



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 2015 r.

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

## Badanie wybranych właściwości eksploatacyjnych po łącznej obróbce EDA i roto peen

### Examination of selected operating properties after combined treatment by EDA and roto peen

AGNIESZKA DMOWSKA\*  
ANNA PODOLAK - LEJTAS\*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.528

Artykuł prezentuje badania nad wybranymi właściwościami eksploatacyjnymi elementu po obróbce jego powierzchni łącznymi obróbkami: stopowaniem elektroiskrowym EDA oraz obróbką powierzchniową zgniotem typu roto peen. Badaniu zostały poddane: wytrzymałość zmęczeniowa, trwałość, a także odporność na zużycie ściernie, które zależą od stanu warstwy wierzchniej.

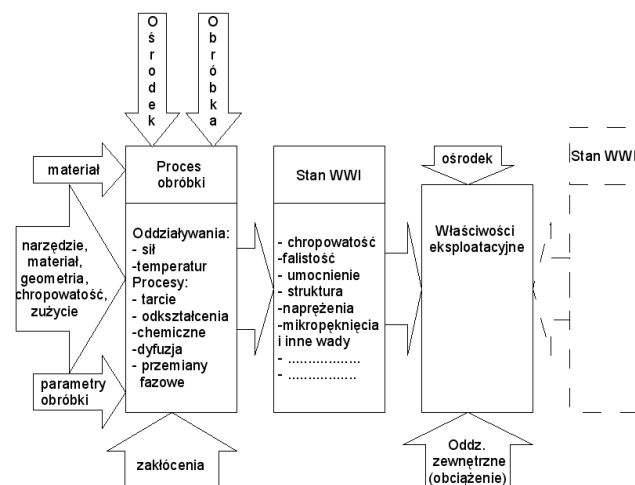
**SŁOWA KLUCZOWE:** stopowanie elektroiskrowe, obróbka elektroerozyjna, obróbka powierzchniowa zgniotem, roto peen, warstwa wierzchnia.

*The paper presents research over selected operating properties of the element after combined treatment of its surface by electro discharge alloying EDA and surface cold work treatment such as roto peen. The research have been: fatigue strength, durability, and wear resistance, which depends on the state of the surface layer*

**KEYWORDS:** electro-discharge alloying, electro-discharge machining, cold work surface treatment, roto peen, surface layer.

Właściwości użytkowe elementów maszyn między innymi, wytrzymałość zmęczeniowa, trwałość, odporność na zużycie ściernie zależą od stanu warstwy wierzchniej współpracujących elementów i warunków eksploatacji (rys. 1). Ponieważ badania eksploatacyjne są zwykle bardzo drogie a ich efekty odnoszą się tylko do konkretnego wyrobu więc w większości przypadków badaniom podlega stan warstwy wierzchniej, który zawiera bardziej uniwersalne informacje

w tym umożliwiające przewidywanie określonych właściwości eksploatacyjnych.



Rys. 1. Kształtowanie właściwości eksploatacyjnych elementów maszyn.

Badaniom podlegają zwykle tylko te cechy WW, które mają najsilniejsze potencjalne związki z analizowanymi właściwościami eksploatacyjnymi np. chropowatość, naprężenia i umocnienie WW w przypadku elementów pracujących zmęczeniowo.

Końcowy stan WW jest efektem skumulowanych oddziaływań procesów cieplnych, metalurgicznych i mechanicznych występujących w procesie wytwarzania oraz interakcji między tymi oddziaływaniami np. z przemianami strukturalnymi może być związane wydzielanie ciepła, odkształcenia mogą generować przemiany strukturalne itd. W każdym

\*mgr inż. Agnieszka Dmowska (agdmowska@meil.pw.edu.pl),

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

procesie obróbkowym występują dominujące procesy fizyczne determinujące konstituowanie stanu WW.

Warstwa wierzchnia po obróbce elektroerozyjnej (EDA), która powstaje wskutek lokalnych wyładowań iskrowych powodujących lokalne topnienie i parowanie metalu oraz szybkie chłodzenie roztopionego metalu i przyległej do niej warstwy charakteryzuje się obecnością przetopionej strefy o zmienionej mikrostrukturze z mikropęknięciami powstającymi podczas krzepnięcia mikrowarstw roztopionego metalu na zimnym podłożu, niekorzystnym stanem naprężeń oraz względnie wysoką chropowatością [3].

W procesach obróbki powierzchniowej zginiem (OPZ) dominują oddziaływania mechaniczne głównymi efektami których są: umocnienie, wzrost twardości i naprężenia ścisakające w WW [4, 5]. Jeżeli kolejna obróbka realizowana jest bez usuwania WW utworzonej w poprzedniej operacji np. jak to ma miejsce w przypadku obróbki powierzchniowej zginiem elementów uprzednio obrobionych EDA wówczas WW jest efektem skumulowanych oddziaływań obu tych procesów.

Obróbka stopowaniem elektroiskrowym umożliwia wytworzenie na przedmiocie obrabianym WW o grubości od kilku do kilkudziesięciu do około 200  $\mu\text{m}$  o zmienionych względem materiału bazowego właściwościach. Pozwala na wprowadzenie do WW elementu poddawanego stopowaniu pierwiastków stopowych lub stopów, co daje możliwość zmiany jej właściwości użytkowych bez konieczności stosowania na ten element kosztownych materiałów o podwyższonych właściwościach. Inne zalety tej obróbki to możliwość lokalnej obróbki powierzchni elementów o dużych gabarytach, jak również obróbki elementów o dowolnie skomplikowanych kształtach. Ten sposób obróbki niesie ze sobą również szereg wad mogących powodować ograniczenia w jej stosowaniu. Należą do nich: względnie wysoka chropowatość stopowanych powierzchni, jej niekorzystne cechy – duże pochylenia nierówności duży udział nierówności wyższych rzędów (subchropowatość), niekorzystny rozkład udziału nośnego i wierzchołków w funkcji zbliżenia itp.; niekorzystne rozciągające naprężenia WW oraz występowanie w nich mikropęknięć. Aby te niekorzystne cechy WW zniwelować zastosowano po stopowaniu elektroiskrowym obróbkę powierzchniową zginiem typu roto – peen.

W celu oceny efektów badań obróbki powierzchniowej zginiem metodą roto peen po stopowaniu elektroiskrowym analizowane były następujące charakterystyki WW:

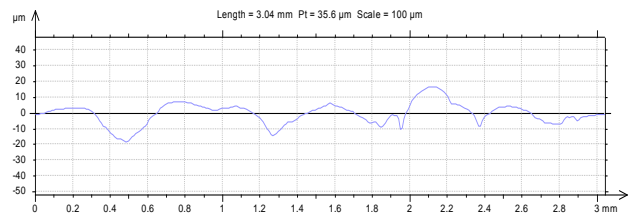
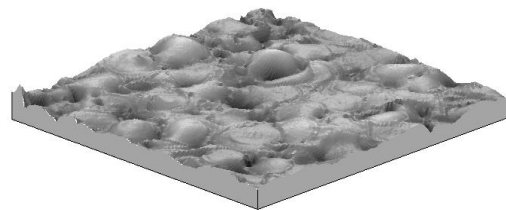
- struktury geometrycznej powierzchni (profil i 3D)
- rozkładu mikrotwardości w WW
- struktury WW i grubości warstwy przetopionej - Gwb

Badania realizowano przy użyciu urządzeń wykorzystywanych do obróbki EDM. Badania prowadzone były według schematu eksperymentu planowanego dwuczynnikowego, pięciopoziomowego na próbkach o wymiarach 25 x 25 x 6 mm hartowanych, ze stali konstrukcyjnej wyższej jakości ogólnego przeznaczenia C 45. Stopowanie odbywało się na centrum ROBFORM 30 z użyciem elektrod: 1H18N9 i wolframowej. Jako zmienne niezależne procesu przyjęto: natężenie prądu impulsu –  $I$  (od 16 do 64 A) i czas trwania impulsu  $T_i$  w zakresie od 25 do 3200  $\mu\text{s}$ , stałą wartością było natomiast napięcie  $U$  ustawione na poziomie 200 V.

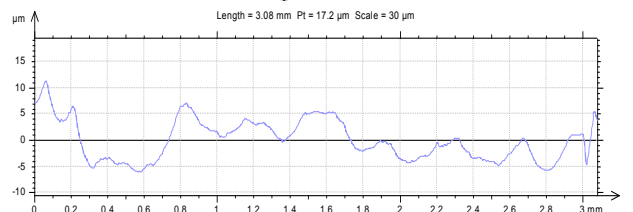
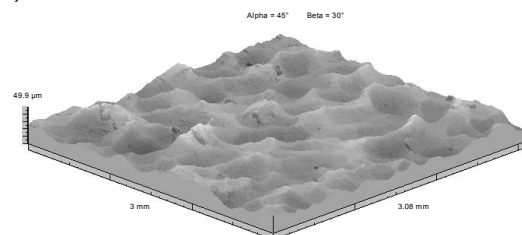
Do badań nad obróbką łączną stopowaniem elektroiskrowym z obróbką powierzchniową zginiem, stosowano parametry, dla których stopowanie elektroiskrowego pozwala na uzyskanie równomiernej warstwy stopowanej o dobrej chropowatości, takie rezultaty uzyskano dla parametrów:

$I = 24 \text{ A}$ ,  $T_i = 400 \mu\text{s}$ . lub zapewnienia uzyskanie warstwy stopowanej o największej grubości ( $I = 32 \text{ A}$ ,  $T_i = 3200 \mu\text{s}$ ). Parametry obróbki EDA zostały dobrane tak aby uzyskać różne wysokości chropowatości jak i różne grubości warstw wierzchnich, z kolei parametry roto peen miał zapewnić różne głębokości zginiem, (co najmniej równe głębokości warstwy przetopionej) i naprężeń w WW (głębokość zalegania naprężeń ścisakających powinna być większa od głębokości zalegania naprężeń w WW po EDA). Optymalną ze względu na niewystępowanie negatywnych skutków tj. mikropęknięć lub łuszczenia WW prędkością obrotową narzędzia do obróbki roto – peen po stopowaniu elektroerozyjnym jest  $n = 4100 \text{ obr/min}$ . Czas trwania obróbki wynosił odpowiednio:  $t_1 = 75 \text{ s}$  i  $t_2 = 150 \text{ s}$ .

a)



b)



Rys. 2. Mikrosterometria i profilografy powierzchni wykonane profilometrem skaningowym powierzchni obrabianych: a) EDA:  $U = 200 \text{ V}$ ,  $I = 24 \text{ A}$ ,  $T_i = 400 \mu\text{s}$ , b) EDA:  $U = 200 \text{ V}$ ,  $I = 24 \text{ A}$ ,  $T_i = 400 \mu\text{s}$  z zastosowaniem obróbki powierzchniowej zginiem roto – peen przy następujących parametrach:  $n = 4100 \text{ obr/min}$ ,  $t = 75 \text{ s}$

Analiza wyników badań mikrosterometrii powierzchni, ich profilografów i uzyskanych danych liczbowych pozwala na stwierdzenie, iż zastosowanie obróbki roto – peen po stopowaniu elektroiskrowym:

- obniża chropowatość powierzchni ( $R_a$ ) po roto peen od 3 do 5 razy w stosunku do samego EDA,
- chropowatość po roto – peen ma znacznie łagodniejszy charakter niż po samym EDA tj. mniejsze o 3 – 6 razy pochylenia profilu,
- chropowatość powierzchni po EDA nie jest tak znacząco obniżona, jak ma to miejsce w przypadku zastosowania tej metody obróbki po ob-

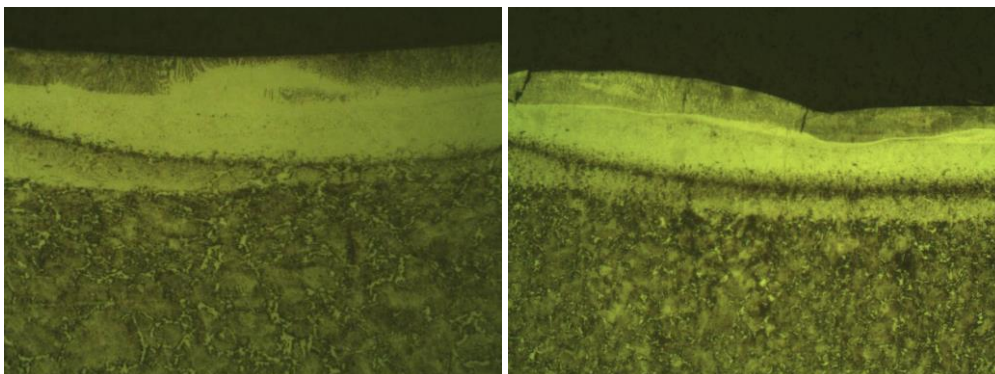
róbce EDM – w przypadku EDA zastosowanie wysokich parametrów obróbki jest ograniczone przez możliwość łuszczenia i odwarstwień WW, czas obróbki wpływa na obniżenie wysokości chropowatości, jednak jest również ograniczony przez możliwość pojawienia się łuszczenia powierzchni.

- czas obróbki wpływa na obniżenie wysokości chropowatości, jednak jest również ograniczony przez możliwość pojawienia się łuszczenia powierzchni.

Tabela 2. Zestawienie pomiarów parametrów chropowatości próbek stopowanych elektroiskrowo, a także stopowanych elektroiskrowo i następnie obrobionych powierzchniowo zgniotem obróbką typu roto peen.

EDA – rodzaj elektrody i parametry	roto peen obr/min	czas [s]	Ra	Rt	Rdq	Rsm
1H18N9 10P (I=24, Ti=400, U=200)			8,17	43,5	12,86	614,8
1H18N9 10P (I=24, Ti=400, U=200)	4100	75	5,03	29,23	8,98	604,2
1H18N9 10P (I=24, Ti=400, U=200)	4100	150	4,02	20,93	3,87	877,3
1H18N9 11P (I=32, Ti=3200, U=200)			9,22	76,1	16,28	529
1H18N9 11P (I=32, Ti=3200, U=200)	4100	75	5,51	61,37	12,73	785,8
1H18N9 11P (I=32, Ti=3200, U=200)	4100	150	2,18	15,96	2,56	714,1

Kolejnym etapem były badania mikrostruktur próbek poddanych wcześniej badaniom mikrostereometrii. Szczegółnej ocenie podlegała obecność w stopowanej oraz stopowanej a następnie obrobionej roto – peen warstwie nieciągłości i mikropęknięć oraz rozkład mikrotwardości WW.

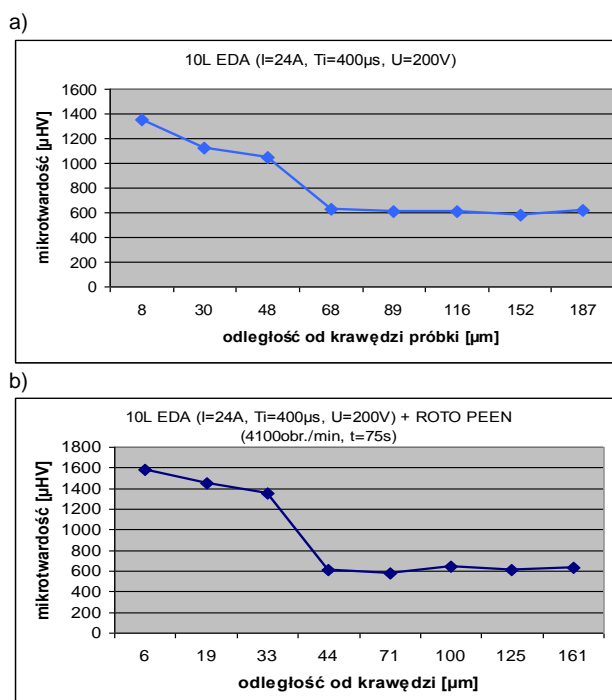


Rys. 3. Mikrostruktura WW po: a) EDA – I = 24 A, Ti = 400 μs, elektroda 1H18N9, b) EDA: I = 24 A, Ti = 400 μs, elektroda 1H18N9 oraz roto peen: 4100obr/min t = 75s

Analiza wyników badań mikrotwardości WW elementów obrabianych EDA (I = 24 A, Ti = 400 μs) oraz EDA i następnie roto peen (n = 4100 obr/min, t<sub>1</sub> = 75 s, t<sub>2</sub> = 150 s) wykazała że mikrotwardość WW po zastosowaniu obróbki roto peen wzrasta o około 200 jednostek. Podobny efekt uzyskano również dla WW po stopowaniu z wyższymi parametrami EDA i obróbce roto peen. Wyniki te są powtarzalne i podobne dla wszystkich przypadków. Zastosowanie obróbki roto peen po stopowaniu zwiększa mikrotwardość WW i likwiduje w niej mikropęknięcia, warstwa wierzchnia staje się bardziej jednolita.

Naprężenia w WW są jedną z głównych cech WW, decydujących o wytrzymałości zmęczeniowej oraz szeregu innych właściwości użytkowych elementów maszyn.

W literaturze opisanych jest kilka metod badań naprężeń w WW. Do badań naprężeń WW stosowano opracowaną w Instytucie Technik Wytwarzania metodę, w której zamiast trawienia próbek wykorzystano proces docierania jako metodę sukcesywnego usuwania warstwy wierzchniej a ocena



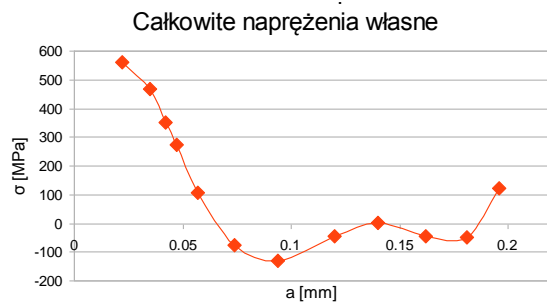
Rys. 4. Wykres mikrotwardości w funkcji odległości od powierzchni: a) EDA: I = 24 A, Ti = 400 μs, U = 200 V, b) EDA: I = 24 A, Ti = 400 μs, U = 200 V oraz następnie ROTO – PEEN: n = 4100 obr./min t<sub>1</sub> = 75 s

rozkładu naprężeń WW oparta jest na wynikach pomiarów grubości usuwanej warstwy wierzchniej oraz strzałki ugięcia próbki [1,2]. Celem badań było określenie wartości maksymalnych naprężeń w WW, głębokości ich zalegania i rozkładu naprężeń w funkcji odległości od powierzchni  $\sigma = f(a)$ .

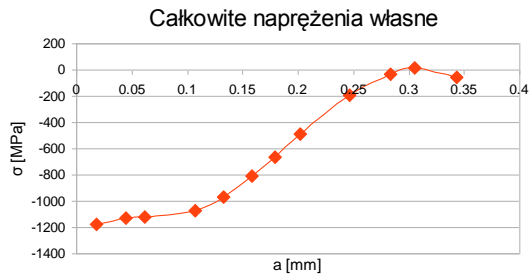
Badania naprężeń WW w próbkach po stopowaniu elektroiskrowym EDA oraz EDA i obróbce powierzchniowej zgniotem typu roto-peen wykonano dla ośmiu wariantów technologicznych. Przykładowe rozkłady naprężeń w WW w funkcji głębokości ich zalegania zilustrowane są na rysunkach przedstawionych poniżej (rys. 5, 6).

Próbki do badań naprężeń obrabiane były przy następujących parametrach: EDA: - I = 64 A, Ti = 25 μs, natomiast po łącznej obróbce EDA: - I = 64 A, Ti = 25 μs, roto – peen: n = 4100 obr/min, t = 2,5 min/cm<sup>2</sup>.

Wyniki badań naprężeń WW otrzymane po obróbce EDA oraz po sekwencji obróbek EDA, roto – peen charakteryzują się wysoką powtarzalnością. Typową wartością maksymalną naprężeń uzyskiwaną po obróbce roto – peen jest zakres  $\sigma = -1200$  do 600 MPa. Naprężenia te zalegają na głębokości od 0,3 do 0,4 mm. W przypadku obróbki EDA maksymalne wartości naprężeń sięgają wartości  $\sigma = -600$  MPa, a zalegają do głębokości 60 μm natomiast po sekwencji obróbek EDA oraz roto peen  $\sigma = -1200 \div -1500$  MPa.



Rys. 5. Rozkład naprężeń w WW w próbkach po stopowaniu elektroiskrowym EDA:  $I = 64$  A,  $T_i = 5$   $\mu$ s.



Rys. 6. Rozkład naprężeń w WW w próbkach po stopowaniu elektroiskrowym EDA:  $I = 64$  A,  $T_i = 25$   $\mu$ s, oraz po EDA i roto – peen –  $n = 4100$  obr/min,  $t = 150$  s.

## Podsumowanie

W wyniku zastosowania po obróbce EDA obróbki powierzchniowej zgniotem typu roto peen możliwe jest uzyskanie korzystnych zmian struktury metalograficznej WW, wygładzenia powierzchni, wprowadzenie w WW naprężeń ściskających oraz minimalizację mikropęknięć a co za tym idzie poprawienie właściwości eksploatacyjnych obrabianych elementów.

## LITERATURA

1. Arasimowicz A.: Pomiar naprężeń własnych w technologicznych warstwach wierzchnich, *Zeszyty naukowe. Szkoła Naukowa Obróbka Erozyjnych*, z. nr 13, Warszawa 2007, 111-118.
2. Arasimowicz A., Nowicki B.: Nowy sposób pomiaru naprężeń własnych metodą usuwania warstw w niejednorodnych warstwach wierzchnich, *Inżynieria maszyn, R. 12, z. 2-3, Obróbka erozyjna; teoria i eksperyment*, str. 5-14, Wrocław 2009..
3. Miernikiewicz A.: Doświadczalno - teoretyczne podstawy obróbki elektroerozyjne (EDM), *Monografia 274, Kraków, 2000.*
4. Nakonieczny A.: Dynamiczna powierzchniowa obróbka plastyczna kulowanie shot peeling, *Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa 2002.*
5. Przybylski W.: Technologia obróbki nagniataniem, *Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 1987*