

Sebastian Skoczypiec, Marcin Grabowski, Adam Ruszaj
Politechnika Krakowska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji

NIEKONWENCJONALNE METODY KSZTAŁTOWANIA MIKRONARZĘDZI WALCOWYCH

Streszczenie: W artykule przedstawiono przegląd wybranych sposobów niekonwencjonalnego kształtowania mikronarzędzi walcowych. Podstawowym kryterium wyboru była możliwość integracji na obrabiarce na której będzie wykonywane frezowanie elektrochemiczne lub elektroerozyjne. Przedstawiono również wyniki badań własnych elektrochemicznego i elektroerozyjnego mikrosztaltowania narzędzi walcowych.

1. Wprowadzenie

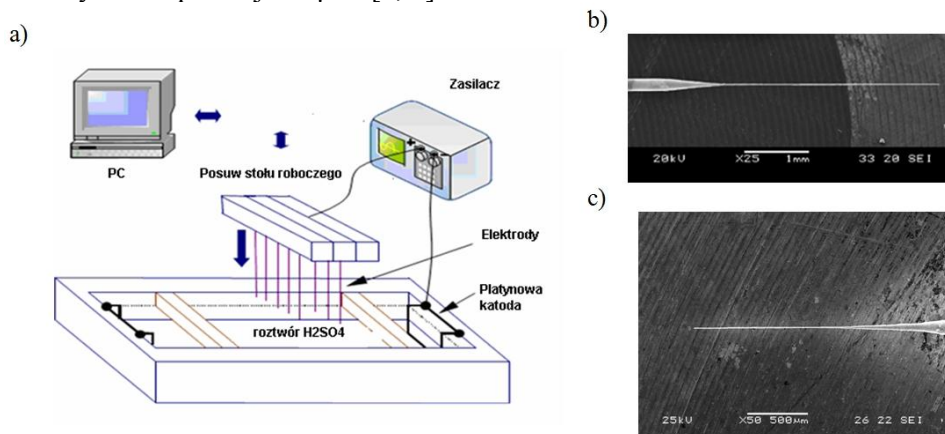
Możliwości zmniejszenia wymiarów frezowanych elektrochemicznie i elektroerozyjnie mikronarzędzi zależą zarówno od prawidłowego doboru parametrów procesu oraz wymiarów narzędzia. Im mniejsza średnica elektrody, tym większa rozdzielczość oraz dokładność kształtowania przedmiotu. W przypadku mikrofrezowania elektrochemicznego (3D-ECMM) i elektroerozyjnego (3D-EDMM) narzędziem jest pręt o prostym walcowym kształcie [8]. Poza prawidłowym doбором parametrów obróbki, jednym z podstawowych zagadnień technicznych jest zapewnienie odpowiedniego mocowania i sztywności części roboczej narzędzia (elektrody roboczej, ER).

W przypadku procesu mikrowiercenia elektroerozyjnego powyższe wymagania uzyskuje się poprzez zastosowanie skalibrowanej, współosiowej z wrzecionem obrabiarki i nieprzewodzącej prądu elektrycznego tulejki prowadzącej część roboczą elektrody. Umożliwia to zastosowanie na elektrody dostępnych na rynku drutów o średnicy nawet poniżej 0,02 mm. Jednak ze względu na kinematykę obróbki, nie można zastosować powyższego rozwiązania w procesie 3D-ECMM i 3D-EDMM. Najczęściej wykonuje się stopniowaną ER o prostym walcowym kształcie na tym samym stanowisku, na którym prowadzona jest dalsza obróbka (bez zmiany zamocowania narzędzia). Pozwala to na prowadzenie procesu elektrodami o średnicy poniżej 0,1 mm. Dlatego też, integralną częścią opracowania technologii elektrochemicznego i elektroerozyjnego kształtowania

mikronarzędzi, powinno być określenie możliwości kształtowania ER, przy założeniu że proces ten odbywa się na tej samej obrabiarce co frezowanie. Poniżej przedstawiony zostanie krótki przegląd spotykanych w literaturze rozwiązań spełniających powyższe kryteria.

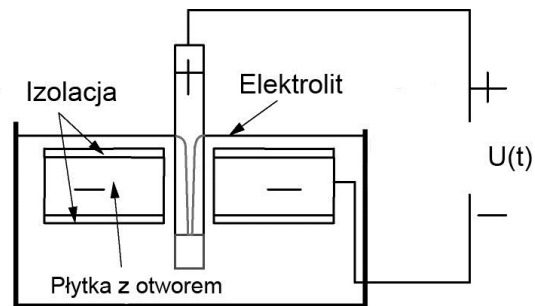
1.1. Sposoby elektrochemicznego kształtowania mikronarzędzi walcowych

Najpopularniejszym sposobem elektrochemicznego kształtowania elektrod walcowych, jest trawienie elektrochemiczne (Rys. 1), które polega na powolnym wyciąganiu końcówki elektrody, podłączonej do dodatniego źródła prądu, z roztworu elektrolitu, w którym zanurzona jest platynowa katoda. Odpowiednie sterowanie ruchem ER pozwala uzyskać stożkowy kształt części roboczej o średnicy nawet poniżej $< 5 \mu\text{m}$. [1, 6].



Rys. 1. Schemat przedstawiający wykonywanie elektrod trawieniem elektrochemicznym (a) oraz przykłady wykonanych elektrod (b,c).

Kolejnym sposobem spełniającym wymagania związane z możliwością zmniejszenia średnicy elektrody roboczej w tym samym zamocowaniu co dalsze frezowanie jest wykorzystanie otworu w podłączonej do ujemnego źródła prądu metalowej płytce (Rys. 2) [6].

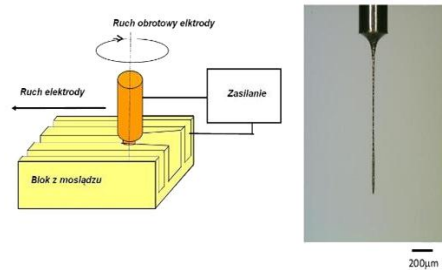


Rys. 2. Schemat elektrochemicznego kształtowania elektrody walcowej z zastosowaniem otworu w płytce [2].

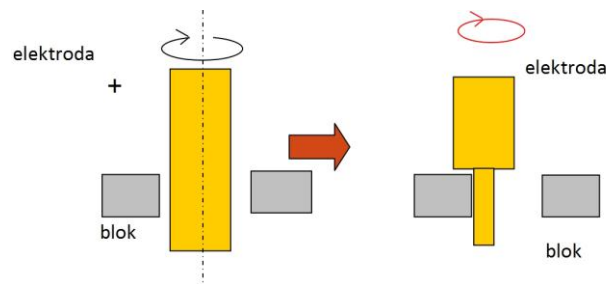
1.2. Sposoby elektroerozyjnego kształtowania mikronarzędzi walcowych

Istnieje szereg metod obróbki elektroerozyjnej pozwalających na wykonywanie części roboczych narzędzi z półfabrykatu w postaci metalowego pręta. W aspekcie tematyki analizowanej w artykule, na uwagę zasługują następujące metody [3, 5, 7]:

- kształtowanie za pomocą bloku (Rys. 3): kształtowana obracająca się elektroda wykonuje ruch posuwowy wzdłuż szczeliny o znanej szerokości wykonanej w metalowym bloku. Średnica uzyskanej w ten sposób elektrody zależy jest od szerokości szczeliny oraz parametrów obróbki;
- kształtowanie ruchem mimośrodowym elektrody (Rys. 4): elektroda wykonuje ruch obrotowy oraz planetarny;
- drutowe szlifowanie elektroerozyjne (Rys. 5): wirująca elektroda robocza kształtowana jest za pomocą cienkiego drutu ($0,1 \div 0,2$ mm), który jest przewijany po specjalnym przewodniku oraz polewany dielektrykiem. Powolny dosuw elektrody do drutu, oraz ruch w osi wzdłużnej elektrody, powoduje systematyczne usuwanie cienkich warstw materiału. W wyniku odpowiedniego sterowania ruchami elektrody możemy uzyskać dowolny osiowo-symetryczny kształt części roboczej narzędzia (np. o przekroju wielokąta).

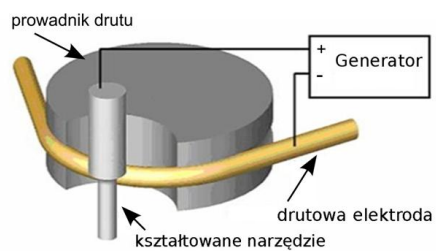


Rys. 3. Schemat oraz przykład możliwości kształtowania narzędzi z wykorzystaniem szczeliny w metalowym bloku.

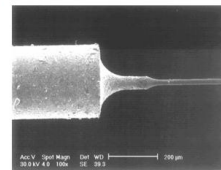


Rys. 4. Schemat elektroerozyjnego kształtowania części roboczej elektrody z wykorzystaniem ruchu mimośrodkowego.

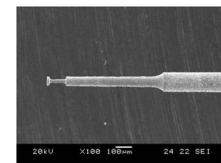
a)



b)



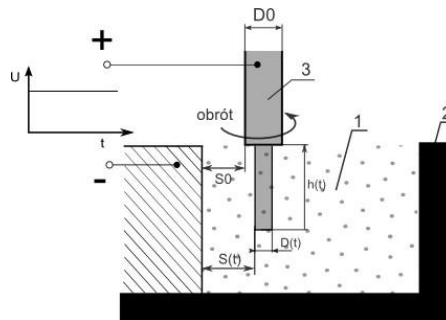
c)



Rys. 5. Schemat elektroerozyjnego kształtowania elektrod (a) oraz przykłady wykonanych narzędzi (b i c)

2. Badania doświadczalne elektrochemicznego kształtowania mikronarzędzi walcowych

Celem badań było opracowanie podstaw technologicznych kształtowania narzędzi do mikrofrezowania elektrochemicznego i elektroerozyjnego, przy założeniu, że proces ten odbywa się na tym samym stanowisku co dalsze mikrofrezowanie (w jednym zamocowaniu). Badania doświadczalne elektrochemicznego kształtowania mikronarzędzi walcowych przeprowadzono na opracowanym w Instytucie Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji Politechniki Krakowskiej stanowisku badawczym (szerzej zostało omówione w [9]). Kształtowanie odbywało się w waniencie wypełnionej elektrolitem - schemat przedstawiono na Rys. 6. Obracające się z prędkością 100 obr/min narzędzie (anoda) zanurzone było w elektrolicie w odległości S_0 od metalowego bloku (katoda). Celem badań było określenie zależności $D(t)$, gdzie D - średnica elektrody, t - czas od momentu załączenia napięcia międzyelektrodowego.



Rys. 6. Schemat elektrochemicznego kształtowania narzędzi walcowych w zanurzeniu.

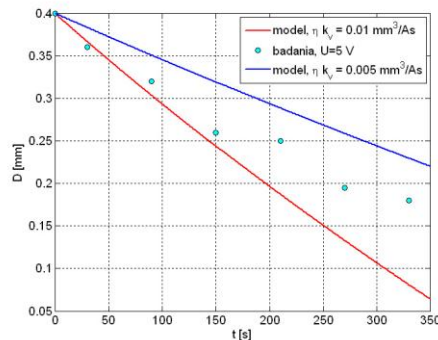
Proces kształtowania elektrody walcowej w kinematyce przedstawionej na Rys. może być zamodelowany, korzystając z równania opisującego zmianę szczeliny międzyelektrodowej S w czasie t przy obróbce elektrodą nieruchomą:

$$S(t) = \sqrt{2 \cdot \eta k_v \kappa (U - E) + S_0^2} \quad (1)$$

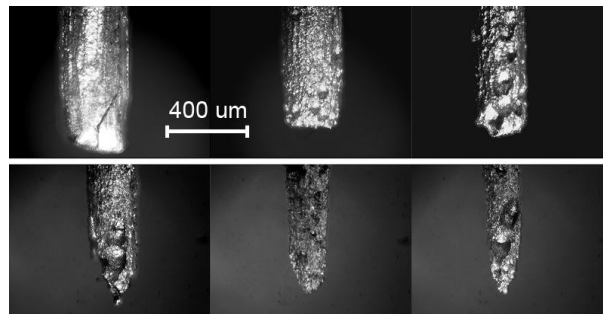
Badania rozpoznawcze przeprowadzono dla następujących parametrów:

- stałe napięcie międzyelektrodowe: $U=5\text{ V}$ i $U=15\text{ V}$,
- elektrolit: wodny r-r NaNO_3 , przewodność 15 mS/cm ,
- średnica początkowa ER: $D_0=0,4\text{ mm}$,
- początkowa odległość od płytki: $S_0=0,5\text{ mm}$,
- item materiał płytki: stal 0H18N9.

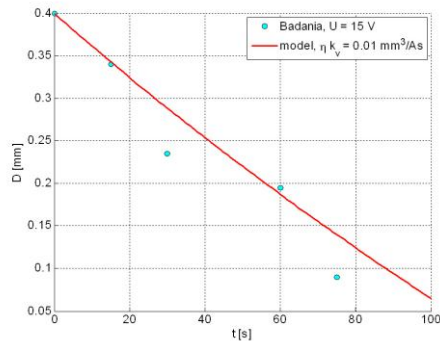
Uzyskane wyniki badań doświadczalnych przedstawione zostały na Rys. 7 – Rys. 11.



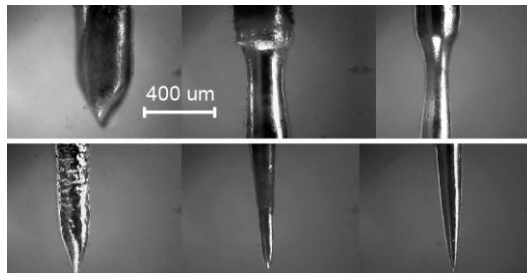
Rys. 7. Porównanie zmian średnicy elektrody walcowej dla $U=5\text{ V}$, z wynikami obliczeń otrzymanych na podstawie zależności (1) dla różnych wartości obrabialności elektrochemicznej η_{k_v} ; parametry symulacji: przewodność elektrolitu $\kappa=0,007\text{ A/V}$, $D_0=0,4\text{ mm}$, $S_0=0,5\text{ mm}$, spadek potencjału w szczelinie $E=1\text{ V}$.



Rys. 8. Fotografie przedstawiające zmiany średnicy i kształtu końca elektrody walcowej dla $U=5\text{ V}$.



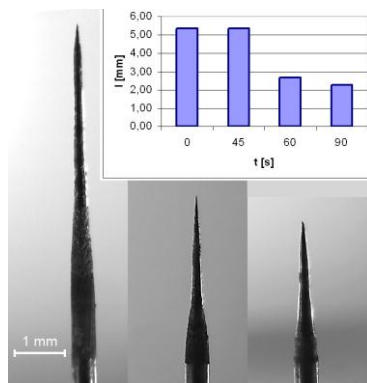
Rys. 9. Porównanie zmian średnicy elektrody walcowej dla $U=15\text{ V}$ z wynikami obliczeń otrzymanych na podstawie zależności (1) dla różnych wartości obrabialności elektrochemicznej ηk_v ; parametry symulacji: obrabialność elektrochemiczna $\eta k_v = 0,01\text{ mm}^3/\text{As}$, przewodność elektrolitu $\kappa=0,007\text{ A/V}$, $D_0=0,4\text{ mm}$, $S_0=0,5\text{ mm}$, spadek potencjału w szczelinie $E=1\text{ V}$.



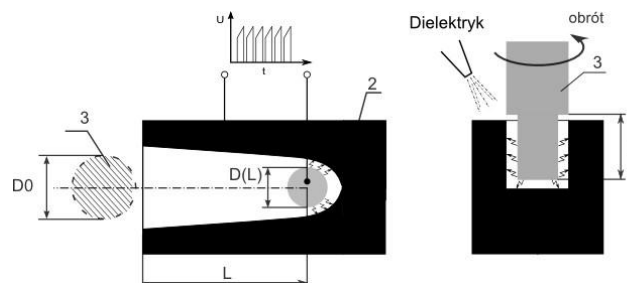
Rys. 10. Fotografie przedstawiające zmiany średnicy i kształtu końca elektrody walcowej dla $U=15\text{ V}$.

3. Badania doświadczalne elektroerozyjnego kształtowania mikronarzędzi walcowych

Schemat zastosowanego sposobu obróbki przedstawiono na Rys. 12. Elektroda walcowa była dosuwana do metalowego bloku. Wraz z zagłębianiem się elektrody następowało zmniejszenie średnicy elektrody obrabianej. Celem tych badań było określenie zależności $D(L)$ (oznaczenia zgodnie z Rys. 12).



Rys. 11. Zmiany kształtu i skrócenie elektrody w trakcie obróbki dla $U=15$ V.



Rys. 12. Schemat sposobu elektroerozyjnego kształtowania elektrody walcowej zastosowanego w trakcie badań; 2 - stalowy blok, 3 - kształtowana elektroda.

Badania zostały przeprowadzone dla dwóch materiałów: miedź (Cu) oraz węgiel wolframowy (WC) z zastosowaniem dwóch zasilaczy elektroerozyjnych. Na podstawie przeprowadzonych badań rozpoznawczych i prób wstępnych dobrane zostały następujące parametry badań:

- **Generator elektroerozyjny tranzystorowy BP-95:** amplituda natężenia prądu $I = 1$ A, czas impulsu $t_i=25$ μ s, czas przerwy dla Cu: $t_p=5$ μ s i $t_p=25$ μ s; dla WC: $t_p=100$ μ s.

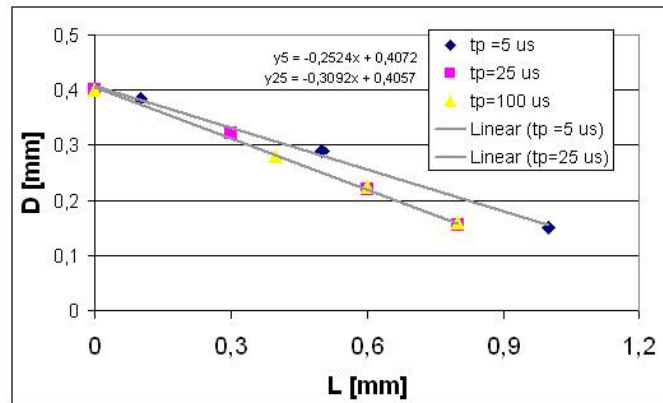
- **Zasilacz RC** (opis konstrukcji w [4]):
 - napięcie zapłonu $U=150$ V,
 - C1: $W_e = 55,1$ nJ, $f_t=8,33$ MHz, $t_i \sim 120$ ns,
 - C5: $W_e = 551$ nJ, $f_t=0,83$ MHz, $t_i \sim 1,2$ μ s,
 - C10: $W_e = 18,2$ μ J, $f_t = 25,2$ kHz, $t_i \sim 40$ μ s.

gdzie: W_e – teoretyczna energia wyładowania, f_t - teoretyczna częstosliwość wyładowań, t_i – teoretyczny czas wyładowania.

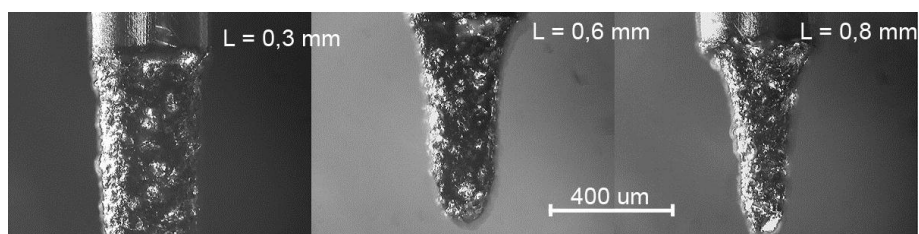
Pozostałe warunki badań:

- średnica początkowa ER: $D_0=0,4$ mm;
- dielektryk: Exsol D80,
- materiał płytki: stal 0H18N9.

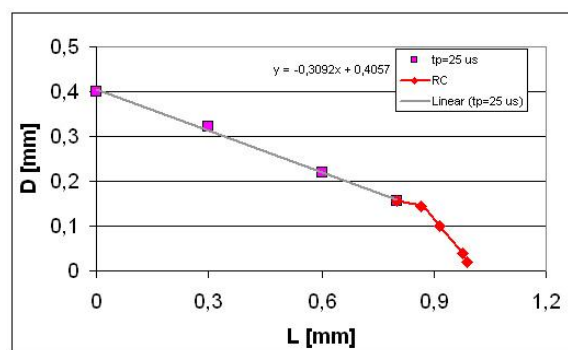
Przeprowadzone próby wstępne pokazały, że prowadzenie obróbki z automatycznym posuwem jest niemożliwe (konieczność prowadzenia prób przy jak najmniejszej prędkości posuwu ER), dlatego też zdecydowano, że wszystkie badania zostaną przeprowadzone z ręcznym dosuwem. Wyniki badań doświadczalnych przedstawione zostały na Rys. 13 – Rys. 19.



Rys. 13. Zależność $D(L)$ - zmiana średnicy narzędzia walcowego wraz z zagłębieniem się w metalowy blok dla czasu przerwy $t_p=5$ μ s i $t_p = 25$ μ s; pozostałe parametry: $t_i=25$ μ s, $I = 1$ A, materiał narzędzia - miedź.

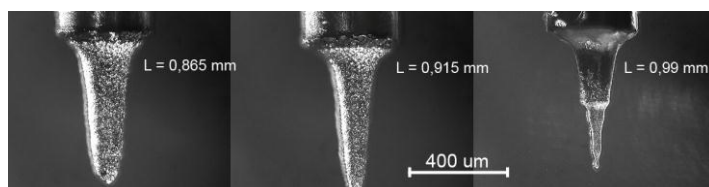


Rys. 14. Fotografie przedstawiające zmianę średnicy i kształtu narzędzia walcowego wraz z zagłębianiem się w metalowy blok dla $t_p = 25 \mu s$, $t_i = 25 \mu s$ $I = 1$ A, materiał narzędzia - miedź.

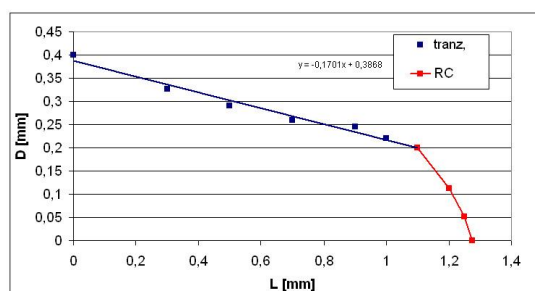


Głębokość L [mm]	Teor. energia wyładowania
0,865	55,1 nJ
0,915	55,1 nJ
0,978	551 nJ
0,990	18,2 μJ

Rys. 15. Zmiany średnicy narzędzia wraz z głębokością dosuwu, linia jasna - generator tranzystorowy ($t_p = 25 \mu s$, $t_i = 25 \mu s$ $I = 1$ A), linia ciemna - generator RC (teoretyczna energia wyładowań dla kolejnych etapów obróbki przedstawiono w tabeli poniżej rysunku), materiał elektrody: Cu.

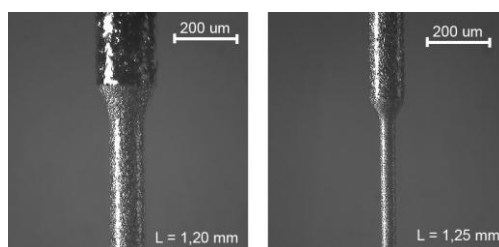


Rys. 16. Fotografie przedstawiające zmianę średnicy i kształtu narzędzia walcowego wraz z głębokością dosuwu dla generatora RC (teoretyczna energia wyładowań dla kolejnych etapów obróbki przedstawiono w tabeli poniżej Rys. 15), materiał elektrody: Cu.

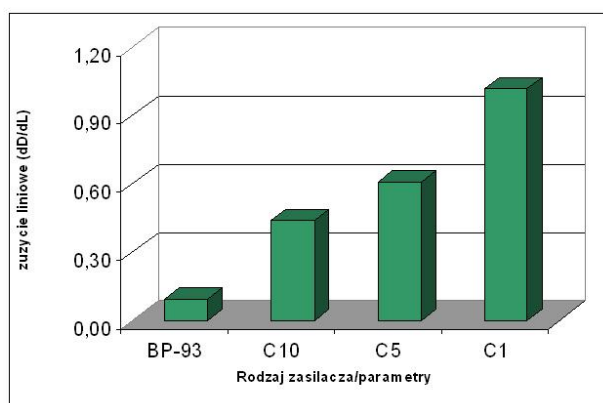


Głębokość L [mm]	Teor. energia wyładowania
1,20	55,1 nJ
1,25	551 nJ

Rys. 17. Zmiany średnicy narzędzia wraz z głębokością dosuwu, kolor granatowy - generator tranzystorowy ($t_p = 100 \mu s$, $t_i = 25 \mu s$, $I = 1 A$), kolor czerwony - generator RC (teoretyczną energię wyładowań dla kolejnych etapów przedstawiono w tabeli obok rysunku), materiał elektrody: WC.



Rys. 18. Fotografie przedstawiające zmianę średnicy i kształtu narzędzia walcowego wraz z głębokością dosuwu dla generatora RC (teoretyczną energię wyładowań dla kolejnych etapów przedstawiono w tabeli obok Rys. 17), materiał elektrody: WC.



Rys. 19. Porównanie zużycia liniowego dla zasilacza tranzystorowego BP-95 ($t_p = 100 \mu s$, $t_i = 25 \mu s$, $I = 1 A$) i zasilacza RC, materiał elektrody: WC.

4. Wnioski i z badań doświadczalnych. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych powyżej wyników badań elektrochemicznego i elektroerozyjnego kształtowania mikronarzędzi walcowych można sformułować następujące wnioski:

- obróbka elektrochemiczna pozwala na uzyskanie narzędzi o minimalnych średnicach 150 - 200 μm . Dalsze obróbka skutkuje jedynie skróceniem elektrody – Rys. 11,
- wyniki obróbki elektrochemicznej zależą od napięcia międzyelektrodowego - przykładowo dla napięcia $U = 5 V$ wyniki są niezadowalające (Rys. 8),
- kształtowanie elektrochemiczne jest wielokrotnie bardziej wydajne niż obróbka elektroerozyjna (zmniejszenie średnicy do 0,2 mm trwa kilkadziesiąt sekund),
- obróbka elektroerozyjna generatorem tranzystorowym BP-95 pozwala na zmniejszenie średnicy narzędzia jedynie do $\sim 0,2$ mm (poniżej tej wartości następowało ucięcie elektrody),

- jakość powierzchni po obróbce generatorem tranzystorowym jest niezadowalająca (Rys. 14),
- zastosowanie generatora RC umożliwia zmniejszenie średnicy kształtowanego narzędzia $< 50 \mu\text{m}$ oraz uzyskanie elektrody o wysokiej dokładności oraz jakości powierzchni (ze względu na wymiary uzyskanych narzędzi nie udało się zmierzyć chropowatości metodą stykową) - Rys. 16 i Rys. 18,
- kształtowanie elektroerozyjne generatorem RC jest mało wydajne, średnie prędkości kształtowania w trakcie badań były $\sim 0,005 \text{ mm/min}$;

Zaletą badanych metod, jest możliwość kształtowania elektrody na tym samym stanowisku (w tym samym mocowaniu), na którym prowadzona jest obróbka. Wymaga to jedynie wykonania odpowiedniego oprzyrządowania technologicznego i integracji odpowiednich procedur w ramach programu sterującego obrabiarką. Uzyskane w trakcie badań zależności $D(t)$ (Rys. 7 i Rys. 9) i $D(L)$ (Rys. 13, 15 i 17) oraz informacje o zużyciu linowym (Rys. 19) tworzą bazę danych technologicznych przy projektowaniu procesu. Należy również zwrócić uwagę, że kształtowanie narzędzia w tym samym uchwycie pozwala na minimalizację wpływu ewentualnych błędów zamocowania elektrody roboczej.

Jak widać z przedstawionych powyżej informacji technolog projektujący proces mikroobróbki elektrochemicznej i elektroerozyjnej ma do wyboru szereg metod kształtowania części roboczej elektrody. Jeżeli chodzi o możliwości technologiczne, to kształtowanie elektrochemiczne pozwala jedynie na wykonanie prostych walcowych kształtów, natomiast kształtowanie elektroerozyjne umożliwia elastyczne kształtowanie części roboczej elektrody. W zależności od zastosowanego sposobu możliwe jest wykonanie prostych elektrod walcowych (nawet o średnicy $< 50 \mu\text{m}$), elektrod o przekroju wielokąta (trójkąt, kwadrat itp) czy elektrod wielosekcyjnych. Warto również podkreślić, że przedstawione powyżej metody znajdują przede wszystkim zastosowanie do kształtowania narzędzi o prostych kształtach.

5. Literatura

- [1] Gmelin, T. ECMTEC Technology & Solutions. **2009**
- [2] Li, Y.; Ma, X.; Liu, G.; Hu, M. Yi, F. Fundamental Research on Electrochemical Micro-machining by Using Water as the Electrolyte Proceedings of the 16th International Symposium on Electromachining, **2010**, 307-311
- [3] Masuzawa, T.; Fujino, M.; Kobayashi, K.; Suzuki, T.; Kinoshita, N. Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-Machining CIRP Annals - Manufacturing Technology, **1985**, 34, 431 - 434
- [4] Mojzych, R. Opracowanie projektu i wykonanie prototypu generatora RC do mikroobrabiarki elektroerozyjnej. Praca magisterska. Politechnika Warszawska, **2008**
- [5] W. Menz, A. Schoth, C. Muller, R. Forster. Non-conventional machining for microsystems. In Proceedings of 3th International Euspen Conference, volume 1, page 3_7A, Eindhoven, May 25th_30th 2002. Keynote paper.
- [6] Park, B., Chu, C: Microfabrication by Electrochemical Machining and Deposition Proceedings of US-Korea Workshop on Miniaturization Technologies, **2004**
- [7] Schoth, A.; Förster, R. Menz W: Micro wire EDM for high aspect ratio 3D microstructuring of ceramics and metals Microsystem Technologies, **2005**, 11, 250-253
- [8] Skoczypiec, S.; Kozak, J. Ruszaj, A.: Wybrane problemy technologii elektrochemicznej i elektroerozyjnej mikro-narzędzi. Inżynieria Maszyn, **2009**, 14, 20-30
- [9] Skoczypiec, S.; Ruszaj, A.; Kozak, J.: The conception of EC/EDMM sequential process for micro-tools manufacturing. Proceedings of 5th International Conference on Advances in Production Engineering APE'2010, Warsaw University of Technology, **2010**