

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

Analiza procesu kształtowania REDM

Analysis of REDM process

ZBIGNIEW GULBINOWICZ

W referacie przedstawiono zagadnienie wpływu wybranych parametrów obróbki REDM (Rotary Electrical Discharge Machining) na kształt powierzchni po obróbce. Przedstawiono model matematyczny obróbki REDM. Przeprowadzono analizę procesu obróbki oraz wskazano metody kompensacji zużycia elektrody roboczej.

SŁOWA KLUCZOWE: EDM, REDM, kształtowanie.

The paper presents problem of the effect of REDM conditons on the shape of the working surface. The mathematical model for the analysis of REDM process is presented. The paper also presents analysis of REDM process. Methods for compensating of tool wear are identified.

KEYWORDS: EDM, REDM, shaping.

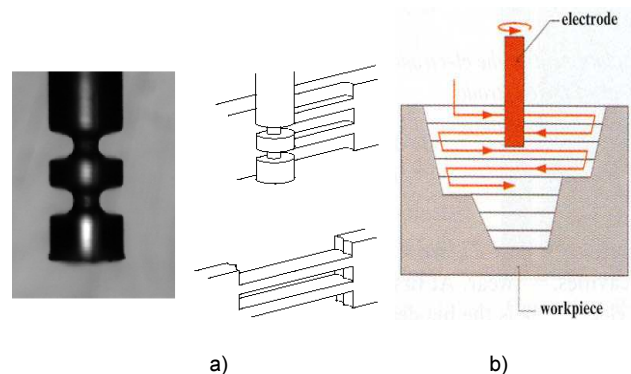
Wstęp

Jednym ze sposobów obróbki erozyjnej jest obróbka elektroerozyjna z użyciem narzędzi wirujących [2, 3, 5, 6]. W tym sposobie kształtowania określanym jako Rotary Electrical Discharge Machining (REDM) stosowana jest prosta, walcowa, uniwersalna elektroda robocza.

Wyróżniane są dwa warianty obróbki REDM:

- a) REDM powierzchnią boczną elektrody roboczej - inaczej frezowanie elektroerozyjne obwodowe (rys. 1a),

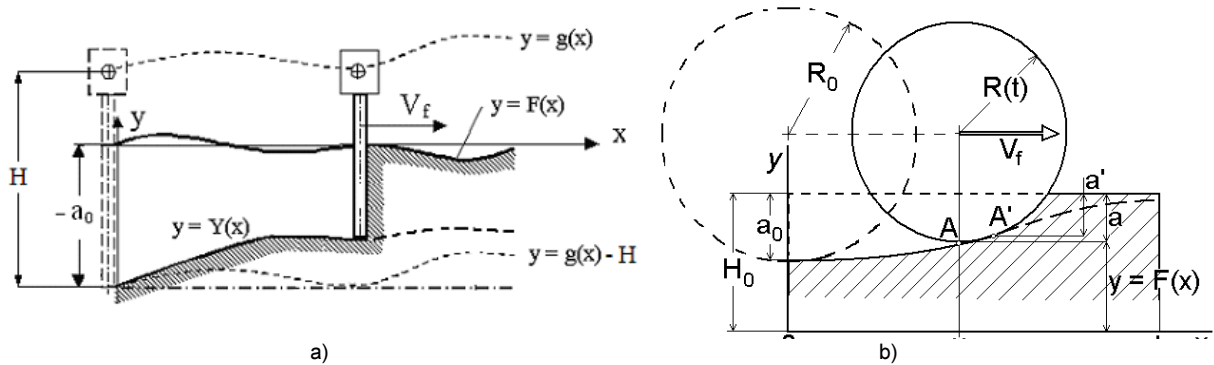
- b) REDM końcem elektrody roboczej - inaczej frezowanie elektroerozyjne czołowe (rys. 1b).



Rys. 1. Warianty REDM: a) powierzchnią boczną elektrody, b) końcem elektrody [4]

W doborze warunków kształtowania REDM należy uwzględnić wpływ zużycia elektrody roboczej na kształt powierzchni po obróbce. Dla analizy procesu kształtowania REDM opracowano model matematyczny REDM oraz na jego bazie przygotowano oprogramowanie komputerowe [1].

Model matematyczny procesu REDM



Rys. 2. Model obróbki REDM: a) końcem elektrody roboczej i b) powierzchnią boczną

W ramach zagadnienia analizy procesu kształtowania REDM opracowano model matematyczny zarówno dla obróbki REDM powierzchnią boczną jak i końcem elektrody roboczej. Model ten był już szczegółowo przedstawiany w literaturze [1]. Model matematyczny procesu REDM umożliwia znalezienie powiązań między kształtem/profilem końcowym powierzchni obrobionej $y = Y(x)$, a trajektorią ER $y = g(x)$ przy znanym profilu początkowym PO: $y = F(x)$ i zużyciu względnym v elektrody roboczej (Rys 2)

Otrzymane równanie (1) opisujące profil powierzchni obrobionej jest słuszne zarówno dla obróbki REDM powierzchnią boczną jak i końcem elektrody roboczej:

$$\frac{dF(x)}{dx} + m \cdot F(x) = m \cdot f(x) + \frac{dg(x)}{dx} \quad (1)$$

gdzie: $m = \frac{v}{2\pi R_0}$

Błąd kształtu powierzchni obrobionej wyznaczono jako różnicę głębokości obróbki początkowej i końcowej otrzymano zależność:

$$h = a_0 - a_k \quad (2)$$

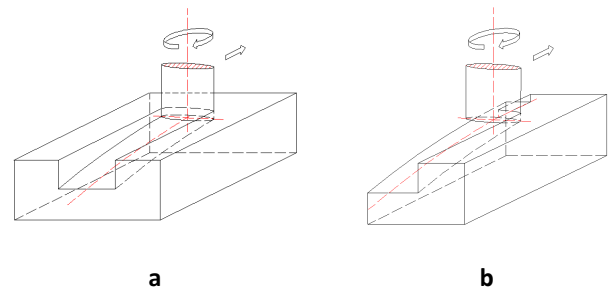
Bardzo ważnym zagadnieniem jest znalezienie rozwiązania problemu odwrotnego, czyli znalezienie parametrów wejściowych przy znanych/oczekiwanych parametrach wyjściowych. Rozwiązanie problemu odwrotnego dla trajektorii narzędzia ma postać (3):

$$g(x) = g(0) + F(x) - F(0) + \int_0^x [F(x) - f(x)] dx \quad (3)$$

Zużycie narzędzia może być skompensowane przez jego ruch lub poprzez ruch przedmiotu obrabianego wzdłuż osi y (4). Dzięki kompensacji zużycia elektrody roboczej poprzez jej ruch, można uzyskać płaską powierzchnię obrabianą.

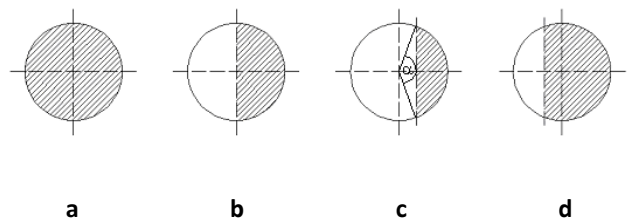
$$y = g(x) = H + R_0 - a_0 \cdot m \cdot x \quad (4)$$

Obróbka może być prowadzona całą powierzchnią czoła (Rys. 3a) lub tylko pewną jej częścią (Rys. 3b).



Rys. 3. Obróbka powierzchnią czołową ER: a) całą powierzchnią b) częścią powierzchni

Ponieważ w czasie obróbki, elektrodzie roboczej nadawany jest ruch obrotowy i posuwowy, w obu przypadkach elektroda robocza zużywa się na całej powierzchni czoła. Dla przypadku obróbki częścią powierzchni zużycie elektrody jest mniejsze, co wpływa na wartość stałej m w równaniu (1).



Rys. 4. Zasadnicze przypadki obróbek powierzchnią czołową elektrody (powierzchnię biorącą udział w obróbce oznaczono poprzez zakreskowanie)

W zależności od przypadku obróbki, których schematy pokazano na rysunku 4, wartości stałej m opisane są następującymi zależnościami,

dla przypadku (b):

$$m_b = \frac{4 \cdot (R_0 + S_b) \cdot v}{\pi \cdot R_0^2} \quad (5)$$

dla przypadku (c):

$$m_c = \frac{[4 \cdot R_0 + (\alpha - \sin \alpha) \cdot (R_1^2 - R_0^2)] \cdot v}{\alpha \cdot R_0^2 - R_0^2 \cdot \sin \alpha} \quad (6)$$

dla przypadku (d):

$$m_d = \frac{[4 \cdot (R_0 + S_b) - (\alpha - \sin \alpha) \cdot (R_1^2 - R_0^2)] \cdot v}{R_0^2 \cdot (2 \cdot \pi - \alpha + \sin \alpha)} \quad (7)$$

gdzie: $R_1 = R_0 + S_b$, S_b - szczelina robocza

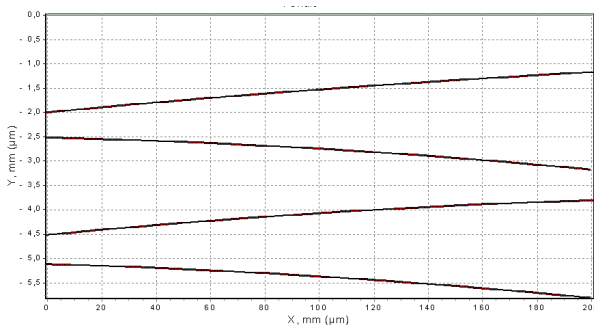
Na podstawie otrzymanego modelu matematycznego zostało opracowane oprogramowanie do symulacji komputerowej procesu kształtowania REDM, pozwalające określić wpływ podstawowych warunków REDM na dokładność obróbki oraz przeprowadzić optymalizację trajektorii elektrody roboczej. Symulacja komputerowa może być wykorzystana do optymalizacji warunków obróbki REDM w celu minimalizacji niedokładności oraz do planowania i sterowania ruchami roboczymi.

W celu przedstawienia zastosowania symulacji komputerowej do analizy procesu REDM poniżej przedstawiono wyniki dla wybranych przypadków REDM mających miejsce w praktyce procesu.

Wielokrotne przejścia narzędzia

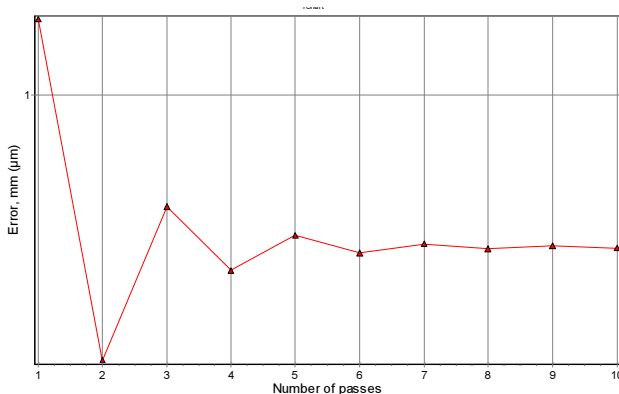
W czasie obróbki, pożądany kształt powierzchni obrabianej uzyskuje się poprzez wielokrotne przejścia elektrody roboczej (tzw. wierszowanie) i zdejmowanie kolejnych niewielkich warstw materiału. Z uwagi na zużycie elektrody roboczej w czasie obróbki w każdym przejściu występuje błąd kształtu powierzchni obrabianej (2). Po pierwszym przejściu ER jest ona zagłębiana na głębokość a_0 i wykonuje ruch powrotny obrabiając PO. Następnie ER jest ponownie zagłębiana i cykl się powtarza.

Przykład symulacji kolejnych przejść narzędzia przy obróbce powierzchnią boczną przedstawiony jest na rysunku 5.



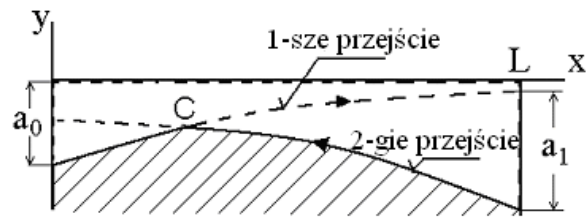
Rys. 5. Profile PO po kolejnych przejściach narzędzia dla $a_0 = 2 \text{ mm}$, $v = 0,3$

Powierzchnia po obróbce dla przejścia $N-1$ jest powierzchnią początkową dla kolejnego przejścia N . Wpływa to na błąd kształtu jak pokazano na rysunku 6. Symulacje wykazały, że błąd stabilizuje się po około 6 – 7 przejściach i jest stały dla stałych warunków obróbki.



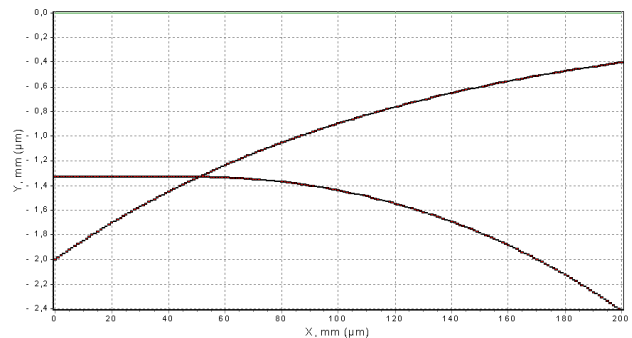
Rys. 6. Wykres błędu kształtu dla kolejnych przejść $N = 10$

Przy dużym zużyciu elektrody roboczej może zaistnieć sytuacja, gdy przy ruchu powrotnym narzędzie wyjdzie z materiału obrabianego i będzie wykonywało ruch jałowy (rys. 7). Następne zagłębienie się elektrody w materiale będzie mniejsze od a_0 , co znacznie zmniejszy wydajność procesu obróbki.



Rys. 7. Profil PO przy wyjściu narzędzia z materiału obrabianego

Przykład symulacji dla przypadku obróbki końcem elektrody gdy elektroda robocza wychodzi z materiału obrabianego przedstawiony jest na rysunku 8.

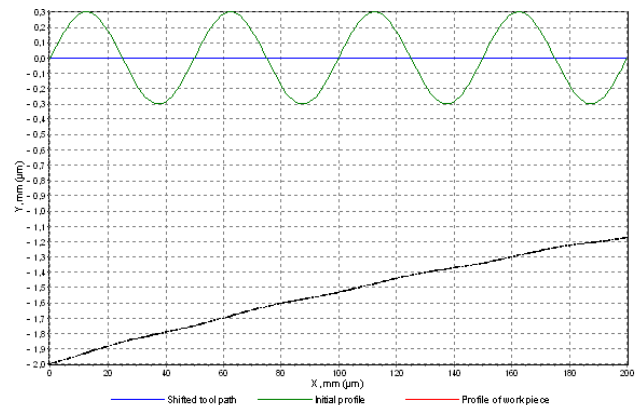


Rys. 8. Profile PO po dwóch przejściach narzędzia dla $a_0 = 2 \text{ mm}$, $v = 0,3$

Wpływ nierówności powierzchni początkowej

Na rysunku 9 pokazano wykres przedstawiający powierzchnię przedmiotu przed i po obróbce REDM, gdy powierzchnia początkowa miała falistość opisaną funkcją $y = a_0 \sin(8\pi x/L)$ gdzie: $a_0 = 2 \text{ mm}$, $L = 200 \text{ mm}$. Obróbka PO odbywała się powierzchnią boczną ER.

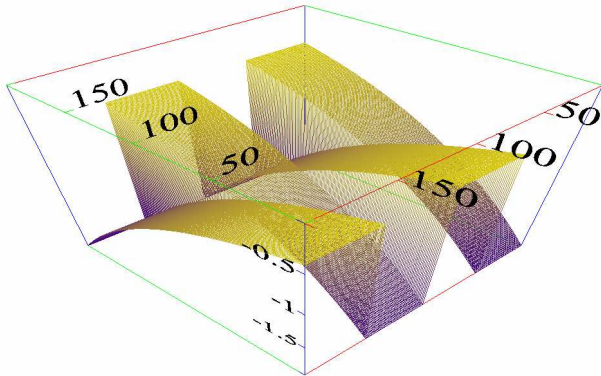
Tor narzędzia jest równoległy do podstawy przedmiotu tj. $g(x) = H_0 - a_0 + R_0 = \text{constant}$.



Rys. 9. Profile PO przy powierzchni początkowej $y = a_0 \sin(8\pi x/L)$, dla $a_0 = 2 \text{ mm}$, $v = 0,1$

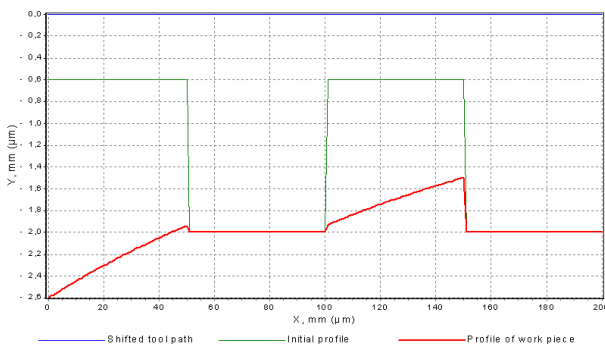
Wynikiem obróbki w tym przypadku jest profil zbliżony do krzywej wykładniczej z nałożoną falistością szczałkową, którą można traktować jako nierówność powierzchni początkowej.

W przypadku obróbki wierszowaniem powierzchni elektrodą roboczą otrzymamy powierzchnię jak na rysunku 10.



Rys. 10. Powierzchnia po obróbce dla kolejnych przejść elektrody

W celu wyeliminowania powstałych nierówności stosujemy wierszowanie naprzemienne. Profil po przejściu elektrody w poprzek pokazano na rysunku 11.

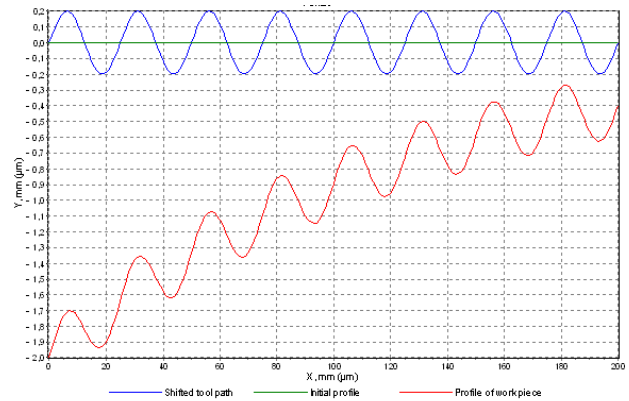


Rys. 11. Powierzchnia po obróbce dla toru elektrody w poprzek nierówności

Dobór odpowiedniego toru narzędzia pozwala na eliminację powstałych nierówności wynikających z zużycia elektrody roboczej.

Wpływ vibracji elektrody roboczej

Wynik symulacji wpływu vibracji narzędzia w czasie obróbki powierzchnią boczną elektrody na kształt końcowy został pokazany na rysunku 12. Można zaobserwować, że oscylacje elektrody zostały odwzorowane na powierzchni obrabianej, która w wyniku zużycia ER staje się powierzchnią krzywoliniową. Można stąd wnioskować o znacznej czułości procesu REDM na ruchy elektrody, co jest pozytywną cechą procesu świadcząca o wysokiej dokładności odwzorowania ruchów narzędzia w materiale obrabianym.



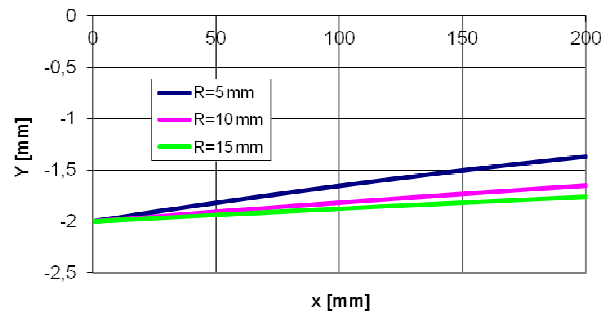
Rys. 12. Profile PO przy ruchu $g=0,2\sin(16\pi x/L)$, narzędzia dla $a_0 = 2 \text{ mm}$, $v = 0,3$, $L=200 \text{ mm}$

Stosując różne częstotliwości oraz amplitudę drgań ER można przeprowadzić dalsze badania procesu REDM jako obiektu sterowania. Drgania elektrody roboczej są wówczas funkcją na wejściu obiektu natomiast profil jest odpowiedzią, stąd można uzyskać charakterystykę amplitudowo – fazowo – częstotliwościową REDM jako obiektu sterowania.

Wpływ parametrów R_0 , a_0 , i v na niedokładność kształtu powierzchni obrabianej

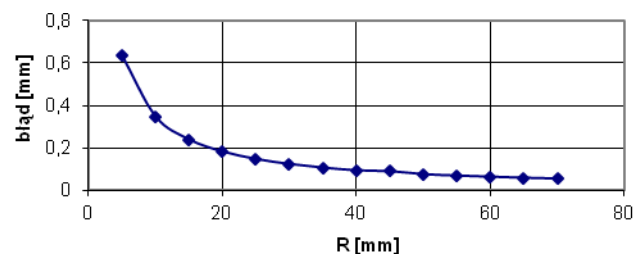
Przeanalizowano także wpływ R_0 , a_0 , i v na niedokładność kształtu powierzchni obrabianej.

Z przeprowadzonych symulacji wynika, że błąd kształtu maleje wraz ze wzrostem promienia elektrody roboczej R (rys. 13).



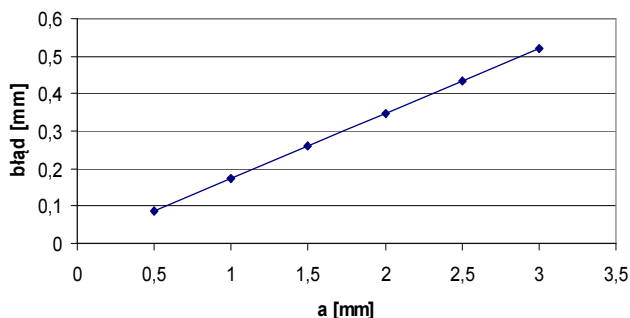
Rys. 13. Profile PO dla różnych R_0 , $a_0 = 1,5 \text{ mm}$, $v = 0,03$, $L=200 \text{ mm}$

Przy promieniach R znacznie większych od głębokości a_0 ($R/a_0 > 20$) wpływ promienia na błąd kształtu nie jest znaczący (rys. 14).



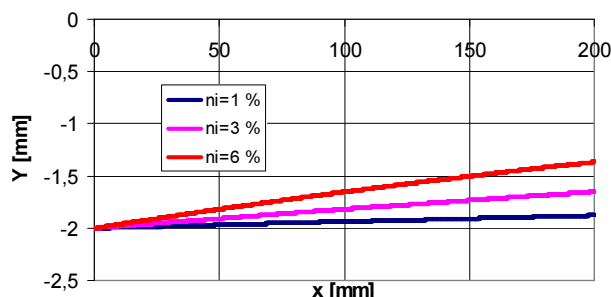
Rys. 14. Błąd kształtu PO w zależności od R_0 ER, $a_0 = 1,5 \text{ mm}$, $v = 0,03$, $L=200 \text{ mm}$

Podobnie jak dla promienia, wyznaczono zależność błęd kształtu od początkowej głębokości obróbki a_0 (rys. 15). Wraz ze zwiększeniem grubości usuwanego naddatku, błąd końcowy kształtu PO rośnie.



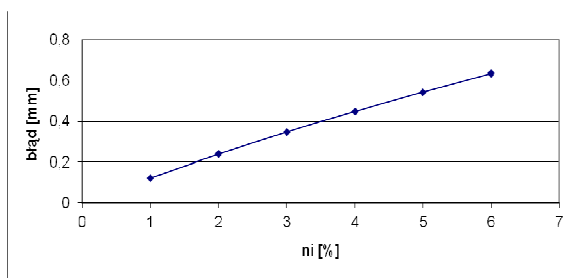
Rys. 15. Błąd kształtu PO w zależności od głębokości a_0 , $R_0 = 10\text{mm}$, $v = 0,03$

Przeanalizowano również wpływ wartości współczynnika względnego zużycia elektrody roboczej v na kształt powierzchni obrabianej (rys. 16).



Rys. 16. Profile PO dla różnych v

Jak możemy zaobserwować na rysunku 17 zależność błęd kształtu od współczynnika względnego zużycia elektrody roboczej v jest liniowa.

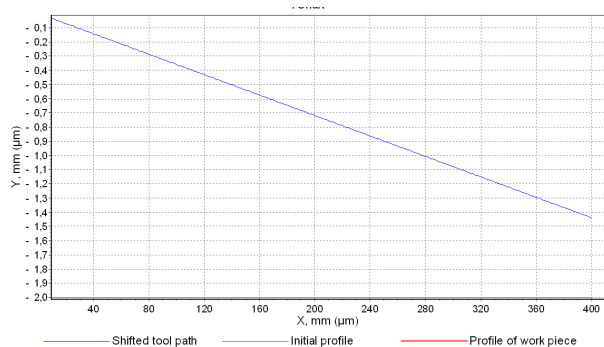


Rys. 17. Błąd kształtu PO w zależności od współczynnika względnego zużycia v , $R_0 = 10\text{mm}$, $a_0 = 2$

Kompensacja zużycia elektrody roboczej

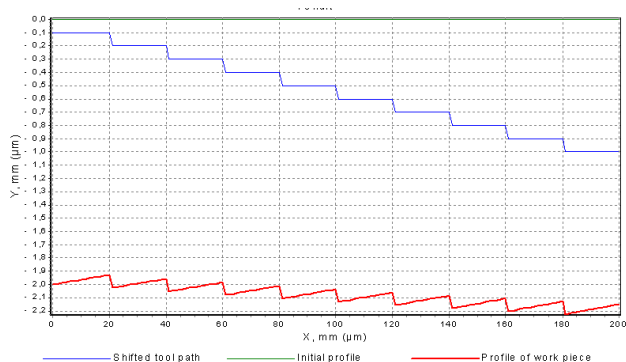
Na rysunku 18 przedstawiono wyniki symulacji procesu REDM przy zastosowaniu liniowego toru ruchu elektrody roboczej Y , ze stałą prędkością opisaną funkcją według równania (4). Dla tego toru ruchu elektrody roboczej błąd został całkowicie skompensowany. Obróbka była prowadzona powierzchnią boczną elektrody roboczej.

Jak widać z przebiegu profilu obrobionego nastąpiło znaczne wyrównanie powierzchni a linią średnią profilu jest równoległa do osi x , co świadczy o eliminacji wpływu zużycia ER.



Rys. 18. Profil powierzchni obrobionej przy liniowym torze elektrody roboczej opisaną funkcją $f(x) = -0,0036x$, $R_0 = 55\text{mm}$, $a_0 = 2$, $v = 0,3$, $L = 400\text{mm}$

Na rysunku 19 przedstawiono kompensację zużycia elektrody roboczej gdy tor narzędzia jest funkcją schodkową. Taki tor narzędzia może wystąpić gdy układ napędowy jest skokowy.



Rys. 19. Profil powierzchni obrobionej przy schodkowym torze narzędzia

Podsumowanie

W oparciu o opracowany model matematyczny, przeprowadzono analizę procesu kształtowania REDM z uwzględnieniem wpływu powierzchni początkowej, promienia i zużycia elektrody roboczej oraz ruchu elektrody roboczej. Przeprowadzone badania weryfikacyjne [1] wykazały zadowalającą adekwatność modelu teoretycznego z wynikami doświadczeń, co pozwala wnioskować o przydatności praktycznej modelu.

Opracowany model matematyczny i program do symulacji komputerowej można wykorzystać w zastosowaniu praktycznym w szczególności do:

- wyznaczania trajektorii elektrody roboczej,
- analizy dokładności,
- optymalizacji procesu.

LITERATURA

1. Kozak J., Gulbinowicz Z., "The Mathematical Modeling and Computer Simulation of Rotating Electrical Discharge Machining" rozdział w MACHINE LEARNING AND SYSTEMS ENGINEERING, Ed. Siolong Ao, Burghard Rieger and Mahyar A. Amouzegar, Lecture Notes in Electrical Engineering Volume 68, 2010, DOI: 10.1007/978-90-481-9419-3, pp183-195.
2. Rajurkar K.P., Yu Z., Kozak J.: Micromachining by EDM and ECM. CIRP Seminar on Micro and Nano Technology, Copenhagen, 2003.
3. Rajurkar K.P., Yu Z.Y.: 3D Micro EDM Using CAD/CAM, Annals of the CIRP, Vol. 49/1, 2000, s.127-130.

4. Reynaerts, D; Meeusen, W; Van Brussel, H; Reyntjens, S; Puers, R.: Production of seismic mass suspensions in silicon by electro-discharge machining. J MICROM M, 9(2), 1999, s. 206-210.
5. Richard J., Demellayer R.: Micro-EDM-milling Development of new machining technology for micro-machining. Proceedings of the Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM 2013). Vol 6 pp. 292-296.
6. Yu Z.Y., Kozak J., Rajurkar K.P.: Modeling and Simulation of Micro EDM Process, Ann. CIRP, vol.52, 2003.