

Lucjan DĄBROWSKI¹
Dorota ONISZCZUK¹

MODELOWANIE ZJAWISK FIZYCZNYCH W SZCZELINIE MIĘDZYELEKTRODOWEJ PODCZAS WYCINANIA ELEKTROEROZYJNEGO

Wycinanie elektroerozyjne WEDM zaliczane jest do precyzyjnych metod kształtowania przedmiotów zarówno o prostej jak i złożonej geometrii. Błędy kształtu w procesie WEDM zależą od wielu czynników, m.in. drgań drutu wywołanych przepływającym dielektrykiem, wysokości ciętego materiału oraz nierównomiernego rozkładu produktów obróbki w szczeliny międzyelektrodowej. W artykule przedstawiono modelowanie zjawisk fizycznych odzwierciedlających warunki panujące w szczeliny podczas wycinania elektroerozyjnego. Wyznaczono teoretyczne wartości prędkości przepływającego dielektryka.

1. WPROWADZENIE

Wycinanie elektroerozyjne WEDM jest odmianą obróbki ubytkowej, umożliwiającej kształtowanie skomplikowanych części, trudnych lub niemożliwych do wykonania innymi metodami, np. obróbką skrawaniem. W procesie WEDM za usuwanie materiału z przedmiotu obrabianego odpowiedzialne są wyładowania elektryczne, zachodzące w szczeliny pomiędzy elektrodą roboczą (cienkim drutem najczęściej mosiężnym o średnicy 0,02 - 0,5mm) a materiałem obrabianym. Elektrody izolowane są od siebie przepływającym dielektrykiem [5].

W zależności od zakładanej chropowatości powierzchni i dokładności wykonania, proces wycinania elektroerozyjnego WEDM przebiega w kilku przejściach, począwszy od obróbki zgrubnej po kształtującą i wygładzanie. Liczba przejść dla obróbki wykańczającej i wygładzającej głównie zależy od błędów kształtu powstałych przy wycinaniu zgrubnym. Zmniejszenie liczby przejść podczas procesu WEDM przy otrzymaniu zakładanej dokładności wymiarowo – kształtowej znacznie skraca czas trwania obróbki, a tym samym zmniejsza koszty związane z wytworzeniem danej części [3].

Podczas obróbki WEDM na elektrodę roboczą działają zmienne w czasie, losowe siły, które determinują powstawanie błędów kształtu. Siły występujące podczas procesu wycinania elektroerozyjnego wynikają przede wszystkim z:

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, Instytut Technik Wytwarzania

- drgań drutu wywołanych wyładowaniami elektrycznymi, które nie są równomierne na całej długości ciętego materiału. Zwiększona liczba wyładowań znajduje się w miejscu zderzenia dwóch strug dielektryka, tam, gdzie koncentracja produktów obróbki jest największa [5],
- wysokości ciętego materiału. Wraz ze wzrostem wysokości ciętego przedmiotu zwiększa się ilość usuniętego materiału, następuje jonizacja dielektryka, czego skutkiem jest większe rozpalenie szczeliny międzyelektrodowej (produkty obróbki ułatwiają przebicie elektryczne) [1],[4],[5],
- pulsacji dielektryka związanych z nierównomiernym ciśnieniem jego podawania do szczeliny międzyelektrodowej. W wyniku różnicy ciśnień drut ulega odkształceniu oraz wprowadzony może być w ruch drgający [5].

2. MODELOWANIE Z ZASTOSOWANIEM PROGRAMU FLOW SIMULATION

Modelowanie przepływu dielektryka w szczelinie międzyelektrodowej wykonano z zastosowaniem programu Flow Simulation. Obliczenia wykonane w tym programie bazują na metodzie skończonych objętości (Finite Volume Method). Jest to jedna z metod numerycznych rozwiązywania zagadnień przepływu, które są opisane przez równania różniczkowe cząstkowe. Metoda opiera się na twierdzeniu Gaussa-Ostrogradskiego (twierdzeniu o dywergencji), które polega na przekształceniu całki po objętości V ograniczonej powierzchnią A na całkę po zamkniętej powierzchni A (dla dowolnej funkcji wektorowej K). Początkowy strumień wektora K przechodzący przez powierzchnię A jest równy całce objętościowej z dywergencji pola wektorowego K po objętości V zamkniętej powierzchnią A [7].

$$\oint_A K dA = \oint_V \operatorname{div} K dV \quad (1)$$

gdzie:

K : strumień wektora,

A : zamknięta powierzchnia,

V : objętość ograniczona powierzchnią A .

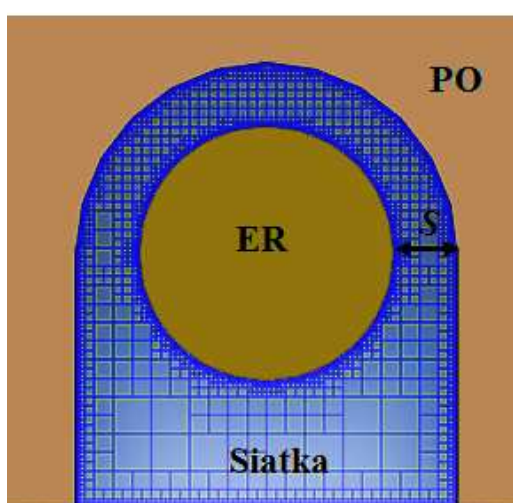
Model geometryczny przepływu przekształcony zostaje z postaci ciągłej w zbiór komórek o pewnej objętości, które otaczają każdy węzeł siatki. Węzły znajdują się w całym obszarze cieczy. W każdej komórce wymagane jest spełnienie warunku opisanego przez równanie różniczkowe. Wynikiem są równania dyskretne opisujące przepływ cieczy [6].

1.1. SIATKA ELEMENTÓW

W celu określenia zjawisk fizycznych panujących w szczelinie międzyelektrodowej podczas wycinania elektroerozyjnego WEDM i ich wpływu na efekty obróbki, zamodelowano przepływ dielektryka dla:

- przedmiotu obrabianego (PO) o wysokości cięcia $h = 10\text{mm}$,
- elektrody roboczej (ER) - drutu mosiężnego o średnicy $\phi 0,25\text{mm}$,
- szczeliny międzyelektrodowej (S) o wielkości $S = 0,063\text{mm}$.

Przed przystąpieniem do obliczeń wyznaczono siatkę elementów skończonych. W miejscach istotnych, np. w narożach elementu ciętego, bądź elektrody roboczej siatka została lokalnie zagęszczona, natomiast tam, gdzie dielektryk swobodnie wypływa – uproszczona (rys. 1). Liczba elementów z jakiej zbudowano model ściśle powiązana jest z wysokością materiału ciętego. Liczba elementów rośnie proporcjonalnie wraz ze wzrostem długości przedmiotu. Utworzona siatka jest optymalna pod względem czasu i dokładności wykonywanych obliczeń [2].

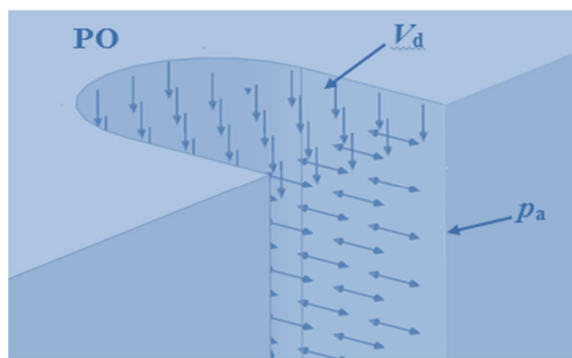


Rys. 1. Utworzona siatka elementów skończonych
Fig. 1. Finite volume element mesh

Szczelina międzyelektrodowa S została zbudowana z 1 114 420 elementów sześciennych. Wykorzystanie tak dużej liczby elementów pozwala na bardzo dokładne obliczenia, a przez to odzwierciedla warunki zbliżone do rzeczywistych, które panują pomiędzy elektrodą roboczą, a materiałem obrabianym podczas WEDM.

1.2. WARUNKI BRZEGOWE

Warunki brzegowe określono zgodnie z rzeczywistymi, jakie panują w szczelinie podczas wycinania elektroerozyjnego. Dielektryk (woda dejonizowana) podawany był do szczeliny międzyelektrodowej zarówno z dyszy górnej jak i dolnej. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wypływu dielektryka w danej jednostce czasu, określono wydatek objętościowy. Przyjęto, iż dielektryk bezpośrednio wpływa do szczeliny tj. nie uwzględniono odległości dysz od materiału ciętego. Uzyskane wyniki posłużyły do wyznaczenia prędkości wypływu dielektryka z dysz V_d . W miejscu swobodnego wypływu cieczy ze szczeliny międzyelektrodowej panuje ciśnienie atmosferyczne p_a (rys. 2).



Rys. 2. Zdefiniowane warunki brzegowe
Fig. 2. Defined boundary conditions

Założenia do modelu:

- prędkość wypływu dielektryka z dysz $V_d = 30\text{m/s}$,
- ciśnienie atmosferyczne p_a ,
- dielektryk - dielektryk.

Uproszczenia modelu:

- brak uwzględnienia dynamiki drutu, w tym jego drgań,
- brak uwzględnienia fazy gazowej i stałej,
- brak uwzględnienia odległości dysz od materiału ciętego.

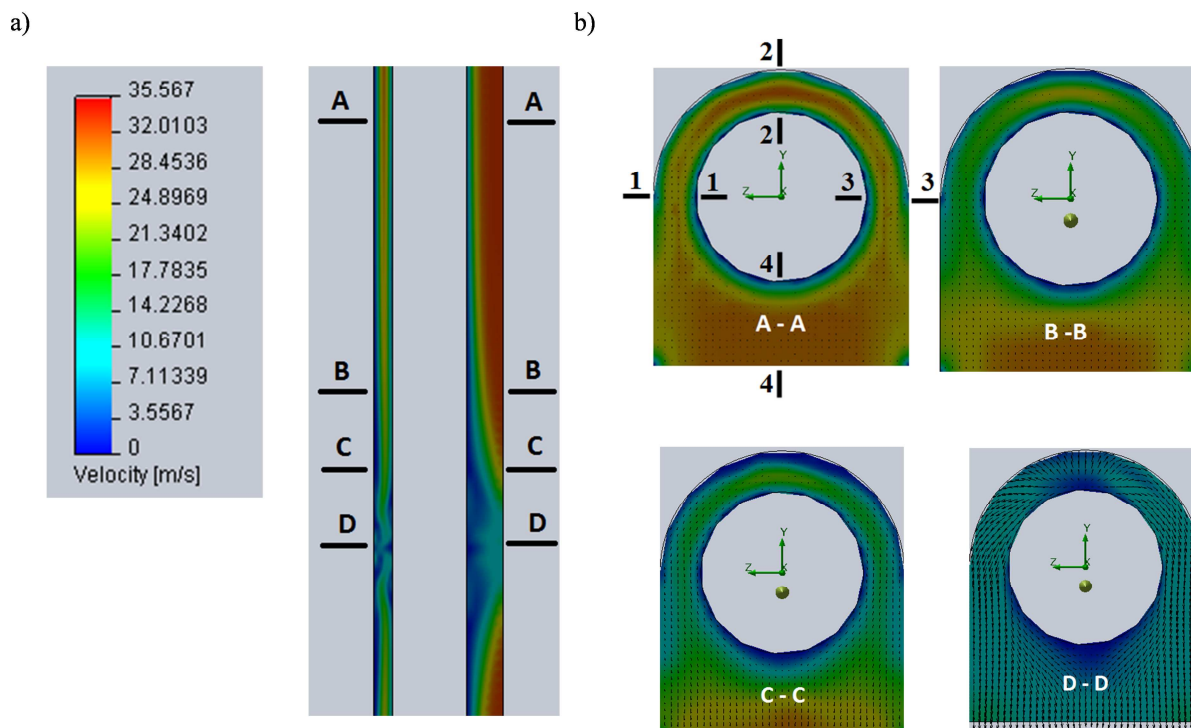
1.3. ANALIZA OTRZYMANYCH WYNIKÓW MODELOWANIA

Czas trwania obliczeń przepływu dielektryka zależny był od parametrów geometrycznych materiału ciętego, wyznaczonej liczby elementów znajdującej się w szczelinie międzyelektrodowej oraz zdefiniowanych warunków brzegowych. Dla opisanego przypadku całkowity czas obliczeń wyniósł 4h 35min.

W dalszej części przedstawiono wyniki modelowania przepływu dielektryka w szczelinie pomiędzy elektrodą roboczą a materiałem obrabianym. Wyznaczono rozkład prędkości cieczy w szczelinie, w przekroju wzdłużnym oraz poprzecznym (rys. 3). Przekroje poprzeczne określono na różnych wysokościach materiału ciętego:

- przekrój A - A: na wysokości 2mm,
- przekrój B - B: na wysokości 4mm,
- przekrój C - C: na wysokości 4,5mm,
- przekrój D - D: na wysokości 5mm.

Przekrój poprzeczny umożliwia dokładne zaobserwowanie rozkładu prędkości występującego w szczelinie na danej wysokości. Rozkład prędkości dielektryka w szczelinie jest symetryczny i uzależniony od charakteru przepływu cieczy: laminarny lub turbulentny (rys. 3a). Na wysokości ciętego materiału, w przedziale od 0–4mm prędkość przepływu dielektryka w szczelinie pomiędzy materiałem obrabianym a elektrodą roboczą jest stabilna (rys. 3b). Prędkość przepływu cieczy osiąga wartość największą w miejscu swobodnego wypływu ze szczeliny międzyelektrodowej.



Rys. 3. Rozkład prędkości przepływu dielektryka w szczelinie międzyelektrodowej w przekroju a) wzdłużnym, b) poprzecznym na różnych wysokościach

Fig. 3. The distribution of flow velocity in the gap between their dielectric in section a) longitudinal, b) cross at different heights

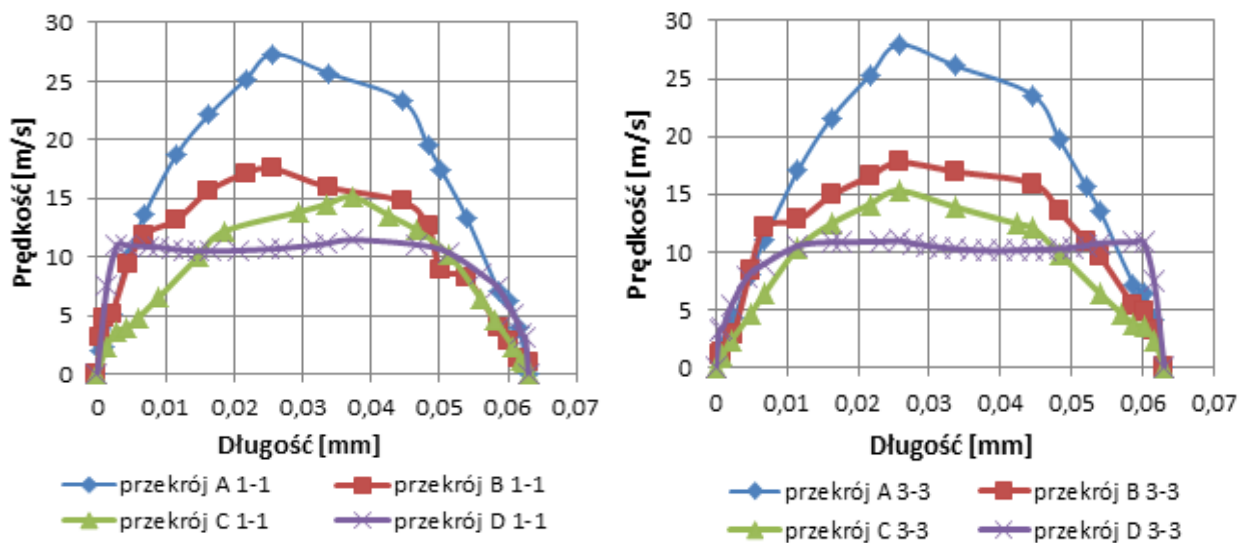
Wzdłuż materiału ciętego, wraz ze wzrostem odległości miejsca wpływu dielektryka do szczeliny następuje spadek prędkości cieczy oraz występują zaburzenia przepływu (przekrój B - B, C - C, D - D, rys. 3b).

Na wysokości 5 mm ciętego materiału następuje zderzenie dwóch strug dielektryka. Jest to miejsce, w którym prędkość przepływu wyhamowuje praktycznie do zera (rys. 3a, b – przekrój D - D), produkty erozji nie są usuwane ze szczeliny międzyelektrodowej.

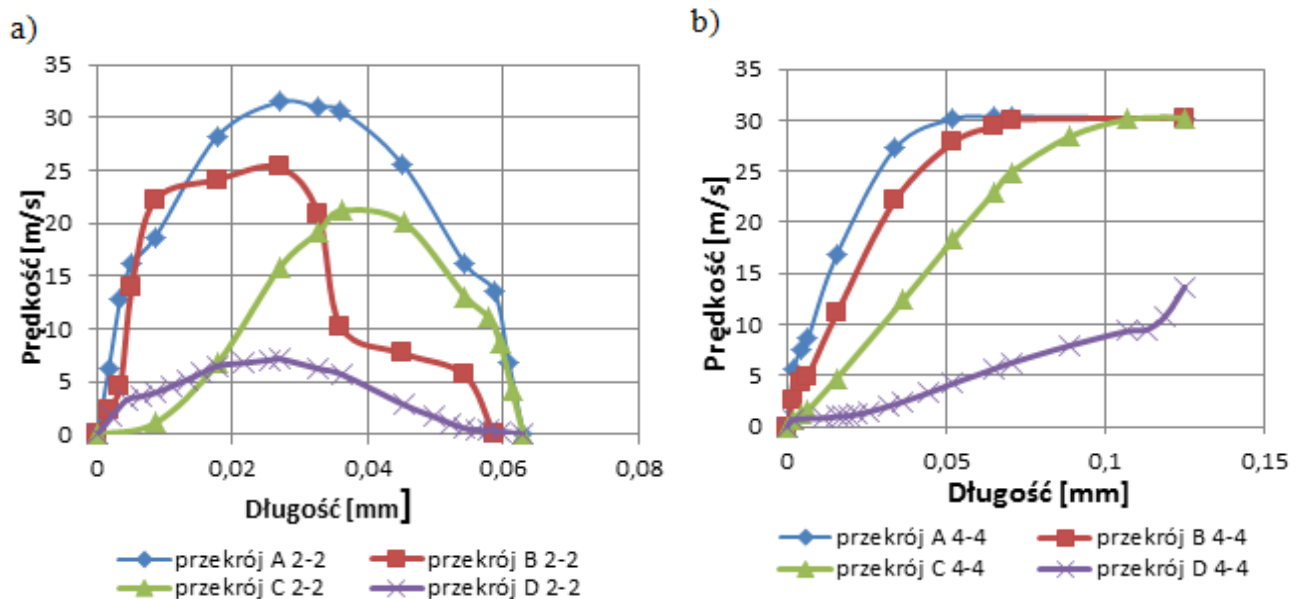
Na przekroju poprzecznym A - A (rys. 3b) zaznaczono przekroje, przedstawiające rozkład prędkości panujący w szczelinie: czołowej (przekrój 2-2), bocznej (przekrój 1-1, 3-3) oraz w miejscu swobodnego wypływu dielektryka (przekrój 4-4).

Na wykresach pokazanych na rysunku 4 przedstawiono rozkład prędkości przepływu w szczelinie bocznej. Maksymalna prędkość przepływu (28m/s) osiągnięta jest w połowie odległości (0,03mm) elektrody od materiału ciętego (przekrój A 1-1). Wraz ze zmianą odległości wpływu dielektryka do szczeliny, prędkość cieczy maleje a w miejscu zderzenia dwóch strug spada do 10m/s (przekrój D 1-1). Natomiast w warstwie przyściennej zarówno materiału obrabianego jak i elektrody roboczej prędkość cieczy wyhamowuje do 0m/s. Symetryczność wykresów świadczy o poprawności wykonanych obliczeń.

Maksymalna wartość prędkości przepływu w szczelinie czołowej (rys. 5a) również osiągnięta jest w odległości 0,03mm, ale wynosi około 30m/s (przekrój A 2-2). Natomiast w miejscu zderzenia dwóch strug dielektryka prędkość wynosi około 6m/s (przekrój D 2-2). W warstwie przyściennej zarówno materiału ciętego jak i elektrody roboczej prędkość cieczy spada do prawie 0m/s.



Rys. 4. Rozkład prędkości przepływu dielektryka w szczelinie bocznej na różnych wysokościach
Fig. 4. The distribution of flow velocity in the lateral gap at different heights



Rys. 5. Rozkład prędkości przepływu dielektryka na różnych wysokościach: a) w szczelinie czołowej,
b) w miejscu swobodnego wypływu dielektryka ze szczeliny

Fig. 5. The distribution of flow velocity in the gap at different heights a) in the front gap,
b) in place of the free flow of the dielectric

Tam, gdzie dielektryk swobodnie wypływa ze szczeliny, prędkość cieczy rośnie (na długości 0,05mm). W miarę wzrostu odległości od szczeliny prędkość utrzymuje stałą wartość 30m/s (rys. 5b, przekrój A 4-4, B 4-4, C 4-4). W przekroju D 4-4, czyli miejscu spotkania dwóch strug dielektryka, wartość prędkości ma również tendencję rosnącą, ale w mniejszym stopniu. Na odległości około 0,13mm od szczeliny osiąga wartość 14m/s.

3. PODSUMOWANIE

Otrzymane wyniki modelowania odzwierciedlają teoretyczny rozkład prędkości przepływu dielektryka panujący w szczelinie pomiędzy elektrodą roboczą a materiałem obrabianym podczas wycinania elektroerozyjnego. Wyniki modelowania obrazują przyczynę powstawania błędów kształtu podczas procesu WEDM. W szczelinie, w miejscu zderzenia dwóch strug dielektryka występuje największa koncentracja produktów obróbki. Zaleganie produktów obróbki w połowie wysokości ciętego materiału spowodowane jest prędkością cieczy, która osiąga wartości bliskie zeru. Kumulacja produktów erozji w tym miejscu ułatwia wyładowania elektryczne (jonizacja dielektryka), czego skutkiem jest największy wzrost ilości wyładowań w części środkowej przedmiotu obrabianego (efekt baryłkowatości szczeliny).

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008 – 2012 jako projekt badawczy.

LITERATURA

- [1] DĄBROWSKI L., YU J., KOZAK J., ROZENEK M., 2005, *Theoretical Analysis of Electric Field Distribution in EDM with Powder Mixed Dielectric*. Proceed. of the 4th International Conference on Global Research and Education „Inter – Academia 2005”, 1, Wuppertal, Germany.
- [2] DĄBROWSKI L., ONISZCZUK D., ŚWIERCZ R., 2012, *Modelowanie przepływu dielektryka w procesie wycinania elektroerozyjnego WEDM – analiza wpływu siatki elementów na dokładność obliczeń*, Świat Obrabiarek, 1-2.
- [3] GRZESIK W., RUSZAJ A., KRUSZYŃSKI B., 2010, *Surface Integrity of Machined Surfaces*, Surface Integrity in Machining, Springer – Verlag, London.
- [4] KOZAK J., RAJURKAR K. P., CHANDARANA N., 2004, *Machining of low electrical conductive materials by wire electrical discharge machining (WEDM)*, Journal of Materials Processing Technology, 14th International Symposium on Electromachining, ISEM XIV.
- [5] ROZENEK M., DĄBROWSKI L., ZAWORA J., 2009, *Badania procesu wycinania elektroerozyjnego z wtryskowym systemem podawania dielektryka*, Inżynieria Maszyn, 12/1, 113–121.
- [6] brasil.cel.agh.edu.pl/~10smgzyl/index.php?module=articles&name=metody-numeryczne#mos.
- [7] www.if.pw.edu.pl/~bibliot/archiwum/Adameczyk/WykladyFO/FoWWW_41.html.

MODELING OF PHYSICAL PHENOMENA IN THE INTER-ELECTRODE GAP DURING THE WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

Wire electrical machining (WEDM) belongs to a category of precise methods of treating objects of both simple and complex geometry. Errors in the shape of material after the WEDM process depends on many factors, including wire vibration caused by the passing the flow dielectric, uneven distribution of erosion products in the gap between electrodes. The paper presents the modeling of flow dielectric in the gap during WEDM process.