

# Obróbka elektroerozyjna z płatkami grafenowymi w dielektryku

## Electrical discharge machining with graphene flakes in dielectric

RAFAŁ ŚWIERCZ\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.3.38>

Przedstawiono analizę statystyczną wyników badań doświadczalnych obróbki EDM stali w roztworze nafty z płatkami grafenowymi oraz w dielektryku na bazie nafty. Wyznaczono równania regresji opisujące wpływ parametrów i warunków obróbki na wybrane parametry chropowatości powierzchni.

**SŁOWA KLUCZOWE:** obróbka elektroerozyjna, płatki grafenowe w dielektryku, chropowatość powierzchni

*The article presents statistical analysis of results experimental investigation of EDM process with graphene flakes in dielectric. The relations between surface roughness and process parameters have been determined.*

**KEYWORDS:** electrical discharge machining (EDM), graphene flakes, surface roughness

Fizyka usuwania materiału w obróbce elektroerozyjnej (EDM) jest w istotny sposób zdeterminowana przez właściwości ośrodka, w którym następują wyładowania elektryczne. Badania doświadczalne procesu obróbki z zastosowaniem dodatkowych proszków w dielektryku [1–3] wykazały możliwość obniżenia chropowatości obrabianych powierzchni. Częsteczki umieszczone w dielektryku ułatwiają zainicjowanie wyładowania elektrycznego, a jednocześnie obniżają jego energię. Powierzchnia po obróbce charakteryzuje się zarówno zmniejszonym parametrem chropowatości  $R_a$ , jak i zmianami strukturalnymi zachodzącymi w wyniku stopowania cząsteczek [5, 6]. Ze względu na własności płatków grafenowych (wysoką przewodność cieplną 4840–5300 W/m·K – i elektryczną – 200 razy większą niż krzem) [4] w nafcie może nastąpić odmienny przebieg wyładowania elektrycznego.

### Cel badań

Celem badań było wyznaczenie wpływu wybranych parametrów obróbki elektroerozyjnej i rodzaju zastosowanego dielektryka (nafta, roztwór nafty z płatkami zredukowanego tlenku grafenu – RGO) na wybrane parametry chropowatości obrabianych powierzchni.

### Badania doświadczalne

Badania doświadczalne procesu drążenia elektroerozyjnego prowadzone były na obrabiarce Charmilles Form 2 LZ ZNC. Poddano obróbce EDM szlifowane próbki o wymiarach 12 × 12 mm ze stali 1.2713 (WNL) hartowanej elektrodą miedzianą (M1E). Badania były realizowane według eksperymentu planowanego dwuczynnikowego pięciopoziomowego Hartleya. Przyjęto następujące zmienne: natężenie prądu  $I$ , czas impulsu  $t_{on}$ , dielektryk nafta oraz roztwór nafty z grafenem płatkowym o stężeniu 0,1%. Ustalono wartość parametru stałego – napięcia wyładowania  $U_c = 25$  V. Czas przerwy między impulsami  $t_{off}$  ustalono jako współczynnik wypełnienia impulsu na poziomie  $\sigma = 0,7$ .

\* Dr inż. Rafał Świercz (rsw@meil.pw.edu.pl) – Instytut Technik Wytwarzania Politechniki Warszawskiej

Analiza wyników badań wskazuje, że w zależności od wartości natężenia prądu i czasu impulsu (przy ustalonych pozostałych parametrach i warunkach obróbki) występują znaczne różnice w topografii obrabianych powierzchni. Średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych badanych powierzchni  $S_a$  zawiera się w przedziale od 2,02 do 11,9  $\mu\text{m}$  dla obróbki w nafcie oraz od 0,96 do 8,89  $\mu\text{m}$  dla obróbki w roztworze nafty z RGO. Wartości te odpowiadają chropowatości z zakresu obróbki wykończeniowej i zgrubnej. Wyraźnie widoczne jest znaczące obniżenie wartości parametrów amplitudowych chropowatości w przypadku obróbki w roztworze z RGO. Średnia arytmetyczna krzywizna wierzchołów nierówności powierzchni  $S_{sc}$  zmienia się od 0,053 do 0,094  $\mu\text{m}^{-1}$  dla obróbki w nafcie oraz od 0,053 do 0,084  $\mu\text{m}^{-1}$  dla obróbki w roztworze nafty z płatkami grafenowymi. Wartość  $S_{sc}$  ma istotny wpływ m.in. na zużycie ścierny powierzchni, możliwość nanoszenia na nią powłok czy też jej refleksyjność. Im wyższe pochylenie i mniejszy promień zaokrąglenia, tym wierzchołki nierówności mają bardziej zaokrąglony charakter, co prowadzi do wzrostu współczynnika tarcia, jednocześnie zwiększając własności adhezyjne powierzchni. W tabl. I przedstawiono wyniki pomiarów wybranych parametrów SGP.

**TABLICA I. Wyniki badań – parametry SGP**

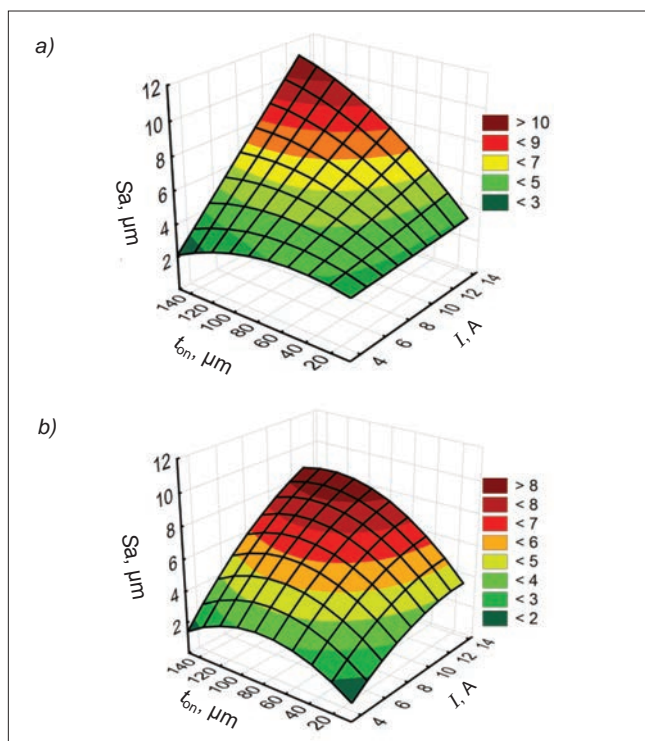
Lp.	Parametry obróbki		Parametry SGP			
			nafta		nafta z RGO	
	$I$ A	$t_{on}$ $\mu\text{s}$	$S_a$ $\mu\text{m}$	$S_{sc}$ $\mu\text{m}^{-1}$	$S_a$ $\mu\text{m}$	$S_{sc}$ $\mu\text{m}^{-1}$
1	2,1	10	2,08	0,0665	0,263	0,0632
2	13,5	10	5,43	0,0885	0,379	0,0527
3	2,1	145	1,86	0,0531	0,180	0,0598
4	13,5	145	12,20	0,0943	0,513	0,0824
5	7,8	5	3,28	0,0839	0,353	0,0815
6	7,8	150	6,05	0,0715	0,342	0,0618
7	1,7	78	1,73	0,0670	0,201	0,0735
8	14,0	78	7,50	0,0914	0,481	0,0771
9	7,8	78	6,31	0,0858	0,428	0,0839
10	7,8	78	7,48	0,0874	0,442	0,0798

Na podstawie wyników badań doświadczalnych wyznaczono statystyczne, matematyczne modele procesu obróbki (tabl. II).

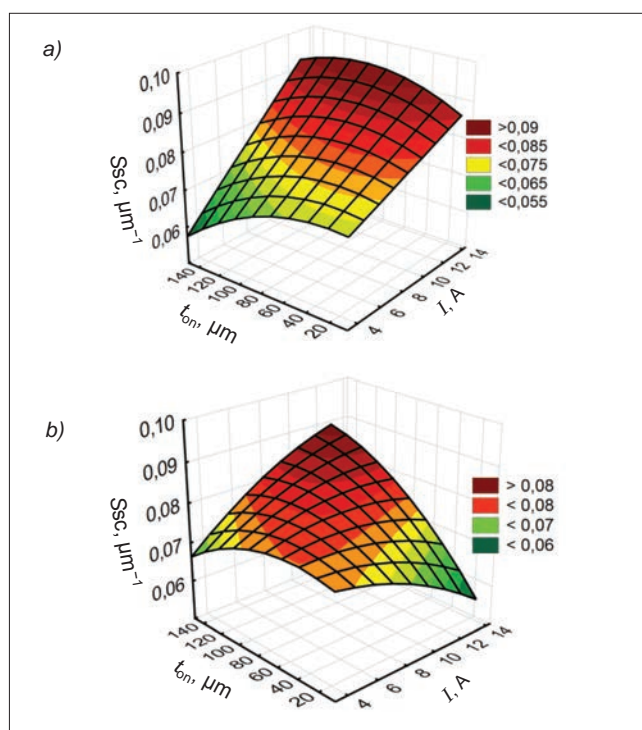
**TABLICA II. Równania regresji**

Równania regresji – obróbka w nafcie	$R$	$F/F_{kr}$
$S_a = 3,53 - 0,00019 t_{on}^2 + 0,006 I t_{on}$	0,96	47
$S_{sc} = 0,068 + 0,0014 I - 0,000001 t_{on}^2 + 0,000014 I t_{on}$	0,96	24
Równania regresji – obróbka w roztworze nafty z RGO	$R$	$F/F_{kr}$
$S_a = -1,39 + 0,81 I + 0,003 I t_{on} - 0,00035 t_{on}^2 + 0,046 t_{on} - 0,033 I^2$	0,99	40
$S_{sc} = 0,076 - 0,000001 t_{on}^2 - 0,000117 I^2 + 0,000028 I t_{on}$	0,75	2,65

Równania regresji opisano funkcją wielomianu stopnia drugiego w programie Statistica. Dla każdego równania określono współczynnik korelacji  $R$ , odzwierciedlający zmienność badanej cechy. Zweryfikowano poprawność wyznaczenia równań regresji testami statystycznymi (dla  $\alpha = 0,05$ ): F-Snedecora i t-Studenta. Uzyskane zależności zostały przedstawione na rys. 1 i 2. Parametry wysokości chropowatości (np.  $S_a$  – rys. 1) są w głównej mierze uzależnione od wartości natężenia prądu wyładowania. Wzrostowi natężenia prądu i czasu impulsu odpowiada wzrost ilości materiału erodowanego w pojedynczym impulsie, prowadząc do generowania chropowatości o większej wysokości. Przy niewielkich wartościach natężenia prądu (rzędu 1,7 A) zwiększanie czasu wyładowania (a tym samym energii) nie powoduje znaczącego wzrostu parametru  $S_a$ . Może to mieć związek z ilością energii cieplnej (zależnej od wartości natężenia prądu) wytworzonej i dostarczonej do materiału obrabianego w procesie wyładowania, która powoduje topnienie i odparowanie materiału. Geometria nierówności opisana średnią arytmetyczną krzywizny wierzchołów nierówności powierzchni  $S_{sc}$  jest uzależniona zarówno od natężenia prądu, jak i czasu impulsu. Przy najwyższych wartościach energii wyładowania nie tylko powstają krater o największej głębokości, ale również wierzchołki nierówności mają największy promień. Może to być spowodowane ponownym krzepnięciem roztopionych mikrostrug materiału, które w procesie erozji nie zostały usunięte i ponownie zakrzepły na powierzchni nierówności. Zmiana właściwości ośrodka, w którym następuje przebicie elektryczne, istotnie wpływa na wartość parametrów amplitudowych chropowatości ( $S_a$ ) i parametrów opisujących ich geometrię ( $S_{sc}$ ). Zarówno dla największych, jak i najmniejszych wartości natężenia prądu i czasu impulsu podczas obróbki w nafcie z płatkami grafenu zaobserwowano zmniejszenie analizowanych wartości. Może to wynikać bezpośrednio z dyspersji wyładowań elektrycznych zachodzących na płatkach grafenowych. Wyładowania elektryczne docierające do powierzchni obrabianej mają mniejszą energię.



Rys. 1. Zależność parametru  $S_a$  od czasu impulsu  $t_{on}$  i natężenia prądu  $I$ : a) obróbka w nafcie, b) obróbka w roztworze nafty z RGO



Rys. 2. Zależność parametru  $S_{sc}$  od czasu impulsu  $t_{on}$  i natężenia prądu  $I$ : a) obróbka w nafcie, b) obróbka w roztworze nafty z RGO

Opracowane równania regresji charakteryzują się wyższym współczynnikiem korelacji  $R$  i mniejszym rozrzutem wartości w przypadku obróbki elektroerozyjnej w roztworze nafty z RGO. Może wynikać to z faktu uzyskania większej stabilności wyładowań w całym badanym obszarze parametrów elektrycznych.

## Podsumowanie

Badania doświadczalne wykazały, że zmiana właściwości ośrodka (dodanie cząsteczek przewodzących) w istotny sposób wpływa na przebieg wyładowań elektrycznych, a tym samym na efekty obróbki. Ze względu na własności płatków grafenowych (wysoką przewodność elektryczną i cieplną) przebieg wyładowania elektrycznego i końcowy proces rozpraszania ciepła w szczelinie międzyelektrodowej w stosunku do obróbki w nafcie są odmienne. Ułatwienie inicjacji wyładowania elektrycznego (przy powiększonej w stosunku do standardowej grubości szczeliny międzyelektrodowej) powoduje powstawanie stabilnych wyładowań elektrycznych o obniżonej energii.

## LITERATURA

- Dąbrowski L, Zawora J, Yu J. „Poliptymalizacja procesu obróbki elektroerozyjnej z proszkami przewodzącymi w dielektryku”. *Mechanik*. 12 (2015): s. 40–44.
- Fred L.A. et al. “Surface modification of tool steel by electrical discharge machining with molybdenum powder mixed in dielectric fluid”. *International Journal Advances Manufacturing Technology*. (2016): s. 1–10.
- Hamid B., Samin S. “Effects of nanopowder  $TiO_2$ -mixed dielectric and rotary tool on EDM”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 83, 1 (2016): s. 519–528.
- Novoselov K.S. et al. “A roadmap for graphene”. *Nature*. 460 (2012) s. 192–200.
- Podolak-Lejtas A. „Wpływ obróbki nagniataniem na właściwości użytkowe elementów po obróbce elektroerozyjnej”. *Mechanik*. 1 (2016): s. 35–37.
- Żyra A, Skoczypiec S. „Wpływ dielektryka na cechy strukturalne i morfologiczne stali austenitycznej po obróbce elektroerozyjnej”. *Mechanik*. 12 (2016): s. 26–28.