

Sebastian SKOCZYPIEC ¹
Krzysztof KARBOWSKI ²
Adam RUSZAJ ¹

ZASTOSOWANIE METOD INŻYNIERII REKONSTRUKCYJNEJ DO PROJEKTOWANIA ELEKTROD DO OBRÓBKI ELEKTROCHEMICZNEJ

W artykule przedstawiono koncepcje zastosowania inżynierii rekonstrukcyjnej oraz metod szybkiego wytwarzania narzędzi do projektowania i wytwarzania narzędzi do obróbki elektrochemicznej. W wyniku zastosowania metod skanera przestrzennego i urządzenia do selektywnego spiekania laserowego możliwe jest skrócenie czasu opracowania ostatecznego kształtu elektrody. Korekcja elektrody roboczej przeprowadzona jest na podstawie porównania danych o kształcie elementu otrzymanego z zastosowaniem kolejnego przybliżenia elektrody roboczej i modelu CAD wytwarzanej części.

1. WPROWADZENIE

Obróbka elektrochemiczna (ECM) umożliwia kształtowanie z określoną dokładnością elementów o skomplikowanym kształcie, wykonanych z trudnych lub niemożliwych do obróbki innymi metodami materiałów przewodzących prąd elektryczny (metale i ich stopy) [1]. Ze względu na szereg swoich zalet (tj. możliwość obróbki materiałów bez względu na ich twardość, brak zużycia narzędzia, dużą wydajność obróbki, dobrą jakość obrobionej powierzchni, brak oddziaływań mechanicznych w strefie obróbki) obróbka elektrochemiczna znalazła szerokie zastosowanie w przemyśle lotniczym, kosmicznym, obronnym, i motoryzacyjnym. Z powyższych względów obecnie jednym z najpopularniejszych zastosowań ECM jest wykonywanie łopatek silników lotniczych (Rys. 1)

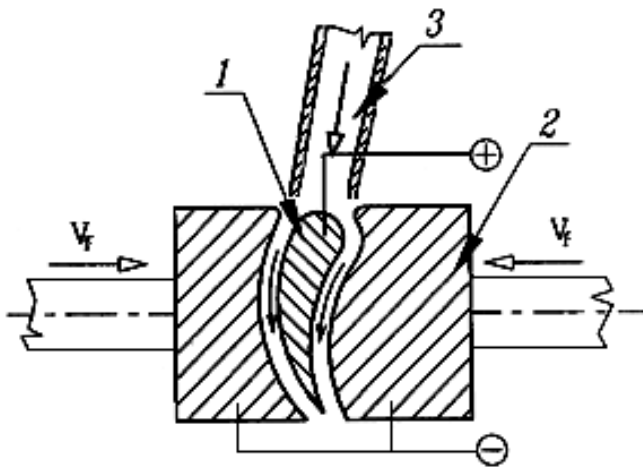
Jedną z podstawowych wad obróbki elektrochemicznej jest stosunkowo trudne i czasochłonne projektowanie procesu technologicznego, a w szczególności elektrody roboczej. Najczęściej, wstępnie zaprojektowany kształt narzędzia podlega wielokrotnej weryfikacji doświadczalnej oraz korekcji wymiarów na podstawie odchyłek otrzymanych z pomiarów wstępnej serii wykonanych detali.

W artykule zostanie przedstawiona koncepcja zastosowania inżynierii rekonstrukcyjnej oraz metod szybkiego wytwarzania prototypów i narzędzi do projektowania i wytwarzania elektrod do obróbki elektrochemicznej, a w szczególności elektrod do produkcji łopatek silników lotniczych.

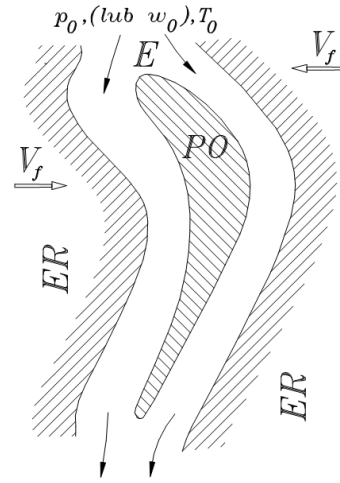
1 - Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie

2 - Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Politechnika Krakowska

a)



b)



Rys. 1a i 1b. Schemat drążenia łopatek turbin silników przepływowych; 1 (PO) – łopátka (przedmiot obrabiany), 2 (ER) - elektroda robocza, 3 - dopływ elektrolitu do kasety, V_f - prędkość posuwu elektrody roboczej, p_0 , w_0 , T_0 – ciśnienie, prędkość i temperatura elektrolitu na wlocie do szczeliny międzyelektrodowej [7].

Fig. 1a,1b. Scheme of turbine blades electrochemical machining; 1 (PO) – turbine blade (workpiece), 2 (ER) – electrode tool, 3 – electrolyte inlet, V_f – electrodes feed rate, p_0 , w_0 , T_0 – inlet pressure, flow velocity and temperature of electrolyte [7].

2. KOREKCJA ELEKTRODY

Projektowanie procesu technologicznego drążenia elektrochemicznego związane jest z rozwiązaniem następujących zadań [2, 7, 8]:

- dobór warunków procesu ECM, czyli: składu elektrolitu; warunków elektrycznych, kinematyki oraz hydrodynamicznych parametrów obróbki;
- wyznaczenie geometrii narzędzia – elektrody roboczej;
- analiza dokładności obróbki.

Zadania a – c, są ze sobą ściśle powiązane, a ich rozwiązanie oznacza wyznaczenie ewolucji kształtu powierzchni obrabianej w czasie oraz rozkładów warunków fizycznych w szczeliny międzyelektrodowej. Sprowadza się to do przeprowadzenia symulacji komputerowej procesu kształtowania elektrochemicznego, który w ogólnym przypadku opisany jest następującym układem równań (1) [7, 8]:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + k_v j(F) |grad F| = 0$$

$$F(t=0) = F_0$$

$$j(F) = \kappa(F) |grad u|_F$$

(1)

$$div(\kappa grad u) = 0$$

$$u(f) = -E_k(j_R) \quad u(F) = U - E_a(j_a)$$

gdzie : F - powierzchnia przedmiotu obrabianego (PO), f - powierzchnia elektrody roboczej (ER), j - gęstość prądu, k_v – obrabialność elektrochemiczna, κ - przewodność elektryczna elektrolitu, U – napięcie międzyelektrodowe, E_a , E_k - spadek potencjału na anodzie i katodzie.

W wyniku rozwiązania powyższego układu równań otrzymujemy, dla zadanego kształtu ER, kształt powierzchni obrabianej F dla dowolnej chwili czasu, w szczególności po zadanym czasie obróbki t_k . W oparciu o powyższy układ równań oraz szereg uproszczeń związanych przepływem elektrolitu, rozkładem temperatury oraz wydzielaniem się gazu w szczelinie międzyelektrodowej, możliwe jest przeprowadzenie symulacji komputerowej kształtowania elektrochemicznego. Uproszczenia i procedura rozwiązania powyższego układu równań została przedstawiona m.in. w pracy [7].

Przy wyznaczeniu geometrii elektrody roboczej stosuje się metodę kolejnych przybliżeń, czyli po wyznaczeniu i -tego przybliżenia elektrody roboczej, przeprowadza się symulację komputerową kształtowania elektrochemicznego. W wyniku tego uzyskuje się kształt PO dla danego przybliżenia elektrody roboczej. Porównanie otrzymanej powierzchni $F_i(x,y)$ z kształtem zadanym $F(x,y)$ prowadzi do tablicy odchyłek $\Delta F_i(x,y)$, które są podstawą do przeprowadzenia kolejnej korekcji (Rys. 2).

W aspekcie kształtowania dowolnych powierzchni krzywoliniowych, znacznym utrudnieniem zastosowania powyższej procedury analitycznej, jest konieczność znalezienia rozkładów przyrostu temperatury, ciśnienia oraz zawartości fazy gazowej w układzie współrzędnych krzywoliniowych (ξ, ζ) , w którym:

- współrzędna ξ mierzona jest od wlotu elektrolitu wzdłuż linii przepływu;
- współrzędna ζ mierzona jest od powierzchni elektrody wzdłuż normalnej.

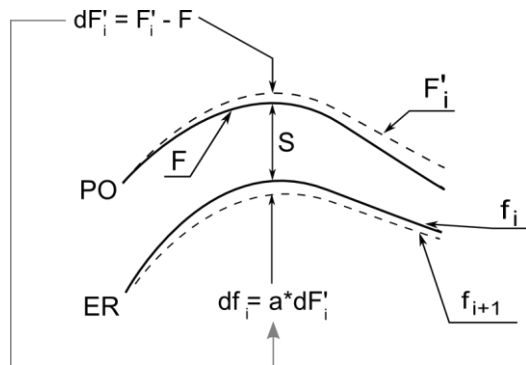
Konieczność znalezienia linii przepływu elektrolitu znacznie komplikuje procedurę rozwiązania, dlatego też zastosowanie powyższej metody jest praktycznie ograniczone do tzw. powierzchni walcowych lub powierzchni osiowo-symetrycznych [2].

W pracy proponuje się zastosowanie symulacji ECM jedynie na etapie wstępnej korekcji, czyli pierwszego przybliżenia kształtu ER. Należy jednak zaznaczyć, że wybór metody, na postawie której zostanie obliczona grubość szczeliny międzyelektrodowej w pierwszym przybliżeniu ER zależy od decyzji technologa – projektanta. W zależności od kształtu PO, wymaganej dokładności obróbki, jak również doświadczenia może to być prosta korekcja np. na podstawie „twierdzenia cosinusów” [2], obliczenia z założeniem stałości κ , ηk_v , E_a , E_k , metoda analityczna czy zastosowanie numerycznej mechaniki płynów (CFD). Szczególnie efektywne wydaje się zastosowanie jednego z komercyjnych pakietów CFD, gdzie jako rozwiązanie otrzymujemy rozkład temperatury, ciśnienia i prędkości elektrolitu, oraz współrzędne linii przepływu elektrolitu. Następnie informacje te można wykorzystać do obliczenia prędkości roztwarzania elektrochemicznego w wybranym punkcie anody w stanie ustalonym, a następnie rozkładu grubości szczeliny międzyelektrodowej. Na podstawie analizy odchyłek PO obrobionego pierwszym przybliżeniem ER, jej kształt może zostać poprawiony w kierunku normalnym do powierzchni o odcinki (Rys. 2):

$$\Delta f_i = \alpha \Delta F_i \quad (2)$$

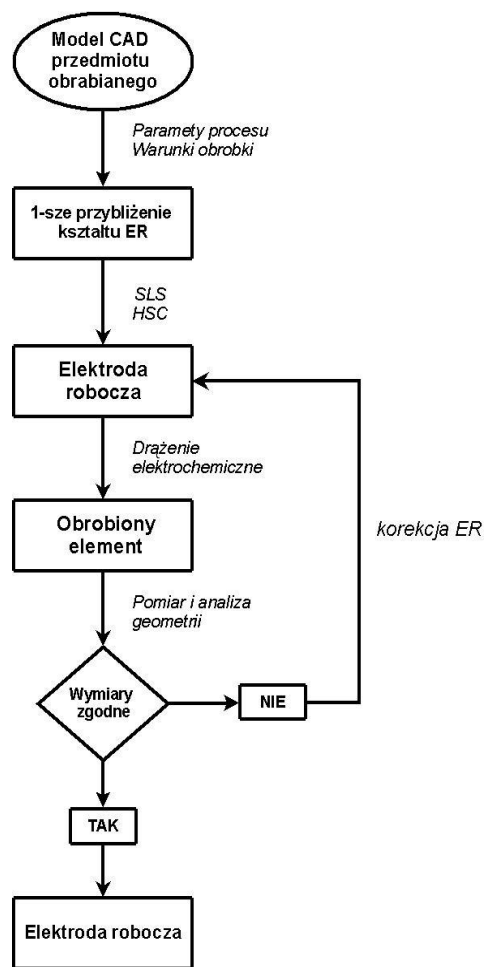
gdzie $0 < \alpha < 1$ – współczynnik warunkujący szybkość zbieżności procesu iteracji. Powyższą procedurę należy powtórzyć, aż do uzyskania kryterium dokładności rozwiązania tzn.:

$$\sup \{F'_i - F\} < \varepsilon. \quad (3)$$



Rys. 2. Schemat korekcji elektrody roboczej: F'_i – kształt końcowy obrobiony elektroda f_i ; dF'_i – rozkład odchyłek kształtu F'_i odżądanego kształtu F ($dF_i = F'_i - F$) [2]

Fig. 2. Scheme of electrode tool correction: F'_i – workpiece shape machined by f_i ; electrode tool, dF'_i – distribution of workpiece shape F'_i deviations from desired shape F ($dF_i = F'_i - F$) [2]



Rys. 3. Algorytm postępowania w ramach opracowanej metodyki korekcji elektrod [10].

Fig. 3. Proposed algorithm of electrode correction [10].

Zaproponowany w pracy algorytm postępowania składa się z następujących kroków (Rys. 4):

- na podstawie informacji o żądanym kształcie i materiale PO dokonuje się doboru warunków obróbki w celu zaprojektowania 1-go przybliżenia kształtu ER;
- wykonanie elektrody oraz przeprowadzenie próbnego drażenia;
- pomiar geometrii otrzymanej powierzchni i porównanie z zadaniem kształtem a następnie (jeżeli konieczne) wprowadzenie korekcji kształtu ER na podstawie obliczonych odchyłek (wg. Rys. 2);
- ponowne wykonanie ER i przeprowadzenie próbnej obróbki.

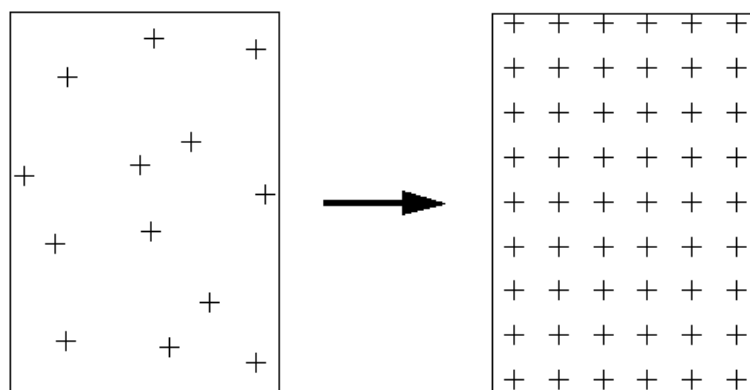
Procedura ta (punkty c – b) powtarza się aż do uzyskania obrobionego kształtu w zadanym polu tolerancji. Kluczowymi etapami w zaproponowanej metodzie jest pomiar i analiza geometrii obrobionego elementu oraz korekcja kształtu ER. Etapy te powinny zostać przeprowadzone z zastosowaniem metod inżynierii rekonstrukcyjnej i wykorzystaniem metod interpolacyjnych w przestrzeni trójwymiarowej.

3. POMIAR I ANALIZA DOKŁADNOŚĆ PRZEDMIOTU OBRABIANEGO

W celu wyznaczenia ostatecznej geometrii elektrody roboczej niezbędna jest informacja o żądanym kształcie (model CAD) i dokładności wykonania przedmiotu z zastosowaniem danego przybliżenia kształtu ER. W proponowanym algorytmie, informację o kształcie przedmiotu uzyskiwane są na podstawie skanowania przestrzennego wstępnie obrobionych elementów na skanerze przestrzennym Renishaw Cyclone 2.

W efekcie skanowania uzyskujemy natychmiastową reprezentację wyników pomiaru w postaci tzw. chmury punktów, czyli nieuporządkowanego zbioru współrzędnych x, y, z – punktów powierzchni przedmiotu. Chmura punktów umożliwia wizualizację otrzymanych wyników, jednak jej ewentualne modyfikacje są praktycznie niemożliwe (brak informacji o sąsiedztwie punktów). W typowych zastosowaniach inżynierii odwrotnej, w celu analizy chmury punktów przeprowadza się tzw. triangulację Delaunay'a [3, 9, 11], rozpinając na wybranych punktach siatkę trójkątów. W wyniku tej operacji otrzymujemy informację o kierunku normalnym do każdego z otrzymanych trójkątów.

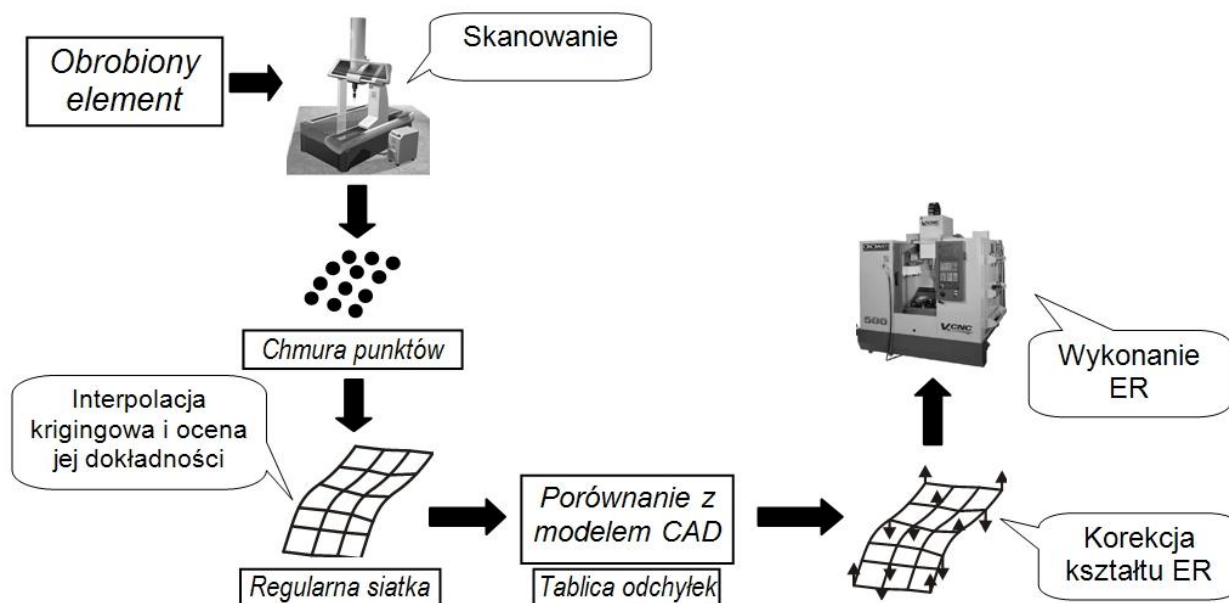
W rozpatrywanym przypadku, na podstawie chmury punktów chcemy otrzymać mapę odchyłek przedmiotu obrobionego, a następnie, korzystając z tej informacji przeprowadzić korekcję kształtu elektrody roboczej. Wymaga to przekształcenia chmury punktów do regularnej siatki węzłów (Rys. 4) lub wyrównania siatki do współrzędnych $\langle x, y \rangle$ wierzchołków trójkątów otrzymanych z triangulacji Delaunay'a. Oba te zagadnienia sprowadzają się do interpolacji nieregularnego, przestrzennego zbioru N punktów $P_i(x_i, y_i, f_i)$, gdzie $f_i = F(x_i, y_i)$, w celu znalezienia funkcji $F(x, y)$. Szczegółowe zagadnienia związane z zastosowaniem metod interpolacyjnych w inżynierii rekonstrukcyjnej i ich dokładności zostały przedstawione w [5], i obejmują przede wszystkim wybór prawidłowej metody interpolacji oraz ocenę jej dokładności. Jak pokazano w [5], zastosowanie metody krigingu normalnego, pozwala na uzyskanie błędów interpolacji nie przekraczających $5 \cdot 10^{-6}$ m.



Rys. 4. Schemat przedstawiający rozpięcie regularnej siatki prostokątnej na nie-uporządkowanym zbiorze (chmurze) punktów.

Fig. 4. Scheme presented idea of regular mesh generation from data cloud.

Właściwy etap związany z analizą dokładności obróbki przeprowadzany jest w programie CopyCAD, w którym, po porównaniu modelu CAD oraz skanu przedmiotu obrabianego otrzymujemy rozkład błędów wykonania detalu (dla określonego przybliżenia ER). Poszczególne etapy związane z przeprowadzeniem korekcji elektrody roboczej przedstawiono na Rys. 5. Zaprojektowana w ten sposób elektroda robocza może zostać wykonana z wykorzystaniem jednej z metod szybkiego wytwarzania narzędzi, np. selektywnego spiekania laserowego [5].



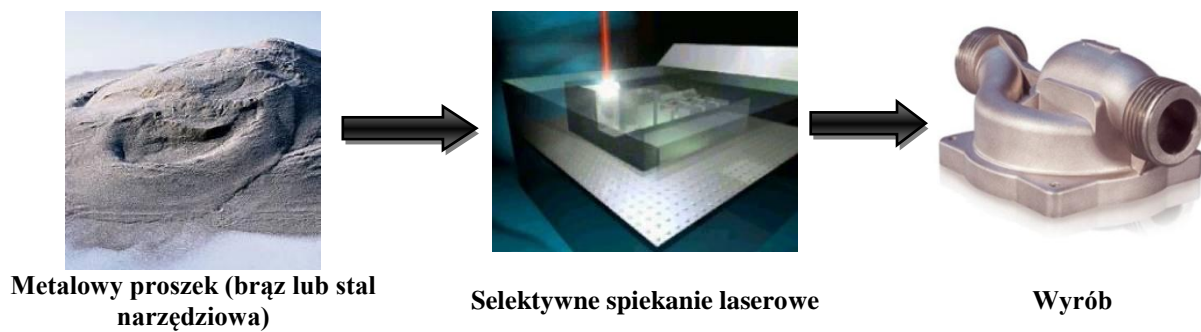
Rys. 5. Algorytm oceny dokładności wykonanego elementu przy zastosowaniu regularnej siatki węzłów.

Fig. 5. Algorithm of the workpiece accuracy analysis based on regular mesh.

4. WYKONANIE ELEKTRODY ROBCZEJ

Do szybkiego wytwarzania narzędzi (tzw. Rapid Tooling) wykorzystywane są powszechnie metody HSC (High Speed Cutting) oraz wybrane metody przyrostowe (Rapid Prototyping, RP). W przypadku metod RP istotnym ograniczeniem związanym z bezpośrednim wykorzystaniem do produkcji prototypowych lub pojedynczych sztuk narzędzi jest rodzaj i właściwości materiałów używanych do budowy elementów (najczęściej tworzywa sztuczne).

Jedną z niewielu metod umożliwiających otrzymanie metalowych elementów, jest selektywne spiekanie laserowe (SLS), które pozwala na otrzymywanie skomplikowanych kształtów, poprzez dodawanie kolejnych warstw i selektywnie spiekanie wiązką lasera, proszków metalowych (proszki na bazie brązu, proszki o składzie zbliżonym do stali narzędziowych, proszki tytanowe).



Rys. 7. Etapy wykonywania elementów metodą selektywnego spiekania laserowego [1]

Fig. 7. Steps of selective laser sintering process [1].

Laboratorium Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania wyposażone jest w urządzenie do selektywnego spiekania laserowego EOSINT 250Xt niemieckiej firmy EOS, dlatego też w ramach przeprowadzonych badań wstępnych sprawdzona zostanie możliwość wykorzystania SLS w wytwarzaniu elektrod do obróbki elektrochemicznej. Na podstawie modelu STL skorygowanego kształtu elektrody zostanie wykonane narzędzie prototypowe, które zostanie sprawdzone w kolejnym kroku algorytmu.

4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono koncepcje zastosowania metod inżynierii rekonstrukcyjnej do projektowania narzędzi do obróbki elektrochemicznej. W wyniku zastosowania skanera przestrzennego możliwe jest skrócenie czasu przygotowania poprawnego kształtu elektrody. Korekta przeprowadzona jest na podstawie porównania danych o kształcie elementu otrzymanego z zastosowaniem kolejnego przybliżenia elektrody roboczej i modelu CAD wytwarzanej części. Jednym z problemów, który należy rozwiązać na etapie oceny dokładności wykonania przedmiotu obrabianego, jest zastosowanie metod interpolacyjnych dla chmury punktów.

W wyniku zaprezentowanego podejścia, możliwe jest przyspieszenie czasu projektowania elektrody roboczej (a co z tym jest związane uelastycznienie produkcji) oraz zwiększenie dokładności obróbki, zwłaszcza przedmiotów o powierzchniach swobodnych (tj. łopatki silników przepływowych).

LITERATURA

- [1] Chuchro M., Czekaj J., Ruszaj A.: Wytwarzanie modeli funkcjonalnych i narzędzi metoda selektywnego spiekania laserowego (SLS, DMLS). *Mechanik*, nr 12/2008.
- [2] Dąbrowski L. Podstawy komputerowej symulacji kształtowania elektrochemicznego. Nr. 154 serii *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej - Mechanika*. 1992.
- [3] Hur S.-M., Kim H.-C., Lee S.-H., STL file generation with data reduction by the Delaunay triangulation method in reverse engineering, *Int J Adv Manuf Technol* (2002) 19, ss.669–678.
- [4] Karbowski K. Interpolation methods for correction of probe's radius. *Proceedings of the 4th International Conference on Machining and Measurements of Sculptured Surfaces, Kraków, 27 – 29 September 2006*, str. 299 – 308.
- [5] Karbowski K. Podstawy rekonstrukcji elementów maszyn i innych obiektów w procesach wytwarzania, *Monografia, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, monografia w druku*.

- [6] Kozak J. Kształtowanie powierzchni obróbka elektrochemiczna bezstykową (ECM). Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej - Mechanika, nr 46, 1976.
- [7] Kozak J. Komputerowe wspomaganie technologii drażenia elektrochemicznego. Materiały Szkoły Naukowej Obróbek Erozyjnych, Zeszyt nr 5., Warszawa 1999 r., str. 53 – 80.
- [8] Kozak J. Mathematical models for computer simulation of electrochemical machining processes. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 76, Issues 1-3, April 1998, Pages 170-175.
- [9] Kuo C.-C., Yau H.-T., A Delaunay based region-growing approach to surface reconstruction from unorganized points, Computer-Aided Design 37 (2005) ss. 825–835.
- [10] Skoczypiec S., Lipiec P., Stwora A.: *Opracowanie metodyki korekcji elektrod z wykorzystaniem inżynierii odwrotnej, szybkiego wytwarzania narzędzi i metod High Speed Cutting. Opracowanie oprogramowania do projektowania elektrod.* Seria Sprawozdania IZTW, 2008 r., nr bibl. IZTW: 8802.
- [11] Wang D., Hassan O., Morgan K., Weatherill N., Efficient surface reconstruction from contours based on two-dimensional Delaunay triangulation, Int. J. Numer. Meth. Engng 2006, 65, ss.734-751

REVERSE ENGINEERING APPLICATION FOR ELECTROCHEMICAL MACHINING ELECTRODES DESIGN.

In the paper idea of reverse engineering and rapid tools manufacturing application to design and produce electrodes (tools) for electrochemical sinking. Thanks to 3D scanner and selective laser sintering application decrease of process planning time is possible. Electrode correction is carried out based on comparison between data obtained from workpiece 3D scanning and CAD model.