



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

Poliptymalizacja procesu obróbki elektroerozyjnej z proszkami przewodzącymi w dielektryku

Poly-optimization of the Electrical Discharge Machining process using electrical conductive powder in dielectric

LUCJAN DĄBROWSKI
JÓZEF ZAWORA
JIANWU YU*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.536

W artykule scharakteryzowano procesy obróbki EDM z użyciem proszków w dielektryku. Wykonano badania z proszkami metali; Sn, Fe, Cu i opracowano modele matematyczne tych procesów. Dokonano polioptymalizacji badanych procesów z uwagi na wydajność obróbki, czas obróbki i parametr chropowatości Ra. Przedstawiono wyniki obliczeń oraz wnioski.

SŁOWA KLUCZOWE: Proces EDM-Powder, polioptymalizacja

The EDM process described in this paper has been carried out with the electrical conductive powder in dielectric. The powders of Sb, Fe and Cu were used. The mathematical model of this process wear has been developed. The poly-optimization method has been used in view of productivity, time of machining and parameter of surface roughness Ra.

KEYWORDS: powder-backed EDM process, poly-optimization

Proces obróbki elektroerozyjnej z użyciem proszków wprowadzonych do dielektryka charakteryzuje się w głównej mierze tym, że zmienia się rozkład pola elektrycznego w przestrzeni międzyelektrodowej oraz zmieniają się własności mieszaniny dielektryka w porównaniu z procesem standardowym bez użycia proszku. Zmiana rozkładu pola elektrycznego i własności mieszaniny dielektryka powoduje zmianę warunków fizycznych przebiegu procesu drążenia elektroerozyjnego w stosunku do procesu standardowego [1]. Badania tego typu procesu oznaczonego symbolicznie

EDM-Powder prowadzi się w celu poszukiwania coraz lepszych własności użytkowych obróbki elektroerozyjnej i wykorzystaniu ich w procesach technologicznych części maszyn i urządzeń wykonywanych w szczególności z materiałów trudnoobrabialnych. Do podstawowych parametrów użytkowych tego procesu można zaliczyć: wydajność obróbki, czas wykonania, parametry chropowatości powierzchni obrobionej, zużycie elektrody itp. Możliwie najlepsze wykorzystanie parametrów użytkowych tego procesu w procesach technologicznych wymaga zastosowania optymalizacji wielocelowej. Do przeprowadzenia optymalizacji rozważanego procesu obróbki istnieje potrzebna budowa modelu matematycznego tego procesu, który wyraża zależności funkcyjne parametrów użytkowych procesu w zależności od parametrów nastawialnych procesu. Z uwagi na złożoność opisu zjawisk fizycznych występujących w tym procesie, takich jak losowy rozkład pola elektrycznego i pola temperatur, tworzenie się kanału plazmowego i fali uderzeniowej, zmiany własności mieszaniny proszku i dielektryka w szczelinie międzyelektrodowej wskutek wydzielania się gazów oraz przechodzenia do elektrolitu produktów roztwarzania itp. zdecydowano się na budowę statystycznego modelu matematycznego wykorzystując technikę planowania eksperymentów. Badania doświadczalne wykonano stosując pięciopozomowy kompozycyjny plan Boxa Wilsona dla czterech zmiennych niezależnych z trzydziestoma doświadczeniami w eksperymencie [2]. Schemat obrabiarki EDM podano na rys. 1. Wyposażenie do mieszania proszku w dielektryku przedstawiono na rys. 2. Natomiast przebieg wyładowania elektrycznego w dielektryku z proszkiem podano na rys. 3.

* Dr hab. inż. Lucjan Dąbrowski, prof. PW (ld@meil.pw.edu.pl),
Dr hab. inż. Józef Zawora (jzawora@meil.pw.edu.pl),
Dr inż. Jianwu Yu, Changsa, Chiny



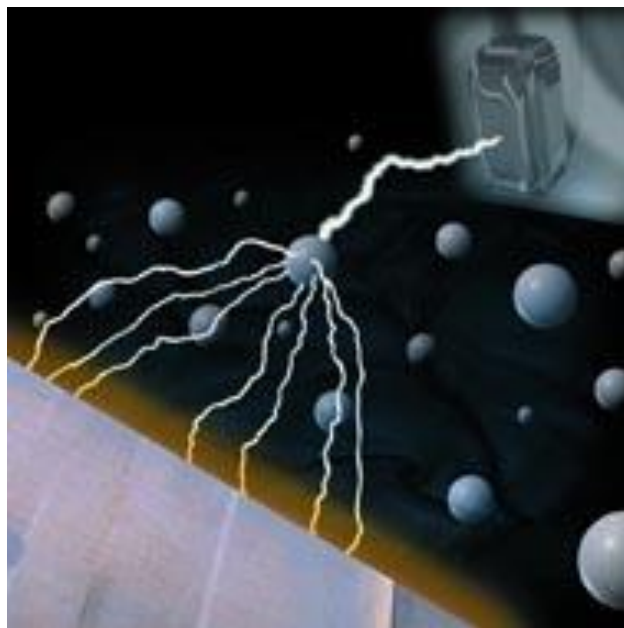
Rys. 1. Obrabiarka EDM do obróbki wykończeniowej matryc typu FORM 2-LC ZNC

Ażeby móc pokonać ograniczenia procesu EDM w obróbce wykończeniowej, proces EDM z użyciem proszków zmieszanych z dielektrykiem jest przedstawiany jako nowa kompetentna technologia. Przewodzące i nieprzewodzące elektryczności proszki są dodawane do dielektryka w procesach EDM. Publikowana literatura przedstawia, że dodawanie proszków do dielektryka istotnie oddziałuje na właściwości procesów EDM. Możliwe rozkłady produktów erozji podczas procesu EDM-Powder w zależności od równomierności rozmieszczenia cząstek proszku w elektrolicie przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Jednorodność gęstości mieszaniny proszku z dielektrykiem decyduje między innymi o stabilności procesu roztrzawania [5].

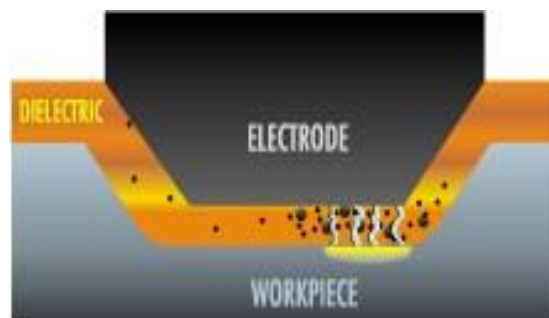
Liczba cząstek w jednostce objętości dielektryka i ich położenie względem siebie ma decydujący wpływ na rozkład pola elektrycznego w szczelinie międzyelektrodowej. Przykłady rozkładu pola elektrycznego dla różnej liczby cząstek proszku w szczelinie międzyelektrodowej podano na rysunku 6a, b, c. Natomiast rozkłady pola elektrycznego w szczelinie dla ziarna proszku przewodzącego i nieprzewodzącego podano na rys. 7 i 8.



Rys. 2. Wyposażenie komory do mieszania proszku z dielektrykiem na stole obrabiarki EDM-Powder



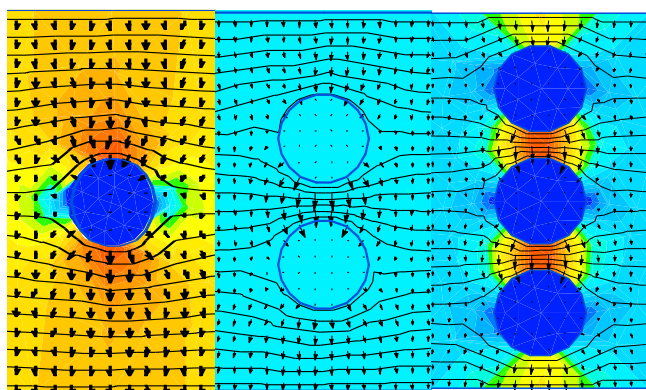
Rys. 3. Przykład wyladowania elektrycznego w szczelinie z dielektrykiem zmieszonym z ziarnami proszku (PME DM)



Rys. 4. Możliwy rozkład produktów zużycia odczas wyladowania iekrowego w strefie zagęszczenia ziaren proszku powoduje lokalizację obróbki [6]

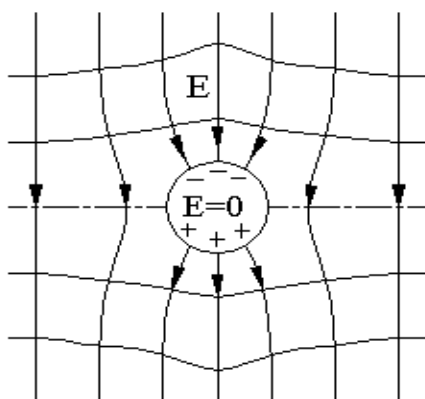


Rys. 5. Stabilność wyladowań elektrycznych zależy od możliwej równomierności rozkładu cząstek proszku w szczelinie [6]

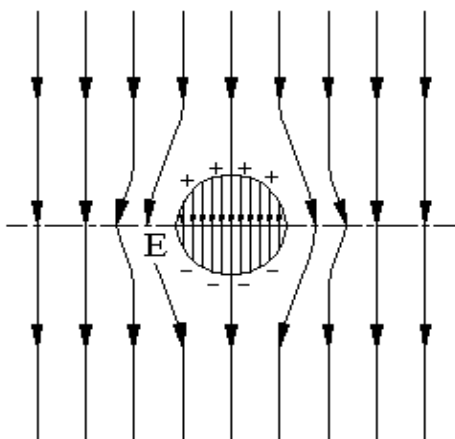


a) jedno ziarno $(E_{max} = 1.67 E_0)$ b) dwa ziarna $(E_{max} = 3.3 E_0)$ c) trzy ziarna $(E_{max} = 4 E_0)$

Rys. 6. Wpływ położenia ziarn na rozkład pola elektrycznego



Rys. 7. Rozkład pola elektrycznego w przypadku ziarna z proszku przewodzącego elektrycznością



Rys. 8. Rozkład pola elektrycznego w przypadku ziarna z proszku nieprzewodzącego elektrycznością

W badaniach przyjęto następujące zmienne niezależne stanowiące parametry nastawialne procesu oraz ustalono zakresy ich zmienności:

- $I < 2, 10 >$ [A] - natężenie prądu,
- $t_{on} < < 9, 150 >$ [μs] - czas trwania impulsu,
- $t_{off} < < 9, 150 >$ [μs] - czas przerwy pomiędzy impulsami prądu,
- $g/l < < 20, 60 >$ [g/l] - zawartość proszku w litrze dielektryka.

Plan doświadczeń zrealizowano przy napięciu 80 V dla trzech różnych proszków metali przewodzących, a mianowicie: cyny żelaza i miedzi. Materiałem obrabianym była stal ulepszana cieplnie 100Cr6. Rezultatem badań były wielkości wyjściowe, które zostały wytypowane jako parametry użytkowe procesu:

- Q_m [mm³/min] - wydajność objętościowa procesu,
- t [min] - czas drążenia określonej objętości materiału

Ra [μm] - średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości.

Wyniki badań opracowano za pomocą programu krokowej regresji wielokrotnej zakładając ogólną postać modelu matematycznego drugiego rzędu:

$$Y_i = a_0 + a_1 I + a_2 t_{on} + a_3 t_{off} + a_4 g/l + a_5 I^2 + a_6 t_{on}^2 + a_7 t_{off}^2 + a_8 (g/l)^2$$

gdzie: Y_i - symbol zmiennych wyjściowych ($i = Q_m, t, Ra$).

Istotność poszczególnych równań regresji testowano testem F - Fishera Snedecora przyjmując poziom istotności $\alpha \leq 0,01$. Dla wybranych równań stosunek F/F_{kr} zawiera się w granicach 1,012 - 9,193. Istotność poszczególnych współczynników w równaniach regresji testowano za pomocą testu t - Studenta na poziomie istotności $\alpha \leq 0,05$. Przy ustalaniu ostatecznej postaci modelu matematycznego procesu uwzględniono również fakt, aby równania w modelu procesu miały sens fizyczny w całym zakresie zmienności parametrów nastawialnych stosowanych w badaniach. Równania regresji reprezentujące modele matematyczne dla poszczególnych rodzajów proszków przewodzących wprowadzonych do elektrolitu zamieszczono poniżej:

Równania regresji dla procesu EDM+Powder z proszkiem cyny Sn:

$$\begin{aligned} Q_m &= 72,43 - 11,13I - 0,67t_{on} + 0,61I^2 + 0,0027t_{on}^2 + 0,025It_{on} \\ t &= 341,01337 - 91,32791I + 6,15026I^2 \\ Ra &= 7,15733 + 0,03679t_{on} - 0,03825g/l + 0,03702I^2 + \\ &\quad - 0,00011t_{on}^2 - 0,00105It_{on} \end{aligned}$$

Równania regresji dla procesu EDM+Powder z proszkiem żelaza Fe:

$$\begin{aligned} Q_m &= 46,63227 - 7,04I - 0,665t_{on} + 0,646t_{on}^2 + 0,00366t_{on}^2 \\ t &= 298,58887 - 82,4615I + 0,59129t_{on} + 5,61105I^2 \\ Ra &= -0,46656 + 1,60722I - 0,09654I^2 - 0,00116It_{on} \end{aligned}$$

Równania regresji dla procesu EDM+Powder z proszkiem miedzi Cu:

$$\begin{aligned} Q_m &= 32,263 - 6,975I - 154g/l + 0,739I^2 + 0,0013t_{on}^2 + \\ &\quad + 0,00053t_{on}^2 - 0,03367It_{on} \\ t &= 423,20213 - 115,07791I + 7,83418I^2 \\ Ra &= 11,32499 - 1,3509I - 0,02992t_{on} + 0,03617g/l + 0,09393I^2 + \\ &\quad - 0,00011t_{on}^2 - 0,00004t_{on}^2 + 0,00595It_{on} \end{aligned}$$

W pierwszym etapie dokonano optymalizacji jednocelowej do znalezienia optimum w sensie maksimum i minimum dla poszczególnych parametrów użytkowych. Zastosowano własny program optymalizacji jednocelowej opracowany w języku Fortran. Działanie tego programu polega na poszukiwaniu wartości maksymalnych i minimalnych poszczególnych zmiennych zależnych metodą systematycznego przeszukiwania z krokiem dyskretyzacji równym jednej setnej zakresów zmiennych niezależnych). Wyniki optymalizacji jednocelowej podano w tablicy 1.

Tablica 1. Parametry optymalne dla maksymalnych i minimalnych wartości wyjściowych procesu EDM-Powder

Rodz. proszku	Q_m [mm ³ /min] t [min] Ra [μm]		Parametry obróbki			
			I	t_{on}	t_{off}	g/l
			[A]	[μs]	[μs]	[g/l]
Sn	Q_m max	47.236	2.00	9.00	9.00	20.0
Fe	Q_m max	86.898	9.92	9.00	148.6	20.0
Cu	Q_m max	49.467	2.00	148.6	148.6	20.0
Sn	Q_m min	1.660	7.28	9.00	9.00	20.0
Fe	Q_m min	1.944	5.44	9.00	9.00	20.0
Cu	Q_m min	0.048	6.64	83.73	9.00	59.6
Sn	t max	182.95	2.00	9.00	9.00	20.0
Fe	t max	243.97	2.00	9.00	148.6	20.0
Cu	t max	224.38	2.00	9.00	9.00	20.0
Sn	t min	1.972	7.44	9.00	9.00	20.0
Fe	t min	0.942	7.36	9.00	9.00	20.0
Cu	t min	0.603	7.36	9.00	9.00	20.0
Sn	Ra max	11.618	9.92	120.4	9.00	20.0
Fe	Ra max	7.734	9.20	148.5	9.00	20.0
Cu	Ra max	11.245	9.92	131.7	9.00	59.6
Sn	Ra min	5.329	2.00	9.00	9.00	59.6
Fe	Ra min	2.383	2.00	9.00	9.00	20.4
Cu	Ra min	3.711	2.48	148.6	148.6	20.0

Optymalizacja wielocelowa została wykonana przy zastosowaniu metody korelacyjno wagowej [3], [4] przy założeniu wartości współczynników korelacji równej jedności. Założono, że wszystkie kryteria optymalizacji są równocenne i nadano im wartości wag równe jedności. Podstawowe kryteria wyrażone poprzez cele jednostkowe, które przyjęto do optymalizacji wielocelowej tego procesu są następujące: wydajność procesu powinna być możliwie największa, czas trwania operacji możliwie najkrótszy, parametr chropowatości Ra możliwie najmniejszy.

W celu wyznaczenia takiego optymalnego zestawu parametrów dla obróbki EDM z użyciem trzech różnych proszków wprowadzonych oddzielnie do elektrolitu zastosowano pojęcie bezwymiarowej oceny badanych procesów obróbki impulsowej elektroerozyjnej OPT , opisanej zależnością:

$$OPT = W_1 \frac{Q_{m_i} - Q_{m_{min}}}{\Delta Q_m} + W_2 \frac{t_{max} - t_i}{\Delta t} + W_3 \frac{Ra_{max} - Ra_i}{\Delta Ra}$$

gdzie: W_i - waga każdego z kryteriów optymalizacyjnych ($i = 1, 2, 3$),

Δj - ($j = Q_m, t, Ra$) przyrosty wielkości wyjściowych.

Wartość oceny OPT może zmieniać się w granicach:

$$0 < OPT < W_j$$

gdzie: $W_j = W_1 + W_2 + W_3$.

Poszukiwany optymalny zbiór parametrów obróbki: I , t_{on} , t_{off} , g/l , to taki, przy którym wyrażenie OPT osiąga wartość maksymalną. Do przeprowadzenia polioptymalizacji realizującej powyższe cele zastosowano własny program opracowany w języku Fortran. Wyniki obliczeń parametrów optymalnych zamieszczono w tablicy 2. W procesie polioptymalizacji dokonano pełnego przeglądu zmienności wielkości wejściowych z krokiem dyskretyzacji równym jednej setnej wartości poszczególnych zakresów ich zmienności.

W praktyce w operacjach technologicznych części maszyn często jest wymagane osiągnięcie określonej wartości parametru chropowatości, np. Ra .

Tablica 2. Optymalne parametry obróbki polioptymalizacji

Rodz. proszku	Optymalne wartości wielkości użytkowych	Optymalne parametry			
		I	t_{on}	t_{off}	g/l
		[A]	[μs]	[μs]	[g/l]
Sn	$Q_m=27.145$ [mm ³ /min] $t=36.945$ [min] $Ra=6.093$ [μm]	5.04	9.00	148.59	59.6
Fe	$Q_m=81.656$ [mm ³ /min] $t=243.970$ [min] $Ra=2.383$ [μm]	2.00	9.00	148.59	59.6
Cu	$Q_m=28.506$ [mm ³ /min] $t=39.372$ [min] $Ra=4.363$ [μm]	5.12	148.6	148.59	20.0

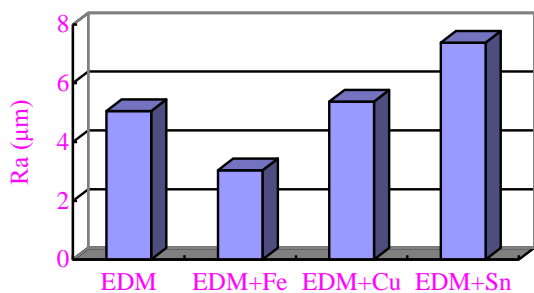
W takim przypadku nie można bezpośrednio wykorzystać optymalnych parametrów obróbki wyznaczonych przy poprzednio przyjętych założeniach. Opracowany program polioptymalizacji (optymalizacji wielocelowej) umożliwi obliczenie parametrów optymalnych obróbki z uwzględnieniem zadanej wartości parametru chropowatości. W takim przypadku należy wprowadzić do programu wymaganą wartość parametru Ra oraz dopuszczalne wartości odchyłek tolerancji. Należy zwrócić uwagę, że obliczenia zakończą się sukcesem, jeżeli zadana wartość parametru Ra będzie się zawierać w granicach osiągniętych podczas badań doświadczalnych. W tablicy 3 podano wyniki takich obliczeń przy założeniu, że wymagana jest wartość parametru $Ra = 6,5 \mu m$ z odchyłkami tolerancji $\pm 0,3 \mu m$.

Obliczone optymalne parametry obróbki powinny zapewnić uzyskanie wymaganej wartości parametru chropowatości Ra w granicach dopuszczalnych odchyłek przy uzyskaniu równocześnie możliwie największej wydajności i najkrótszego czasu obróbki w danej operacji.

Tablica 3. Optymalne parametry obróbki procesu polioptymalizacji dla zadanej Ra .

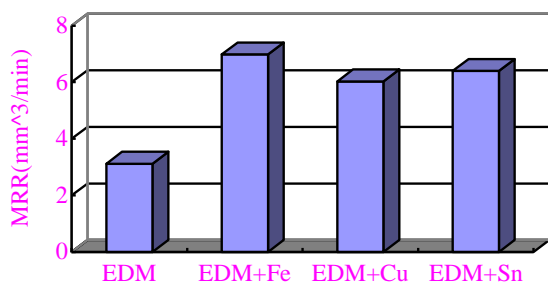
Rodz. proszku	Optymalne wartości wielkości użytkowych dla $Ra = 6.5 \pm 0.3$ [μm]	Optymalne parametry			
		I	t_{on}	t_{off}	g/l
		[A]	[μs]	[μs]	[g/l]
Sn	$Q_m = 24.040$ mm ³ /min $t = 19.014$ min $Ra = 6.370$ μm	5.76	9.00	148.59	59.6
Fe	$Q_m = 74.719$ mm ³ /min $t = 87.178$ min $Ra = 6.370$ μm	8.16	16.05	148.59	59.6
Cu	$Q_m = 31.572$ mm ³ /min $t = 8.055$ min $Ra = 6.600$ μm	8.32	9.00	148.60	20.0

Porównanie wpływu zastosowania proszków w dielektryku (EDM-Powder) z procesem EDM bez użycia proszków na parametr chropowatości Ra oraz wydajność objętościową przedstawiono na rys. 9 i 10.



($I = 4A$, $t_{on} = 100\mu s$, $t_{off} = 100\mu s$, $C = 30g/l$)

Rys. 9. Wpływ użycia proszków z różnych materiałów na parametr chropowatości powierzchni R_a



($I = 4A$, $t_{on} = 100\mu s$, $t_{off} = 100\mu s$, $C = 30g/l$)

Rys. 10. Wpływ użycia proszków z różnych materiałów na wydajność objętościową $Q_m = MRR$ [mm³/min]

LITERATURA:

1. Jianwu Yu, Praca doktorska, Warsaw University of Technology, Warszawa 2006.
2. Himmelblau D. M., Process Analysis by Statistical Methods, 1970.
3. Pogorzelski W., Teoria systemów i metody optymalizacji, OWPW, Warszawa 1996.
4. Stadnicki J., Teoria i praktyka rozwiązywania zadań optymalizacji, WNT, Warszawa 2006.
5. Kozak J, Rozenek M, Dabrowski L, 'Investigation of Electrical Discharge Machining Using Abrasive Powder Suspended Dielectric'. Transactions of WUT-New Technologies, vol. 3. 2000.
6. Mariusz Wardzinski, Prezentacja "Innowacyjne technologie w budowie maszyn", Agie Charmilles, Targi MACH-Tool, 2005.

Wnioski

Podsumowując rozważane zagadnienie można podać następujące najważniejsze wnioski:

- Optymalne parametry obróbki spełniające wymagane kryteria polioptymalizacji (optymalizacji wielocelowej) leżą w różnych punktach przestrzeni czynnikowej.
- Badania wykazują, że istnieje znaczny wpływ proszku przewodzącego rozpuszczonego w dielektryku na wielkość użytkowe procesu, a szczególnie na wydajność.
- Maksymalne wartości wydajności uzyskano w przypadku zastosowania proszku cyny i miedzi przy najmniejszej wartości natężenia prądu stosowanego w badaniach.
- Rozpatrując teoretyczny ładunek impulsu na wejściu $Q_w = I \cdot t_{on}$ należy stwierdzić, że największy ładunek impulsu zapewniający maksymalną wydajność występuje przy zastosowaniu proszku miedzi, następnie z żelaza, a najmniejszy jest przy zastosowaniu proszku z cyny. Przy czym należy zauważyć, że przy zastosowaniu proszku miedzi ładunek impulsu jest uzyskiwany przy stosunkowo długim czasie trwania impulsu i niskiej wartości natężenia prądu.
- Optymalne, czyli najkrótsze czasy wykonania tej samej operacji występują przy takich samych wartościach parametrów optymalnych, przy czym najkrótszy czas wykonania operacji drążenia wystąpił przy zastosowaniu proszku z miedzi, a następnie z żelaza i najdłuższy dla proszku z cyny.
- Najmniejszą wartość parametru R_a uzyskuje się przy zastosowaniu proszku z żelaza, następnie miedzi, a najgorszą przy zastosowaniu proszku z cyny.