



UNIwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

ROZPRAWY NR 164

Jerzy Sawicki

ANALIZA I MODELOWANIE PROCESU OBRÓBKI ELEKTROCHEMICZNEJ KRZYWOLINIOWYCH POWIERZCHNI OBROTOWYCH

BYDGOSZCZ – 2013

REDAKTOR NACZELNY
prof. dr hab. inż. Józef Flizikowski

REDAKTOR DZIAŁOWY
dr hab. inż. Tomasz Piątkowski, prof. nadzw. UTP

OPINIODAWCY
dr hab. inż. Lucjan Dąbrowski, prof. nadzw. PW
dr hab. inż. Mieczysław Marciniak, prof. nadzw. PWSzZ

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE
mgr Michał Górecki, mgr inż. Daniel Morzyński

© Copyright
Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
Bydgoszcz 2013

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany
ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych,
kopiujących, nagrywających i innych bez pisemnej zgody
posiadacza praw autorskich.

ISBN 978-83-61314-55-4
ISSN 0209-0597

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
ul. Ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz, tel. 52 3749482, 3749426
e-mail: wydawucz@utp.edu.pl <http://www.wu.utp.edu.pl>

Wyd. I. Nakład 88 egz. Ark. aut. 9,53. Ark. druk. 10,25. Zamówienie nr 6/2013
Oddano do druku i druk ukończono w maju 2013
Uczelniany Zakład Małej Poligrafii UTP Bydgoszcz, ul. Ks. A. Kordeckiego 20

ANALIZA I MODELOWANIE PROCESU OBRÓBKI ELEKTROCHEMICZNEJ KRZYWOLINIOWYCH POWIERZCHNI OBROTOWYCH

Streszczenie

Praca jest próbą kompleksowej analizy i modelowania procesu obróbki elektrochemicznej bezstykowej powierzchni obrotowych, w ogólności powierzchni o dowolnych krzywoliniowych kształtach w różnych układach kinematycznych ruchu elektrody roboczej.

W pracy przedstawiono istotę obróbki elektrochemicznej, jej zalety i wady, dokonano szczegółowej charakterystyki procesu obróbki elektrochemicznej, w szczególności obróbki elektrochemicznej bezstykowej (kształtowej).

Przeprowadzono rozważania odnoszące się do obróbki ECM powierzchni kształtowych, w szczególności do procesu drażnienia elektrochemicznego profilową elektrodą roboczą. Zwrócono uwagę na etapy projektowania procesu obróbki ECM oraz przedstawiono istotę modelowania matematycznego procesu obróbki ECM powierzchni kształtowych.

Zaproponowano opis matematyczny ewolucji kształtu powierzchni obrotowych o dowolnym krzywoliniowym zarysie. Opisano procesy fizykochemiczne obróbki (procesy związane z przepływem ładunku, hydrodynamiczne, cieplne, elektrodowe). Sformułowano układ równań wynikający z zasad zachowania masy, pędu, energii opisujący w ogólności przepływ ośrodka wielofazowego w szczelinie międzyelektrodowej. Dokonano odpowiednich uproszczeń, formułując ostateczną postać wektorową układu równań ruchu mieszaniny elektrolitu i wodoru opisującego przepływ ośrodka podczas procesu obróbki ECM.

Przedstawiono konfigurację pola przepływu mieszaniny elektrolitu i wodoru w szczelinie międzyelektrodowej dla którego sformułowano w krzywoliniowym ortogonalnym układzie współrzędnych równania ruchu odpowiednio, dla przepływu laminarnego i turbulentnego. Sformułowano układ równań ruchu mieszaniny słuszny dla przepływu trójwymiarowego uproszczono do postaci opisującej przepływ osiowosymetryczny. W obszarze przepływu laminarnego wyróżniono dwie klasy oszacowań odniesione do składowych prędkości i ciśnienia, na podstawie których, przedstawiono układy równań ruchu opisujące stosowne klasy przepływu mieszaniny elektrolitu i wodoru. Przepływ turbulentny opisano za pomocą uśrednionego układu równań Naviera-Stokesa (równań Reynoldsa), dokonując stosownych uproszczeń charakterystycznych dla przepływów w cienkich warstwach. Dla przedstawionych równań sformułowano warunki brzegowe. Omówiono metody analityczne i numeryczne rozwiązania przedstawionych równań ruchu mieszaniny elektrolitu i wodoru. Sformułowano całki równań ruchu dla przepływu laminarnego i turbulentnego, przedstawiając rozkłady prędkości i ciśnienia w szczelinie międzyelektrodowej oraz koncentracji objętościowej wodoru w warunkach przepływu laminarnego i turbulentnego.

Przeprowadzono analizę numeryczną procesu obróbki ECM powierzchni obrotowych. Do rozwiązania równania ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego zaproponowano metodę numeryczną Eulera.

Równanie wynikające z zasady zachowania energii rozwiązano MRS. Biorąc pod uwagę dokładność i stabilność schematu numerycznego dla rozwiązania problemu,

zastosowano metodę Cranka-Nicholsona. Przybliżone równanie różnicowe rozwiązano metodą iteracji.

Praca zawiera opis metodyki projektowania geometrii elektrody roboczej. Obliczeniowa korekcja geometrii elektrody roboczej zwana zagadnieniem odwrotnym jest podobna do korekcji elektrody uzyskanej w wyniku kolejnych prób doświadczalnych.

Sformułowano algorytm symulacji komputerowej procesu obróbki elektrochemicznej i projektowania elektrody roboczej metodą korekcji.

Przedstawiono opis opracowanego w środowisku Delphi 7 programu komputerowego symulacji obróbki elektrochemicznej powierzchni obrotowych Sym_ECM/CAM_2.0.

Przeprowadzono symulacje numeryczne procesu obróbki ECM powierzchni kształtowych osiowosymetrycznych. Analizie numerycznej poddano proces kształtowania elektrochemicznego dla trzech charakterystycznych powierzchni obrotowych, wyznaczających szczelinę międzyelektrodową: stożkowych, kulistych i o dowolnym zarysie krzywoliniowym. Symulacje numeryczne przeprowadzono dla różnych konfiguracji kinematycznych ruchu elektrody roboczej i przedmiotu obrabianego.

Badania doświadczalne wykonano na zaproponowanym stanowisku badawczym dostosowanym do badań eksperymentalnych procesu obróbki ECM powierzchni obrotowych. Uwagę skierowano na badania weryfikujące wariant obróbki ECM o złożonym ruchu przedmiotu obrabianego PO i elektrody roboczej ER. Badania weryfikacyjne polegały na porównaniu kształtu przedmiotu obrabianego PO zmierzonego po obróbce elektrochemicznej w zadanym czasie obróbki z wynikami symulacji komputerowej przy takich samych parametrach obróbki.

W podsumowaniu pracy omówiono otrzymane wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych oraz sformułowano przewidywane możliwości dalszych badań w zakresie podjętego tematu podjętego w pracy.

ANALYSIS AND MODELING OF ELECTROCHEMICAL MACHINING OF CURVILINEAR ROTARY SURFACES

Summary

This work is an attempt to make a complex analysis and a model of the electrochemical machining process for contactless rotary surfaces, generally speaking, randomly shaped curvilinear surfaces and for various kinematic positions of the tool electrode.

In this work there has been presented the operation principle of electrochemical machining, its advantages and disadvantages. Also a detailed characteristics of this kind of machining, especially a contactless (shaping) electrochemical machining has been presented.

ECM machining of shaping surfaces, especially the process of electrochemical drilling with the use of a profiled tool electrode, has been studied. Attention has been paid to the ECM process design stages and the mathematical modeling process principle of ECM for shaping surfaces has been presented as well.

A mathematical description of the shape evolution of rotary surfaces with any curvilinear profile has been proposed and physical-chemical phenomena accompanying the process (processes connected with the load flow, hydrodynamic, thermal and electrode-related) have been described. A system of equations, resulting from the rules of mass, momentum and energy conservation, describing the flow of a multi-phase medium through the inter-electrode gap, has been formulated. Appropriate simplifications have been made in order to formulate the final vector representation of the electrolyte and hydrogen mixture motion equation accounting for the medium flow during the ECM process.

Configuration of the field of the electrolyte and hydrogen mixture flow through the inter-electrode gap has been presented, for which motion equations have been formulated in a curvilinear orthogonal system of coordinates, respectively, for a laminar and turbulent flow. The formulated system of equations of the mixture motion which is right for a three-phase flow has been reduced to a form describing an axial-symmetrical flow. Two estimation classes referred to components of speed and pressure have been distinguished within the area of laminar flow, and on their basis systems of motion equations describing adequate classes of the electrolyte and hydrogen mixture have been presented. Turbulent flow has been described by means of averaged Navier-Sokes system of equations (Reynold equation) using appropriate simplifications characteristic for flows through thin layers. Boundary conditions have been formulated for the presented equations.

Analytical and numerical methods for solving the formulated motion equations of the electrolyte and hydrogen mixture flow have been discussed. Integrals of motion equations for laminar and turbulent flows have been formulated by presenting distributions of speed and pressure in the inter-electrode gap and hydrogen volume concentration in the conditions of laminar and turbulent flows.

A numerical analysis of the ECM process of rotary surfaces has been made. Euler's numerical method has been proposed for solving an equation of the work-piece shape evolution.

The equation resulting from the principle of energy conservation has been solved by MRS. Crank-Nicholson method has been used to solve the problem in order to provide accuracy and stability of the numerical scheme.

Approximate differential equation has been solved with the use of iteration method.

This work contains a description of methodology for the tool-electrode geometry design. Computing correction of the tool-electrode geometry referred to as an inverse problem is similar to correction of tool-electrode obtained by successive experimental tests.

Algorithms for the electrochemical machining process computer simulation and the tool-electrode design by correction method have been formulated.

There has also been presented a description of computer program simulation developed in Delphi 7 environment as well as electrochemical machining of rotary surfaces Sym ECM/CAM 2.0.

Numerical simulations of ECM machining of axial-symmetrical shaping surfaces have been performed within the research. The process of electrochemical shaping has been analyzed numerically for three characteristic rotary surfaces determining the inter-electrode gap, such as: cone-shaped, spherical and random shaped curvilinear surfaces. Numerical simulations have been performed for different kinematic configurations of the tool-electrode and work-piece motion.

Experimental tests have been performed on a proposed test stand adjusted to the demands of ECM machining of curvilinear surfaces. Attention has been focused on verification of ECM machining involving complex motion of the work-piece and tool-electrode. Verification tests based on comparing the work-piece shape, measured after electrochemical machining, in a given time, with the results of computer simulation for the same machining parameters have been performed.

In the summary of this work, the results of theoretical and experimental tests have been discussed and possibilities to conduct further test in this field have been provided.