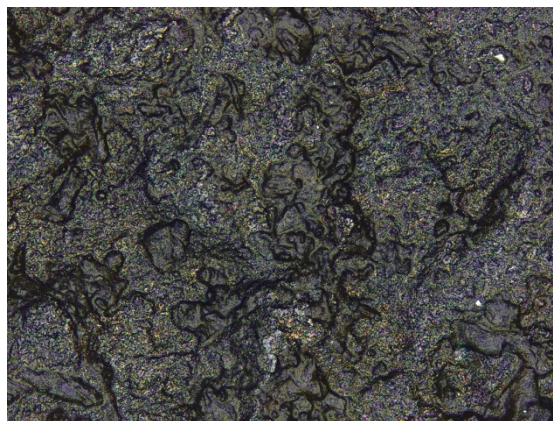
tego parametru od 2 do 4 razy w zależności od parametrów wyjściowych po obróbce elektroerozyjnej.

Na poniższych fotografiach przedstawiono obrazy powierzchni po EDM (rys. 4a) i po obróbce łączonej EDM+ LSP (rys.4b) wykonany na mikroskopie konfokalnym Keyance VK – X100. Powierzchnia po obróbce łącznej (EDM+LSP) jest bardziej rozwinięta, z większą liczbą mikrowgłębieni. Na powierzchni można stwierdzić obecność grafitu.

a)



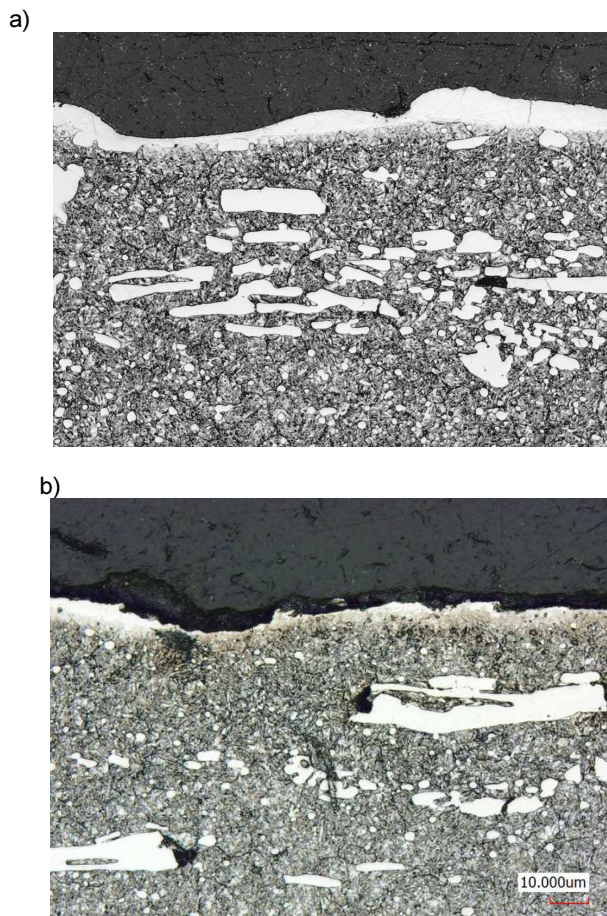
b)



Rys. 4. Obraz powierzchni: a) EDM ($I = 8 \text{A}$, $T_i = 13 \mu\text{s}$, $T_p = 9 \mu\text{s}$), b) EDM+LSP

Dokonano również oceny mikrostruktury metalograficznej WW na zładach wykonanych prostopadle do powierzchni obrabianej. Gwałtowne procesy termiczne występujące na powierzchni obrabianych elementów podczas EDM, powodują powstanie nietypowej struktury warstwy wierzchniej (warstwy przetopiona (biała), wpływów cieplnych, odpuszczona). Warstwa biała/przetopiona będąca wynikiem roztopienia i gwałtownego krzepnięcia cienkiej warstwy metalu na powierzchni krateru generuje powstawanie mikropęknięć i naprężeń rozciągających. W efekcie powodując zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej i odporności na korozję. W zależności od zastosowanych parametrów procesu drażenia grubość warstwy przetopionej dla przebadanych próbek waha się w granicy od 5 do 40 μm dla obróbki zgrubnej (P1) i od 4 do 10 dla obróbki średniociągłej (P2). Po obróbce sekwencyjnej grubość warstwy białej wynosi odpowiednio do 30 μm (dla P1) i do 5 μm (dla P2). Na rys.4 widoczna jest struktura metalograficzna dla obróbki EDM (rys. 5a) oraz dla EDM + LSP (rys. 5b). Można stwierdzić wyraźne zmniejszenie grubości warstwy białej w przypadku zastosowania LSP po EDM. W obu przypadkach mikrostruktura materiały składa się martenzytu z wydziele-

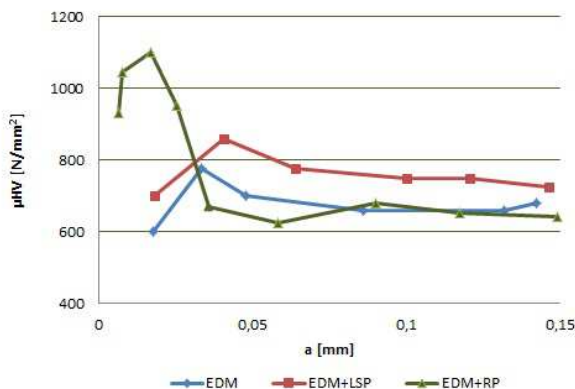
niami węglików o zróżnicowanej wielkości i wyraźnej pasmowości. Zmniejszenie grubości warstwy białej po LSP może być spowodowane jej wykruszeniem lub przemianami fazowymi. Konieczne są dalsze, bardziej szczegółowe badania w celu wyjaśnienia zjawiska.



Rys. 5. Obrazy zglądów metalograficznych: a) EDM ($I = 8A$, $T_i = 13 \mu s$, $T_p = 9 \mu s$), b) EDM+LSP, pow. $\times 100$

Poza zamianami w grubości warstwy wierzchniej również istotna jest jej mikrotwardość będąca miarą zmian, jakie zaszły podczas obróbki sekwencyjnej. Pomiar mikrotwardości wykonano na mikroskopie metalograficznym Zeiss – Epityp 2, wyposażonym w głowice Hanemanna przy obciążeniu wgłębnika 0,4 N.

Na rys. 6 przedstawiono wykres mikrotwardości w funkcji odległości od krawędzi dla obróbki EDM (wykres niebieski, $I = 22 A$, $T_i = 220 \mu s$, $T_p = 150 \mu s$), EDM+LSP (wykres czerwony).



Rys. 6. Rozkład mikrotwardości w funkcji odległości od powierzchni przy obciążeniu 0,4 N

Analiza pomiarów mikrotwardości WW po obróbce sekwencyjnej EDM + LSP wykazała istotny wzrost twardości w warstwie wierzchniej w stosunku do próbki po EDM. Głębokość zmian mikrotwardości sięga do około 150 μm od powierzchni. Dodatkowo umieszczono wykres mikrotwardości dla próbek po obróbce EDM i nagniataniem (wykres zielony). Mikrotwardość ta wzrasta z około 800 μHV do około 1100 μHV , a głębokość ich zalegania w zależności od parametrów sięga do 80 μm . Ponadto w wyniku oddziaływania elementów nagniatających na obrabianą powierzchnię, grubość warstwy wierzchniej ulega zmniejszeniu o około 50%, jest bardziej równomierna bez widocznych mikropęknięć i nieciągłości.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wskazują, że zastosowanie LSP do elementów obrabianych metodą elektroiskrową zmniejsza grubość warstwy białej i powoduje wzrost mikrotwardości WW już w przypadku zastosowania minimalnej intensywności obróbki (8 impulsów/mm) dla materiału o bardzo wysokiej twardości. LPS nie spowodowało znaczącego zmniejszenia wysokości chropowatości powierzchni po EDM tak jak w przypadku nagniatania dynamicznego rotopeen. Niezbędne są dalsze badania przy większej intensywności procesu LPS.

Końcowy stan WW po obróbce elektroerozyjnej przyczynia się do obniżenia własności użytkowych pracujących elementów. Zastosowanie procesów kompensujących negatywne aspekty tej obróbki może istotnie polepszyć podstawowe właściwości eksploatacyjne obrabianych elementów. Zastosowanie impulsowej obróbki laserowej do modyfikacji WW po EDM podobnie jak obróbki nagniataniem może istotnie wpływać na funkcjonalność elementów.

Do tego celu potrzebna jest dogłębna analiza zmian w WW obejmująca ocenę mikro- i makrostruktury z uwzględnieniem ewentualnych nieciągłości i mikropęknięć. Badania należałoby rozszerzyć o ocenę stanu warstwy wierzchniej w zakresie naprężeń i właściwości użytkowych takich jak np. wytrzymałość zmęczeniową.

LITERATURA

- Burakowski T., Napadłek W., Laserowe umacnianie udarowe materiałów konstrukcyjnych – stan aktualny oraz perspektywy technologiczne. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 237, 2008.
- Montrosom Ch., Wei T., Ye L., Graham C., Mai Y., Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review. International Journal of Fatigue 24, 1021-1036, 2002.
- 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, 1995.
- Peyre P., Fabbro R., Merrien P., Lieurade H., Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour. Materials Science and Engineering A210, 102-113, 1996.
- Peyre P., Scherpreel X., Berthe L., Carboni C., Fabbro R., Beranger G., Lieurade H., Surface modifications induced in 316L steel by laser peening and shot-penning. Influence on pitting corrosion resistance. Materials science and Engineering A280, 294-302, 2000.
- Podolak-Lejtas A., Modyfikacja warstwy wierzchniej zgniotem powierzchniowym elementów obrabianych elektroerozyjnie. Rozprawa doktorska. Warszawa, 2010.
- Radziejewska J., Laserowa modyfikacja właściwości warstwy wierzchniej wspomagana nagniataniem. Prace IPPT, ISBN 978-83-89687-70-8 Warszawa 2011.
- Świercz R., Oniszczuk D., Parametry i warunki obróbki determinujące proces EDM", Mechanik, Polski, 16-18, 0025-6552, 2014.