

Magdalena NIEMCZEWSKA-WÓJCIK*

STRUKTURA GEOMETRYCZNA POWIERZCHNI UKONSTYTUOWANA W PROCESIE OBRÓBKI ELEKTROEROZYJNEJ

SURFACE GEOMETRIC STRUCTURE CREATED BY THE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING PROCESS

Słowa kluczowe:

obróbka elektroerozyjna EDM, struktura geometryczna powierzchni, jakość technologiczna

Key words:

electrical discharge machining (EDM), surface geometric structure, technological quality

Streszczenie

Obróbka elektroerozyjna, należąca do tzw. niekonwencjonalnych metod obróbki materiałów, znalazła szerokie zastosowanie w kształtowaniu elementów wykonanych z materiałów trudnoskrawalnych oraz o złożonej geometrii. W pracy przedstawiono ogólną charakterystykę obróbki elektroerozyjnej. Analizie (ilościowej i jakościowej) poddano wyniki badań

* Politechnika Krakowska, Katedra Inżynierii Procesów Produkcyjnych,
mnw.kipp@gmail.com

(mikroskop optyczny, elektronowy mikroskop skaningowy, profilometr) struktury geometrycznej powierzchni ukonstytuowanej w procesie obróbki elektroerozyjnej. Stwierdzono istotny wpływ parametrów obróbki na ukształtowanie powierzchni oraz jej jakość technologiczną.

WPROWADZENIE

Wytwarzanie elementów maszyn i narzędzi z materiałów trudnoskrawalnych oraz o skomplikowanych kształtach przekracza możliwości konwencjonalnych metod obróbki.

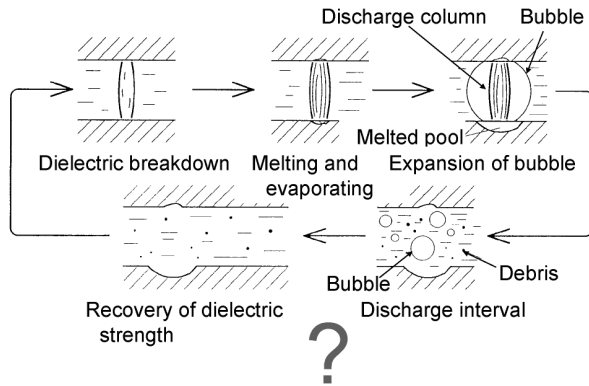
W wielu ośrodkach badawczych o zasięgu krajowym i międzynarodowym prowadzone są prace nad tzw. niekonwencjonalnymi metodami wytwarzania, do których zaliczana jest obróbka erozyjna. W zależności od rodzaju wykorzystanej energii (sposobu usuwania naddatku obróbkowego) obróbkę erozyjną dzieli się na [L. 3, 6]: obróbkę elektroerozyjną, obróbkę elektrochemiczną oraz obróbkę strumieniowo-erozyjną.

Wynikiem procesu obróbki, niezależnie od jej rodzaju, jest ukonstytuowana struktura geometryczna, której analiza jest niezbędna do oceny jakości technologicznej powierzchni wytworzonych elementów.

Obróbka elektroerozyjna (EDM)

Obróbka elektroerozyjna (Electrical Discharge Machining – EDM) jest najbardziej rozpowszechnioną metodą obróbki erozyjnej, polegającą na usuwaniu z przedmiotu obrabianego określonej warstwy materiału (nadatku) w wyniku impulsowych wyładowań elektrycznych. Pomiędzy elektrodami (narzędzie i przedmiot obrabiany) podłączonymi do generatora impulsów elektrycznych przepływa dielektryk. Wzajemne zbliżenie elektrod na niewielką odległość (tworząc, tzw. szczelinę międzyelektrodową) umożliwia zainicjowanie wyładowań elektrycznych, w wyniku których usuwany jest nadatek obróbkowy [L. 3, 6].

Mechanizm usuwania materiału (Rys. 1) wynika z nagrzania, topnienia, parowania oraz rozrywania materiału na skutek naprężeń powstających w wyniku gradientu temperatury pomiędzy miejscem wyładowania a otaczającym materiałem.



Rys. 1. Model zjawisk zachodzących w szczelinie roboczej podczas EDM [L. 1]

Fig.1. Model of EDM gap phenomena [L. 1]

Jedną z odmian obróbki elektroerozyjnej jest drażnienie, podczas którego kształt dosuwanego narzędzia odwzorowywany jest w materiale obrabianym [L. 3], co pozwala na efektywne wykonywanie skomplikowanych kształtów w szerokiej grupie materiałów obrabianych, bez względu na ich właściwości mechaniczne (jedyne ograniczenie to przewodność elektryczna).

Elektrody robocze wykonywane są z materiałów o dużej odporności na erozję elektryczną, tj. miedź, mosiądz, aluminium, grafit czy żeliwo. Cieczami dielektrycznymi (roboczymi) mogą być pochodne ropy naftowej z dodatkami uszlachetniającymi (np. nafta kosmetyczna) i oleje syntetyczne oraz woda dejonizowana, do której dodaje się specjalne dodatki (np. gliceryne) [L. 6].

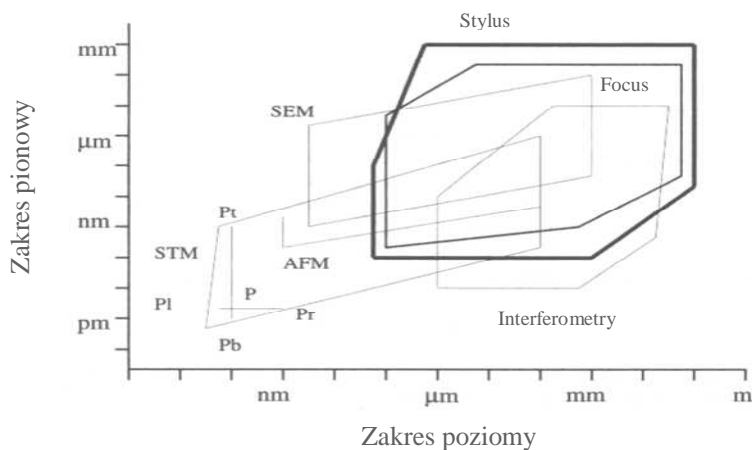
Struktura geometryczna powierzchni (SGP)

Struktura geometryczna powierzchni [L. 4] to zbiór wszystkich nierówności powierzchni rzeczywistej, tj. odchyłek kształtu i położenia, wad powierzchni, falistości i chropowatości.

Pomiary struktury geometrycznej powierzchni (stereometrii, 3D, topografii) są wykorzystywane w praktycznych zastosowaniach, aby przedstawić obraz przestrzenny, który umożliwia prawidłowe zrozumienie natury powierzchni.

Analiza struktury geometrycznej powierzchni obejmuje trzy etapy: metodę (technikę) pomiaru, przedstawienie powierzchni oraz ocenę parametryczną powierzchni.

Obecnie do wyznaczania parametrów 3D istnieje duży wybór metod pomiaru i badań, ale żadna technika pomiaru (**Rys. 2**) użyta osobno nie obejmuje całego zakresu pomiarowego. Zastosowanie różnych technik pomiaru topografii powierzchni daje uzupełniające się informacje oraz ułatwia interpretację wyników.



Rys. 2. Zakres i rozdzielczość technik pomiaru powierzchni 3D [L. 2, 4]

Fig. 2. Scope and resolution of the 3D surface measuring methods [L. 2, 4]

Uzyskanie kompletnej informacji do wystawienia oceny jakości technologicznej wytworzonych elementów jest możliwe dzięki wykorzystaniu tzw. *hybryd*, a więc łączonych technik pomiarowych.

Graficzne przedstawienie topografii powierzchni wywodzi się z metod kartograficznych i polega na połączeniu punktów w taki sposób, aby uzyskany obraz reprezentował badaną powierzchnię [L. 2]. Stąd wynikają dwa sposoby graficznego przedstawienia zmierzonej powierzchni: mapa konturowa (ujęcie 2D) oraz rzut aksonometryczny (ujęcie 3D).

Ocena struktury geometrycznej powierzchni wyrobów wymaga, w kolejnym kroku, określenia parametrów opisujących zmierzoną powierzchnię w sposób ilościowy. Wyróżniki struktury geometrycznej powierzchni (3D) podzielono na funkcje oraz parametry, które pozwalają na dokładne określanie związków między walorami użytkowymi i charakterystykami SGP [L. 4]. Wiele przypadków dowodzi, że ocena powierzchni powinna opierać się przede wszystkim na parametrach amplitudowych, przestrzennych oraz hybrydowych, charakteryzujących ukształtowanie

geometryczne i wysokość nierówności powierzchni. Pozostałe parametry można również analizować, ale należy je traktować raczej jako parametry pomocnicze, umożliwiające doprecyzowanie kryteriów wyboru powierzchni, odpowiednio do jej przeznaczenia konstrukcyjnego i eksploatacyjnego.

METODYKA BADAŃ

Przedmiotem badań były próbki o średnicy 50 mm, wykonane ze stali narzędziowej. Obróbkę elektroerozyjną przeprowadzono na powierzchni czołowej próbek za pomocą elektrody miedzianej, jako dielektryk zastosowano naftę kosmetyczną. Źródłem impulsów elektrycznych był generator tranzystorowy, co umożliwiło kontrolę energii pojedynczych impulsów elektrycznych. Parametry obróbki były następujące:

- amplituda napięcia roboczego: $U_r = 30 \div 65$ [V]
- amplituda prądu w impulsie: $I_r = 1 \div 25$ [A]
- czas trwania impulsu: $t_i = 25 \div 1600$ [μ s]
- czas przerwy między impulsami: $t_o = 10 \div 40$ [μ s]

Energia pojedynczych impulsów elektrycznych została wyznaczona ze wzoru [L. 3]:

$$E_i = U_g I_c t_e \quad (1)$$

gdzie: U_g – średnie napięcie graniczne (tzw. napięcie przebicia),
 I_c – amplituda prądu roboczego, t_e – czas impulsu wyładowania.
 Średnie energie wyładowań dla parametrów elektrycznych zastosowanych w trakcie badań zostały przedstawione w **Tabeli 1**.

Tabela 1. Energia pojedynczych impulsów E_i

Table 1. Energy of single discharge E_i

Oznaczenie	E_i (nr1)	E_i (nr2)	E_i (nr3)
Wartość [J]	0,0016	0,0400	1,2000

Struktura geometryczna badanych powierzchni, otrzymanych w wyniku obróbki elektroerozyjnej, została poddana badaniu na trzech stanowiskach pomiarowych. Za pomocą mikroskopu optycznego i skaningowego mikroskopu elektronowego wykonano obrazy powierzchni obrobionej. Badania te zostały przeprowadzone w Zakładzie Tribologii Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu. Badania topografii

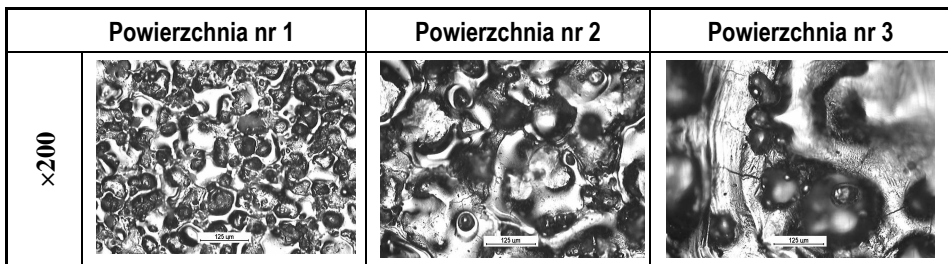
(chropowatości 3D) powierzchni przeprowadzono w Politechnice Wrocławskiej na profilometrze *CLI2000* za pomocą bezstykowej głowicy skanującej (obiektyw $\times 20$). Wyniki badań przeanalizowano za pomocą specjalistycznego oprogramowania *Mountains Map v.5*.

WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

W procesie obróbki elektroerozyjnej EDM materiał usuwany jest w drodze wyładowań elektrycznych, które występują w szczelinie roboczej między elektrodą roboczą (narzędziem) a elementem obrabianym. W miejscach wyładowań występuje na tyle wysoka temperatura (wywołująca nagrzanie), że materiał obrabiany ulega lokalnie natychmiastowemu topnieniu oraz częściowemu odparowaniu. Z uwagi na to, że proces przemian fazowych obrabianego materiału (**Rys. 1**) ma charakter wybuchowy, cząstki roztopionego materiału wyrzucane zostają do dielektryka, poza obszar wyładowania. Część z nich zabierana jest z przepływającym dielektrykiem, natomiast część krzepnie na powierzchni przedmiotu obrabianego. Produkty te kształtem przypominają pojedyncze kulki lub ich zespoły. Na obrazach uzyskanych z mikroskopu optycznego – **Tabela 2**, przy tym samym powiększeniu ($\times 200$), kulki mają różne rozmiary, co uzależnione jest od parametrów obróbki oraz warunków panujących w szczelinie roboczej.

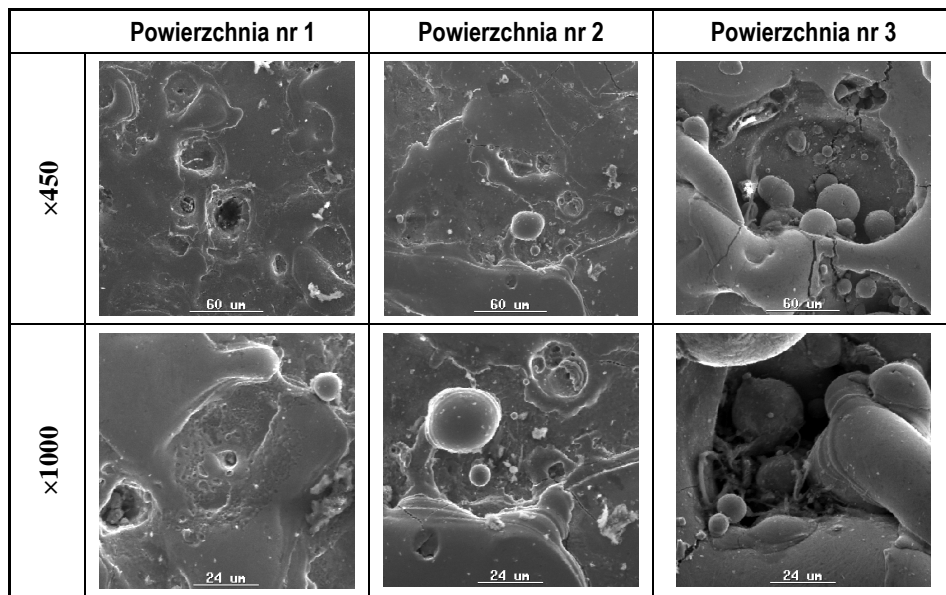
Tabela 2. Obrazy powierzchni $\times 200$ – mikroskop optyczny

Table 2. Views of surfaces $\times 200$ – optical microscope



Po obróbce powierzchnię elementu obrabianego pokrywa zbiór kraterów przypominających kształtem czasze kuliste, co widać na obrazach zestawionych w **Tabeli 2, 3 i 4**.

Tabela 3. Obrazy powierzchni ($\times 450$ i $\times 1000$) – skaningowy mikroskop elektronowy
 Table 3. Views of surfaces ($\times 450$ and $\times 1000$) – scanning electron microscope



Struktura geometryczna powierzchni obrobionej elektroerozyjnie jest wynikiem wzajemnie nakładających się kraterów (miejsc, w których następują wyładowania elektryczne). Wielkość kraterów, czyli ich średnica i wysokość wypłytki jest ściśle skorelowana z energią impulsów elektrycznych E_i (im większa energia poszczególnych impulsów, tym większe wymiary kraterów i wypływek).

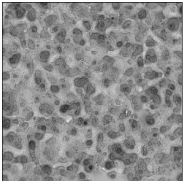
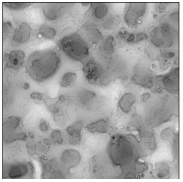
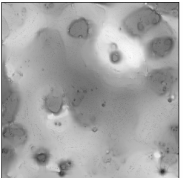
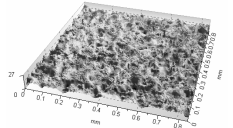
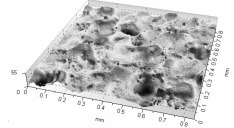
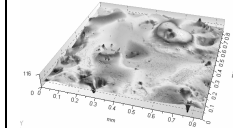
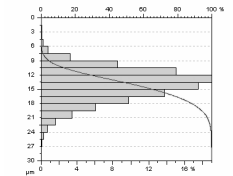
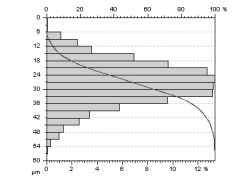
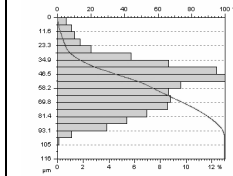
Nadtopienia materiału, które można zauważyć na obrazach w **Tabeli 3**, przyjmują wydłużoną postać zakończoną czaszą kulistą – forma poprzedzająca oddzielenie kulistych produktów erozji od materiału. Widoczne jest również nawarstwianie się nadtopionego materiału.

Analizując obrobione powierzchnie, zauważono, że wraz ze wzrostem energii pojedynczych impulsów (wyładowań) E_i (**Tabela 1**) oraz czasu ich trwania t_i miał miejsce wzrost naprężeń rozciągających, co stanowiło bezpośrednią przyczynę powstawania w materiale mikropęknięć (**Tabela 2 i 3**). Takie zjawiska odgrywają istotną rolę w kształtowaniu właściwości materiałów, zmniejszając ich odporność na ścieranie i wytrzymałość zmęczeniową.

Tabela 4 przedstawia wyniki uzyskane z profilometru. Powierzchnie badanych próbek (ich jakość technologiczną) oceniono, analizując wybrane parametry chropowatości.

Tabela 4. Zdjęcie, obraz aksonometryczny, krzywa Abbotta – profilometr

Table 4. Photo simulation, axonometric view, Abbott-Firestone curve – profilometer

	Powierzchnia nr 1	Powierzchnia nr 2	Powierzchnia nr 3
$S_t = 27 \text{ } [\mu\text{m}]$			
			
			
$S_t = 55 \text{ } [\mu\text{m}]$			
$S_t = 116 \text{ } [\mu\text{m}]$			

Topografia powierzchni zmieniała się wraz ze zmianą energii pojedynczego impulsu E_i . Przy najmniejszej wartości E_i ($nr1$) = 0,0016 [J] (*Powierzchnia nr1*) zauważono drobne, liczne jak też równomiernie rozłożone obszary materiału. W miarę zwiększania energii E_i (*Powierzchnia nr 2 oraz Powierzchnia nr 3*) topografia powierzchni zmienia się, zarówno krater, jak też nadtopione obszary materiału zwiększają swoje wymiary – obrazy w **Tabeli 2, 3 i 4**.

Ilościowa analiza chropowatości powierzchni badanych próbek również wykazała ścisłą zależność między wartością energii pojedynczego impulsu a parametrami chropowatości. Im większa wartość E_i , tym większa chropowatość powierzchni, co uwidacznia **Tabela 5**.

Tabela 5. Parametry chropowości

Table 5. Roughness parameters

<i>Parametr</i>	<i>Powierzchnia</i>		
	<i>nr 1</i>	<i>nr 2</i>	<i>nr 3</i>
S_q [μm]	3,25	8,52	19,30
S_{sk} [-]	-0,36	-0,18	0,09
S_{ku} [-]	3,14	2,92	2,61
S_{tr} [%]	93,7	88,5	54,5
S_{pk} [μm]	2,27	6,91	20,6
S_k [μm]	8,25	22,5	51,2
S_{vk} [μm]	3,86	9,64	13,7

Parametry amplitudowe S_t (**Tabela 4**) i S_q zwiększały się wraz ze wzrostem energii E_i . Pozostałe parametry amplitudowe S_{sk} oraz S_{ku} dały uzupełniającą informację na temat ukształtowania struktury geometrycznej badanych powierzchni. Zarówno współczynnik skośności S_{sk} , jak i współczynnik skupienia S_{ku} jest wrażliwy na miejscowe wzniesienia czy wgłębienia (w tym defekty) występujące na powierzchniach [**L. 4**]. Parametr S_{sk} , dla *Powierzchni nr 1* i *Powierzchni nr 2* przyjął wartość ujemną, co świadczyło raczej o płaskowyżowym ukształtowaniu tych powierzchni, w porównaniu z *Powierzchnią nr 3*. Im niższa wartość S_{sk} , tym bardziej spłaszczona powierzchnia i zaokrąglone wierzchołki wzniesień. Z punktu widzenia współpracy powierzchni elementów węzła tarcia, za korzystnie ukształtowane uważane są te powierzchnie, które charakteryzują szerokie wzniesienia o zaokrąglonych wierzchołkach, natomiast za niekorzystnie ukształtowane – powierzchnie charakteryzowane wąskimi wzniesieniami o zaokrąglonych wierzchołkach [**L. 5**]. W przypadku badanych powierzchni, korzystnie ukształtowana została *Powierzchnia nr 1*.

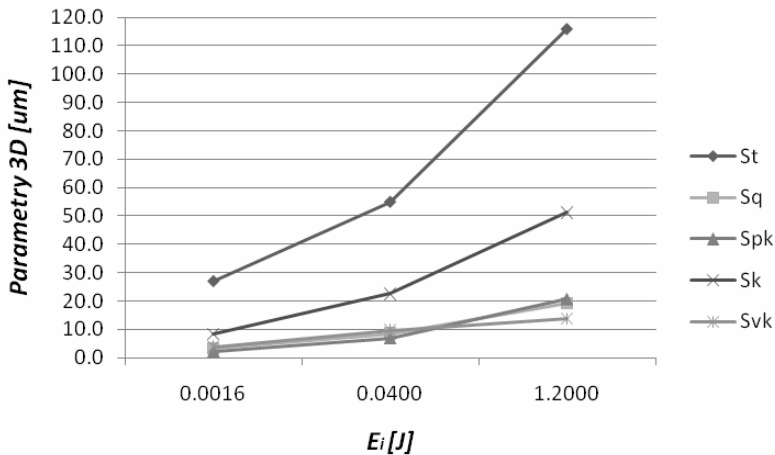
Parametr S_{ku} (wartość oscylująca wokół 3) ujawnił, że badane powierzchnie charakteryzuje rozkład rzędnych bliski rozkładowi normalnemu (**Tabela 4** – krzywa Abbotta), co oznacza równomierne rozłożenie zarówno wzniesień, jak i dolin na powierzchniach badanych próbek.

Wartość parametru przestrzennego S_{tr} (wskaźnik tekstury powierzchni) ujawnia charakter powierzchni: wartości bliskie 100% charakteryzują powierzchnie o właściwościach izotropowych, natomiast warto-

ści bliskie 0% – powierzchnie o właściwościach anizotropowych. Charakter struktury potwierdzają obrazy zawarte w **Tabeli 2 i 4**.

W pracy analizowano również parametry opisujące krzywą nośności (S_{pk} , S_k , S_{vk}). Wszystkie te parametry, a więc zredukowana wysokość wzniesień S_{pk} , wysokość chropowatości rdzenia S_k oraz zredukowanej głębokości wgłębień S_{vk} wykazały, podobnie jak wcześniej analizowane parametry, wzrost wartości wraz ze wzrostem energii pojedynczego impulsu E_i .

Z punktu widzenia smarowania i zużycia elementów wężła tarcia istotne są: zasób cieczy smarującej zmagazynowany we wgłębieniach na powierzchniach współpracujących oraz wysokość nierówności tych powierzchni [L. 5]. Analiza krzywej nośności wykazała, że najlepsze smarowanie wężła tarcia zapewniłaby *Powierzchnia nr 3* (największa wartość S_{vk}), natomiast najmniejsze zużycie – *Powierzchnia nr 1* (najmniejsza wartość S_{pk}).



Rys. 3. Zależność chropowatości powierzchni od energii pojedynczego impulsu E_i
 Fig. 3. The relationship between surface roughness and energy of single discharge E_i

Tendencja wzrastania wartości parametrów chropowatości powierzchni (**Rys. 3**) wraz ze wzrostem energii pojedynczych impulsów E_i jest typowa dla obróbki elektroerozyjnej, której poddano badane próbki wykonane ze stali narzędziowej.

PODSUMOWANIE

- Pomiar i analiza struktury geometrycznej powierzchni elementów wytworzonych w procesie obróbki elektroerozyjnej są istotne dla oceny tego procesu.
- Wraz ze wzrostem energii pojedynczego impulsu na powierzchniach obrabianych zwiększają się lokalne obszary nadtopionego materiału (wzrasta przy tym chropowatość powierzchni) oraz pojawiają się mikropęknięcia wynikające ze wzrostu naprężeń rozciągających.
- Struktura geometryczna powierzchni obrobionej w procesie obróbki elektroerozyjnej stanowi efekt wzajemnie nakładających się kraterów.
- Analiza ilościowa parametrów charakteryzujących ukonstytuowaną strukturę geometryczną badanych powierzchni umożliwia zdefiniowanie i zaplanowanie dalszych kroków w doskonaleniu procesu obróbki elektroerozyjnej materiałów trudnoskrawalnych, do których zaliczana jest badana stal narzędziowa.
- Odpowiedni dobór parametrów obróbki, zwłaszcza wartości energii pojedynczego impulsu (wyładowań) E_i umożliwiają otrzymanie powierzchni o wymaganej jakości technologicznej.

LITERATURA

1. Kunieda M.: Advancements in fundamental studies on EDM gap phenomena. Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining, April 19–23, Shanghai, China 2009, str. 15–23.
2. Pawlus P.: Topografia powierzchni – pomiar, analiza, oddziaływanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2006.
3. Ruszaj A.: Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi. Wydawnictwo Instytutu Obróbki Skrawaniem, Kraków 1999.
4. Stout K.J., Blunt L.: Three Dimensional Surface Topography. Penton Press, London 2000.
5. Szczerek M.: Metodologiczne problem systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. Biblioteka Problemów Eksploatacji, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 1997.
6. Żebrowski H. (red.): Techniki wytwarzania. Obróbka wiórowa, ścierna, erozyjna. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.

Recenzent:
Paweł PAWLUS

Summary:

Electrical discharge machining, which belongs to the non-conventional group of machining methods is widely used for manufacturing elements made of hard materials and those having a complicated geometry. The paper gives an overview of electrical discharge machining. The author has conducted research (quantitative and qualitative) into the results of the surface geometric structure created by the electrical discharge machining process. For analysis purposes, an optical microscope, a scanning electron microscope, and a profilometer were used. It has been found that machining parameters have a significant influence on the shape and technological quality of a surface.