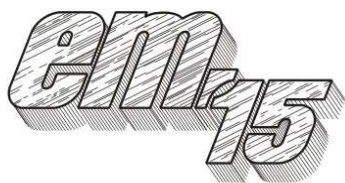


XII Międzynarodowa Konferencja - Electromachining 2015



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

Struktura metalograficzna po obróbce EDM stali HTCS 150

Surface layers of HTCS 150 steel after EDM

RAFAŁ ŚWIERCZ¹
DOROTA ONISZCZUK – ŚWIERCZ²
LUCJAN DĄBROWSKI³

W artykule przedstawiono analizę struktury metalograficznej po obróbce elektroerozyjnej stali HTCS 150. Określono wpływ parametrów obróbki tj. natężenia prądu wyładowania I , oraz czasu impulsu t_{on} na wybrane składowe warstwy wierzchnie stali HTCS 150.

SŁOWA KLUCZOWE: EDM, struktura metalograficzna, HTCS 150.

This paper presents an analysis of surface layers properties after EDM steel HTCS 150. Experimental studies were conducted, determined the influence of parameters: discharge current I and the pulse time t_{on} on selected components of the surface layers steel HTCS 150.

KEYWORDS: EDM, surface layers, HTCS 150.

Wstęp

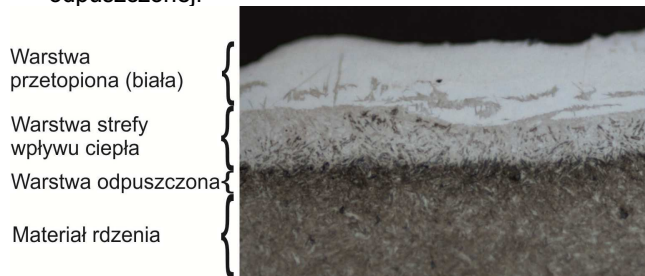
Adaptacja obróbki elektroerozyjnej w różnych gałęziach przemysłu wymaga odpowiedniego sterowania parametrami obróbki w celu uzyskania oczekiwanej dokładności wymiarowo kształtowej oraz jakości obrobionych powierzchni. Końcowy stan warstwy wierzchniej wpływa bezpośrednio między innymi na trwałość wykonanych elementów. Poszukiwane są rozwiązania zaimplementowane w EDM zapewniające odpowiednią chropowatość powierzchni, grubość warstw zmienionych tak, aby ograniczyć do niezbędnego minimum udział dodatkowych obróbek wykończeniowych w produkcji poszczególnych części.

Usuwanie materiału w procesie EDM związane jest z oddziaływaniem energii cieplnej wyładowania elektrycznego.

Proces elektroerozji polega na usunięciu materiału z przedmiotu obrabianego w wyniku wyładowań elektrycznych zachodzących pomiędzy elektrodą roboczą a powierzchnią przedmiotu obrabianego. Elektroda i materiał obrabiany podłączone są do generatora impulsów elektrycznych. Mechanizm usuwania materiału w procesie elektroerozji jest w głównej mierze wynikiem oddziaływania cieplnego wyładowania elektrycznego w wyniku, którego następuje lokalny wzrost temperatury (rzędu od 8 000 – 12 000°C) prowadzący do topnienia i parowania w lokalnych warstwach powierzchniowych zarówno powierzchni przedmiotu obrabianego jak i elektrody roboczej [4, 6].

W wyniku oddziaływania procesów termicznych obróbki elektroerozyjnej w strukturze metalograficznej następują przemiany prowadzące do powstania trzech charakterystycznych warstw (rys. 2) [2]:

- przetopionej zwanej potocznie warstwą białą,
- strefy wpływu ciepła,
- odpuszczonej.



Rys. 2. Struktura metalograficzna stali WNL po obróbce elektroerozyjnej

Badania przeprowadzone przez G. Cussanelli [1] dotyczące mikrostruktury WW wykazują, że warstwa przetopiona powstaje w wyniku krzepnięcia na powierzchni uprzednio roztopionego materiału obrabianego. Nowo powstała struktura charakteryzuje się wysoką twardością, spójnością z rdzeniem, i odpornością na korozję. Warstwa przetopiona

¹dr inż. Rafał Świercz (rsw@meil.pw.edu.pl)

²dr inż. Dorota Oniszczyk-Świercz (doo@meil.pw.edu.pl)

³dr hab. inż. Lucjan Dąbrowski (ld@meil.pw.edu.pl)

składa się z kilku podwarstw. Obserwacje na mikroskopach SEM i TEM wykazały występowanie struktur kolumnowych i dendrytycznych (dla próbek po obróbce zgrubnej). Kierunek rozprzestrzeniania się struktur (prostopały do materiału rdzenia) jest wynikiem szybkiego chłodzenia tych stref (około 10^6 K/s) [1]. Struktury dendrytyczne występują pomiędzy strukturami kolumnowymi.

Występowanie struktur kolumnowych i dendrytycznych wskazuje, że kierunek krzepnięcia materiału rozpoczyna się od brzegów warstwy wierzchniej. Charakter powstałych struktur jest wynikiem różnic w procesie chłodzenia warstwy przetopionej. W miejscach gdzie roztopiony materiał ma bezpośredni kontakt z dielektrykiem występuje konwekcja ciepła. Na granicy warstwy przetopionej z rdzeniem (materiałem rodzimym) ciepło odprowadzane jest również w wyniku konwekcji i kondukcji. Wymiary otrzymanych struktur kolumnowych i dendrytycznych są odwrotnie proporcjonalne do szybkości chłodzenia. Wraz ze wzrostem szybkości chłodzenia maleją wymiary struktur kolumnowych. Istotnym czynnikiem jest również grubość poszczególnych warstw. Dla parametrów odpowiadających obróbce wykończeniowej, utworzona warstwa biała o grubości ok. 3 μm nie posiada w swojej budowie struktur dendrytycznych [1]. Pod warstwą białą znajduje się warstwa strefy wpływów ciepła (HAZ). Zbudowana jest ona z martenzytu listkowego. Grubość warstwy HAZ wynika bezpośrednio z zastosowanych parametrów obróbki. W sąsiedztwie warstwy białej występuje strefa austenitu cząstkowego, o zmiennej grubości od 0,5 do 5 μm (zależnej od zastosowanych parametrów obróbki). Grubość poszczególnych warstw zależy zarówno od rodzaju materiału obrabianego (jego przewodności cieplnej) jak również zastosowanych parametrów obróbki [2, 6].

Usuwanie materiału w procesie EDM związane jest z oddziaływaniem energii cieplnej wyładowania elektrycznego. Wywołuje ona zarówno przemiany struktury metalograficznej jak również prowadzi do powstawania typowych jej defektów – mikropęknięć. Robello [11] wykazał, że mikropęknięcia w WWV mają charakter promieniowy i w większości przypadków występują na wypływe krateru wyładowania, omijając jego rdzeń. Gęstość oraz głębokość mikropęknięć wzrasta wraz ze wzrostem energii wyładowania. Lim [8] poszukiwał korelacji między obróbką stali narzędziowej o różnej przewodności cieplnej na stan struktury metalograficznej (SM) i fizycznej warstwy wierzchniej. Wykazał, że głównym czynnikiem wpływającym na stan SM w WWV jest energia impulsu, przy czym przewodność cieplna materiału istotnie wpływa na liczbę zaobserwowanych mikropęknięć. Wraz ze wzrostem przewodności cieplnej zmniejsza się liczba mikropęknięć. Uzyskane rezultaty potwierdziły badania Lee [7]. Wykazał on ponadto, że nie występuje zależność liniowa pomiędzy energią wyładowania a liczbą zaobserwowanych mikropęknięć. W przeprowadzonych badaniach największą liczbę mikropęknięć uzyskał dla najmniejszego natężenia prądu i najdłuższego czasu impulsu. Eliminacja niekorzystnych cech warstwy wierzchniej materiałów po obróbce EDM prowadzona jest wielokierunkowo i obejmuje min: stopowanie elektroerozyjne Electrical Discharge Alloying (EDA) [9], Brush Electrodischarge Mechanical Alloying (BEDMA) [12], zastosowanie proszków w dielektryku [5], modyfikację powierzchni wiązką lasera [10] czy też wykorzystanie dodatkowych obróbek mechanicznych min: ściernych.

Cel badań

Celem badań doświadczalnych jest poznanie wpływu parametrów obróbki elektroerozyjnej tj. natężenia prądu wyładowania I , oraz czasu impulsu t_{on} , na zmiany zachodzące

w strukturze metalograficznej stali HTCS 150. Materiał ten charakteryzuje się wysoką przewodnością cieplną 66 W/mK oraz wysoką wytrzymałością na dynamiczną zmianę obciążenia. W warunkach produkcyjnych znajduje szerokie zastosowanie na formy wtryskowe, formy odlewnicze, matryce kuźnicze do pracy na gorąco. Charakterystyczne dla procesu EDM przemiany fazowe zaobserwowane w strukturze materiału, wynikające z oddziaływania lokalnych gwałtownych procesów termicznych, mogą mieć odmienne cechy w stosunku do dotychczasowo badanych materiałów biorąc pod uwagę zarówno występowanie jak i grubość poszczególnych warstw: przetopionej, zahartowanej i odpuszczonej, oraz charakterystycznych defektów mikrostruktury WWV - mikropęknięć.

Metodyka badań

Badania doświadczalne procesu drażenia elektroerozyjnego prowadzono na obrabiarce Charmilles Form 2LC ZNC. Poddano obróbce EDM szlifowane próbki o wymiarach 12 x 12 mm stali HTCS 150, elektrodą grafitową POCO EDM3. Na podstawie przeprowadzonych badań własnych obróbki elektroerozyjnej stali WNL [2] stwierdzono, iż głównymi parametrami (możliwymi do płynnej regulacji na badanej obrabiarce) wpływającymi na stan warstwy wierzchniej jest amplituda natężenia prądu I , oraz czas impulsu t_{on} . Badania przeprowadzono według planu ortogonalnego dwupoziomowo gwiazdowego. Przeprowadzone badania wstępne pozwoliły na wyznaczenie stabilnych zakresów zmienności badanych parametrów (monitorowano stabilność wyładowań elektrycznych).

Warunki badań:

- polaryzacja prosta,
- dielektryk: nafta,
- napięcie wyładowania $U = 25$ V,
- głębokość drażenia: 0,2 mm.
- zmienne niezależne monitorowane i rejestrowane w trakcie procesu: amplituda natężenia prądu I w impulsie w zakresie: 3 – 24 A, czas impulsu t_{on} w zakresie: 50 – 250 μs , czas przerwy między impulsami t_{off} , przyjęto jako współczynnik wypełnienia impulsu $\sigma = 0,7$.

$$\sigma = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = 0,7 \quad (1)$$

gdzie: t_{on} – czas impulsu, t_{off} – czas przerwy między kolejnymi impulsami.

W tabeli 1 przedstawiono poszczególne wartości zmienionych niezależnych użytych w eksperymencie planowanym.

Tabela 1. Planowany eksperyment

Lp.	Parametry obróbki			
	I [A]		t_{on} [μs]	
1.	-1	6	-1	80
2.	-1	21	1	80
3.	1	6	-1	221
4.	1	21	1	221
5.	-1,41	14	0	50
6.	1,41	14	0	250
7.	0	3	-1,41	150
8.	0	24	1,41	150
9.	0	14	0,	150
10.	0	14	0,	150

Obrobione elektroerozyjnie próbki zainkludowano w żywicę i poddano szlifowaniu a następnie polerowaniu. Dokonano trawienia chemicznego nitaliem 5% w celu ujawnienia mikrostruktury materiału. Badania struktury metalograficznej powierzchni realizowano przy użyciu mikroskopu optycznego NIKON Eclipse LV 150 sprzężonego z komputerowym analizatorem obrazu NIS-Elements BR 3.0.

Struktura metalograficzna

Procesy cieplne, chemiczne i mechaniczne występujące podczas wyładowań elektrycznych powodują tworzenie specyficznej struktury geometrycznej powierzchni obrabianych elementów jak również determinują zmiany zachodzące w ich strukturze metalograficznej. Na podstawie analizy zglądów metalograficznych powierzchni stwierdzono występowanie charakterystycznych warstw (rys. 4):

- zewnętrznej przetopionej (zwanej potocznie warstwą białą o obniżonej twardości w stosunku do materiału rdzenia),
- strefy wpływów cieplnych, jest ona widoczna w postaci jasnej struktury położonej bezpośrednio pod warstwą przetopioną, warstwa ta posiada elementy struktury ukierunkowane wzdłuż kierunku odprowadzania ciepła (prostopadle do obrabianej powierzchni),
- odpuszczonej, występującej w postaci ciemnej smugi.



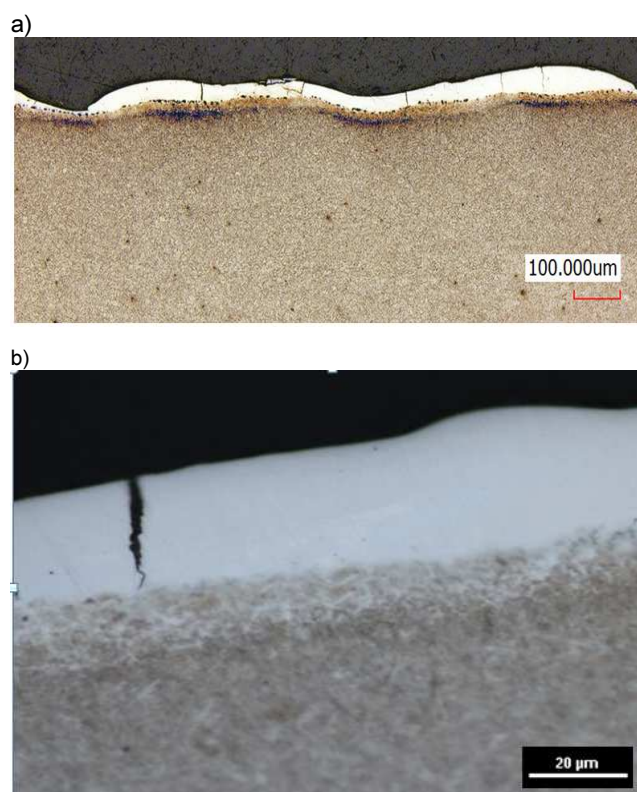
Rys. 4. Struktura metalograficzna po obróbce EDM stali HTCS

Warstwa przetopiona charakteryzuje się dużą zmiennością grubości (od 6 μm do 32 μm ,) dla zastosowanych odpowiednio najmniejszych i najwyższych wartości amplitudy natężenia prądu I . Wzrostowi ilości erodowanego materiału odpowiada wzrost głębokości kraterów wyładowań, w których nierównomiernie, ponownie zakrzepł roztopiony materiał. Zaobserwowano nieciągłości warstwy przetopionej przy wzroście natężenia prądu, wynikające ze wzrostu ilości erodowanego materiału w pojedynczym impulsie.

Pod warstwą białą znajduje się strefa wpływów ciepła, o podwyższonej twardości w stosunku do materiału rdzenia. Pod warwą strefy wpływu ciepła znajduje się strefa odpuszczona. Warstwa odpuszczona powstaje w skutek oddziaływania energii cieplnej wyładowania elektrycznego (ogrzania tej strefy materiału) a następnie chłodzenia przez odprowadzanie ciepła do materiału rodzimego. Występowanie poszczególnych warstw zaobserwowano dla wszystkich próbek.

Podczas obróbki wyładowania elektryczne prowadzą do lokalnych procesów topnienia, odparowania materiału, usunięcia produktów obróbki i szybkiego ponownego krzepnięcia nieusuniętej części roztopionego metalu. Opisane procesy przebiegają w sposób gwałtowny i prowadzą do generowania typowych defektów mikrostruktury materia-

łu, jakimi są mikropęknięcia. Przyczyną ich powstania są naprężenia cieplne, wytworzone na skutek oddziaływań efektów termicznych wyładowania elektrycznego. Roztopiony materiał jest „wyrzucany” z kanału plazmowego, przy czym pozostaje cienka warstwa roztopionego metalu na powierzchni rdzenia materiału o znacznie niższej temperaturze. W wyniku chłodzenia i krzepnięcia roztopionej warstwy powstaje skurcz, któremu przeciwdziała materiał rdzenia, a w konsekwencji generowane są naprężenia rozciągające. Przekroczenie dopuszczalnej wytrzymałości na rozciąganie materiału, jest zatem podstawą tworzenia mikropęknięć. Mikropęknięcia są efektem niepożądanym, powodującym min.: zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej oraz odporności na korozję. Na podstawie analizy obrazów struktury metalograficznej powierzchni po EDM, stwierdzono, że mikropęknięcia pojawiają się na powierzchni krateru powstałego w wyniku wyładowania elektrycznego i skierowane są zazwyczaj prostopadle do powierzchni materiału. Mikropęknięcia w większości przypadków propagują do końca warstwy białej (rys. 5).



Rys. 5. Mikropęknięcia w warstwie białej dla parametrów obróbki a) $I = 24 \text{ A}$, $t_{\text{on}} = 150 \mu\text{s}$, $U = 25 \text{ V}$, b) $I = 14 \text{ A}$, $t_{\text{on}} = 250 \mu\text{s}$, $U = 25 \text{ V}$,

Dodatkowo oprócz prób drążenia realizowanych w ramach eksperymentu planowanego dokonano obróbki sekwencyjnej w celu uzyskania struktury metalograficznej powierzchni typowej dla procesów produkcyjnych, w których występuje podział obróbki na zgrubną, wykańczającą i wglądającą.

Przyjęto następujące parametry obróbki:

1. $I = 24 \text{ A}$, $t_{\text{on}} = 150 \mu\text{s}$, $U = 25 \text{ V}$, głębokość drążenia 0,1 mm,
2. $I = 14 \text{ A}$, $t_{\text{on}} = 80 \mu\text{s}$, $U = 25 \text{ V}$, głębokość drążenia 0,05 mm,
3. $I = 3 \text{ A}$, $t_{\text{on}} = 150 \mu\text{s}$, $U = 25 \text{ V}$, głębokość drążenia 0,05 mm.

Dokonano analizy porównawczej fotografii zdjęć zglądów metalograficznych (rys. 6) dla próbek obrabianej sekwencyjnie oraz dla próbki nr 7 z eksperymentu planowanego ze

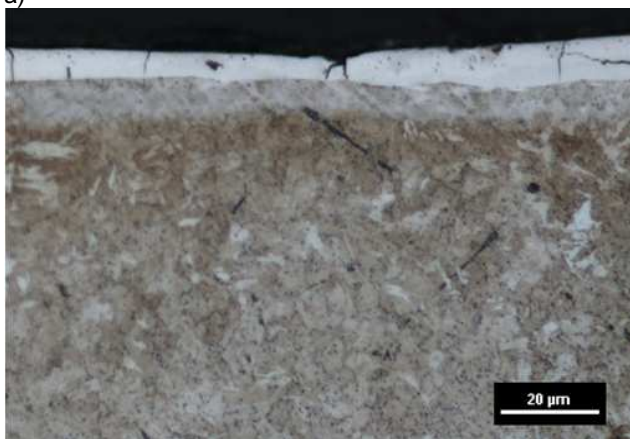
stali WNL, dla której użyto tych samych wartości parametrów obróbki tj. $I = 3 \text{ A}$, $t_{on} = 150 \text{ }\mu\text{s}$, $U = 25 \text{ V}$.

Dla przeprowadzonej obróbki sekwencyjnej uzyskano końcowo średnią grubość warstwy białej (G_{wb}) odpowiadającą średniej grubości warstwy uzyskanej dla próbki nr 7, która wynosi $G_{wb} = 6 \text{ }\mu\text{m}$. Również średnia grubość warstwy strefy wpływu ciepła (G_{swc}) dla obu próbek jest tożsama i wynosi $G_{swc} = 6 \text{ }\mu\text{m}$. Istotną różnicę uzyskano natomiast w grubości strefy odpuszczonej. Próbka obrabiana sekwencyjnie posiada dwukrotnie większą grubość warstwy odpuszczonej (G_{wo}), która wynosi około $G_{wo} = 20 \text{ }\mu\text{m}$. Oddziaływanie strumienia ciepła dla próbki obrabianej sekwencyjnie (dla przyjętych naddatków obróbkowych) pozostawia zmiany w grubości warstwy odpuszczonej.

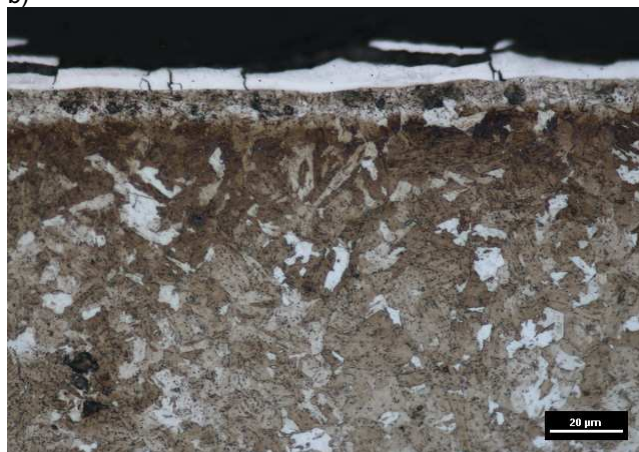
W celu porównania wpływu przewodnictwa cieplnego materiału na grubość uzyskiwanych warstw poddano obróbce elektroerozyjnej próbkę ze stali narzędziowej stopowej WNL (1.2713 – przewodność cieplna 34.5 W/mK) obrabianej cieplnie do twardości 50 HRC. Warunki i parametry obróbki odpowiadały próbie 7, realizowanej w ramach eksperymentu planowanego.

Analiza porównawcza zdjęć zglądów (rys. 6, rys. 7) wykazuje, iż dla stali WNL uzyskano większą około 2 krotnie grubość zarówno warstwy przetopionej $G_{wb} = 11 \text{ }\mu\text{m}$ jak i strefy wpływu ciepła $G_{swc} = 11 \text{ }\mu\text{m}$. Natomiast grubość warstwy odpuszczonej wynosi około $G_{wo} = 6 \text{ }\mu\text{m}$. Odmienne grubości zarówno warstwy białej jak i warstwy strefy wpływu ciepła dla badanych materiałów świadczą, iż przewodność cieplna ma istotny wpływ na zmiany zachodzące w jego strukturze. Dwukrotnie większa przewodność stali HTCS 150 (66 W/mK), względem stali WNL (34.5 W/mK) istotnie wpływa na rozprzestrzenianie się strumienia ciepła w materiale. Dla stali HTCS 150 mniejsza część energii prowadzi do topienia i odparowania materiału, a w wyniku kondukcji przekazywana jest w głąb materiału. Skutkiem tego jest min. zmniejszenie grubości warstwy przetopionej, zahartowanej oraz wzrost grubości warstwy odpuszczonej w porównaniu do stali WNL.

a)



b)



Rys. 6. Struktura metalograficzna stali HTCS a) pojedyncza obróbka ($I = 3 \text{ A}$, $t_{on} = 150 \text{ }\mu\text{s}$, $U = 25 \text{ V}$), b) obróbka sekwencyjna



Rys. 7. Struktura metalograficzna stali WNL ($I = 3 \text{ A}$, $t_{on} = 150 \text{ }\mu\text{s}$, $U = 25 \text{ V}$)

Podsumowanie

Przeprowadzone badania doświadczalne wykazały, iż w strukturze materiału zachodzą zmiany w wyniku oddziaływania gwałtownych lokalnych procesów termicznych. Nowo powstała struktura metalograficzna jest charakterystyczna dla badanego procesu usuwania materiału, a grubość poszczególnych warstw jest uzależniona od parametrów obróbki, które definiują ilość energii przekazywanej do materiału.

Przeprowadzone badania dowodzą, iż przewodność cieplna materiału istotnie wpływa na rozprzestrzenianie się strumienia ciepła w materiale, powodując istotne różnice w grubości analizowanych warstw struktury metalograficznej materiału. Defekty mikrostruktury (mikropęknięcia) zaobserwowano na wszystkich analizowanych zglądach.

LITERATURA:

1. Cusanelli G., Hessler – Wyser A. Bobard F., Demellayer R., Perez R., Flükiger R.: *Microstructure at submicron scale of the white layer produced by EDM technique*, Journal of Materials Processing Technology, 149, 289 – 295, 2004.
2. Dąbrowski L., Świercz R.: *Struktura metalograficzna powierzchni po obróbce elektroerozyjnej*, Inżynieria Maszyn, Wydawnictwo Wrocławskiej Rady FSNT NOT, 3, 16 – 23, 2011.
3. Gostimirovic M., Kovac P., Sekulic M., Skoric B.: *Influence of discharge energy on machining characteristics in EDM*, Journal of Mechanical Science and Technology, 26, 1, 173 – 179, 2012.
4. Ho K. H., Newman S. T.: *State of the art electrical discharge machining (EDM)*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43, 13, 1287 - 1300, 2003.

5. Kozak J., Rozenek M., Dabrowski L.: *Electrical Discharge Machining in Dielectric – Powder Media*, International Journal for Manufacture Science and Technology, 4, 54 – 60, 2002.
6. Kunieda M., Lauwers B., Rajurkar K. P., Schumacher B. M.: *Advancing EDM through fundamental insight into process*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 54, 2, 64 – 87, 2005.
7. Lee H. T., Tai T. Y.: Relationship between EDM parameters and surface crack formation, Journal of Materials Processing Technology, 142, 3, 676 – 683, 2003.
8. Lim L. C., Lee L. C., Wong Y. S., Lu H. H.: Solidification microstructure of electrodischarge machined of tool steels, Materials Science and Technology, 7, 239 – 248, 2001.
9. Nowicki B., Dmowska A., Podolak-Lejtas A.: Surface Layer Properties after Successive EDM or EDA and Then Superficial Roto – Peen Machining, Hindawi Publishing Corporation Advances in Tribology, 2012.
10. Radziejewska J., Skrzypek S.J., Microstructure and residual stresses in surface layer of simultaneously laser alloyed and burnished steel, Journal of Materials Processing Technology, 209, 4, 2047–2056, 2009.
11. Rebelo C., Kornmeier M., Batista A. C., Dias A. M.: Residual stress after EDM – FEM study and measurement results, Materials Science Forum, 159 – 164, 2002.
12. Spadło S., Kozak J., Młynarczyk P.: *Mathematical modeling of the electrical discharge mechanical alloying process*, The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM), 6, 423 – 427, 2013.