

Jerzy KOZAK¹

KSZTAŁTOWANIE ELEKTROCHEMICZNE ŁOPATKI SEKWENCJĄ PROCESÓW ECM - PECM

W pracy przedstawiono kształtowanie elektrochemiczne pióra łopatki lotniczych silników turbinowych w dwu kolejnych zabiegach, a mianowicie obróbki prądem ciągłym ECM i prądem impulsowym PECM. Omówiono zadania cząstkowe niezbędne w projektowaniu i optymalizacji technologii elektrochemicznej. Wykazano, że dokładność wymiarową ECM/PECM można poprawić utrzymując małą szczelinę pomiędzy elektrodami.

1. WPROWADZENIE

W wytwarzaniu części silników lotniczych do najtrudniejszych technologicznie należą procesy kształtowania łopatek sprężarki i turbiny gazowej. Łopatki charakteryzują się bardzo złożonym kształtem oraz wysokimi wymogami odnośnie dokładności profilu i jakości warstwy wierzchniej. Podkreślić należy, że łopatki wykonuje się z trudnoskrawalnych stopów tytanu, stopów żarowytrzymałych oraz wysokostopowych stali. Jedną z efektywnych wysokowydajnych technologii stosowanych w praktyce przemysłowej jest elektrochemiczna obróbka pióra łopatki, wykorzystująca roztwarzanie anodowe. W aktualnie stosowanych operacjach obróbczych używane są obrabiarki realizujące roztwarzanie stałym prądem ciągłym.

W ciągłym procesie elektrochemicznym występują znaczne trudności w uzyskaniu: dużej dokładności, eliminacji defektów powierzchniowych najczęściej spowodowanych niejednorodnością warunków hydrodynamicznych oraz zmniejszenia prawdopodobieństwa zwarć elektrycznych. Jednocześnie zachodzi konieczność stosowania skomplikowanej i pracochłonnej korekcji elektrod roboczych. Następstwem tych okoliczności jest ponoszenie strat ekonomicznych związanych ze stosowaniem obróbki ścierniej, jako dodatkowej operacji wykończającej oraz pojawianie się istotnej liczby braków, co zwiększa pracochłonność i koszt wyrobu.

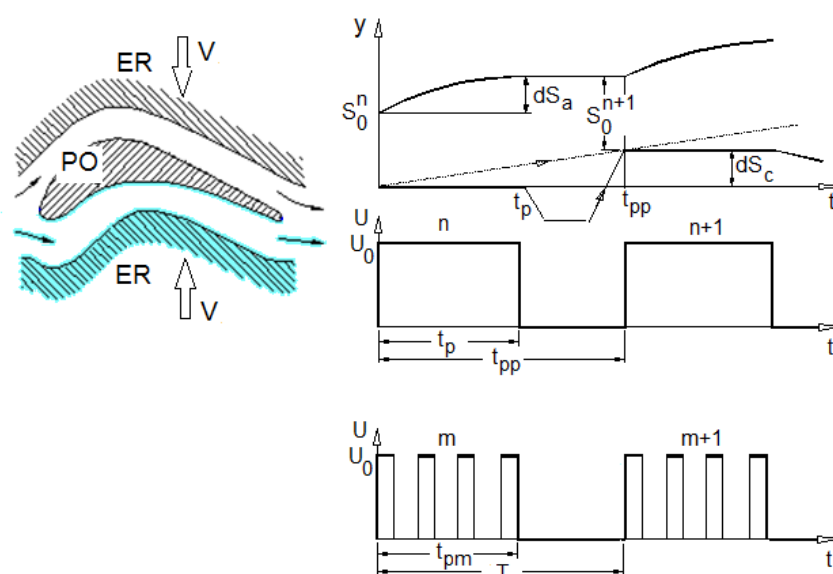
Cechą charakterystyczną ECM jest fakt, że dokładność jest odwrotnie proporcjonalna do grubości szczeliny międzyelektrodowej występującej w procesie. Z tych względów w obróbce precyzyjnej zachodzi konieczność zmniejszenia grubości szczeliny poniżej

¹ Instytut Lotnictwa, Warszawa

0,1 – 0,05mm. Prowadzenie w takich warunkach stabilnego procesu ciągłego ECM jest niemożliwe, ze względu na wzrost oporów hydraulicznych w przepływie elektrolitu przez szczelinę. Uniemożliwia to intensywne usuwanie produktów procesu (wodorotlenków i gazu) oraz wydzielającego się ciepła o intensywności wewnętrznych źródeł rzędu 10^2 kW/cm^3 . Prowadzi to do zwiększenia prawdopodobieństwa wystąpienia stanu krytycznego ECM i wyłączeń elektrycznych uszkadzających elektrodę roboczą i przedmiot obrabiany.

Kształtowanie elektrochemiczne przy grubościach szczelin 0,01 – 0,1mm możliwe jest jedynie prądem o czasach trwania impulsu rzędu $10^{-5} - 10^{-2} \text{ s}$, więc przez zastosowanie impulsowej obróbki elektrochemicznej (Pulse Electrochemical Machining-PECM).

Na rysunku 1 przedstawiono schemat PECM w operacji dwustronnego drażenia pióra łopatki oraz przykładowe przebiegi napięcia U oraz przemieszczenia S elektrody przy drażeniu.



Rys. 1. Schemat przebiegów zmian położenia elektrod oraz napięcia w ciągu impulsów(n) i pakietów impulsów(m) podczas impulsowej obróbki elektrochemicznej (PECM) pióra łopatki

Fig. 1. The changes in position of electrodes and voltage in serial of pulses(n) and pulse packets (m) during PECM of airfoil

Roztworzenie elektrochemiczne nadkładu odbywa się w czasie t_p , gdy na elektrody podawany jest impuls napięcia roboczego. W przypadku drażenia pokazanego na rysunku 1, elektroda robocza (ER) w czasie impulsu jest nieruchoma, natomiast w czasie przerwy między impulsami $t_o = T - t_p$ lub pakietami impulsów, elektroda jest odsuwana dla wielokrotnego powiększenia grubości szczeliny do wartości, co zwiększa prędkość przepływu elektrolitu. Następnie ER jest dosuwana do przedmiotu obrabianego (PO) dla utworzenia założonej początkowej szczeliny, S_0 . Zmianę położenia elektrody roboczej w kolejnych impulsach charakteryzuje przemieszczenie ER między impulsami lub grupami impulsów, ΔS . W przerwie między impulsami lub dłuższej przerwie między grupami impulsów, następuje usuwanie produktów obróbki (wodorotlenków, gazu, ciepła) i doprowadzenie do obszaru obróbki "świeżego" elektrolitu. W niektórych obrabiarkach

PECM, w przerwie realizuje się operację wyznaczenia aktualnego położenia powierzchni obrabianej, np. przez styk elektrod.

Realizacja kształtowania elektrochemicznego prądem impulsowym pozwala w szczególności:

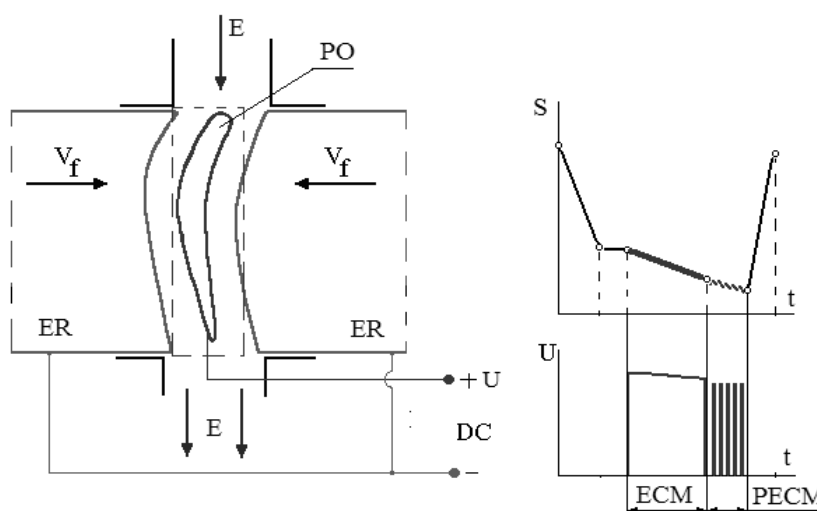
- wielokrotnie zwiększyć dokładność i jakość powierzchni obrabianej,
- istotnie uprościć projektowanie i wykonanie elektrod roboczych, które w przypadku PECM mają profil będący ekwidistantą do powierzchniżądanego wyrobu,
- wyeliminować defekty powierzchniowe łopatki wywołane nierównomiernością przepływu elektrolitu,
- istotnie zredukować prawdopodobieństwo wystąpienia wyładowań i zwarć elektrycznych.

2. KSZTAŁTOWANIE PIÓRA ŁOPATKI

Negatywną cechą PECM jest wielokrotne zmniejszenie prędkości drążenia (przykładowo z 0,5-0,8mm/min przy ECM łopatek do 0,05-0,1mm/min w PECM).

Z tych względów celowym jest prowadzenie dwustronnego kształtowania łopatki w dwu kolejnych zabiegach obróbczych, realizowanych na tej samej obrabiarce, a mianowicie (rys. 2):

1. Zabieg obróbki zgrubnej usuwającej 70-80% nadatku całkowitego z zastosowaniem prądu ciągłego, tj. procesu **ECM** z prędkością drążenia do 1 mm/min.



Rys. 2. Schemat dwustronnego kształtowania elektrochemicznego pióra łopatki z zastosowaniem sekwencji zabiegów ECM i PECM: ER - elektroda robocza, PO - przedmiot obrabiany, E - elektrolit, DC - zasilacz prądu stałego ciągłego i impulsowego

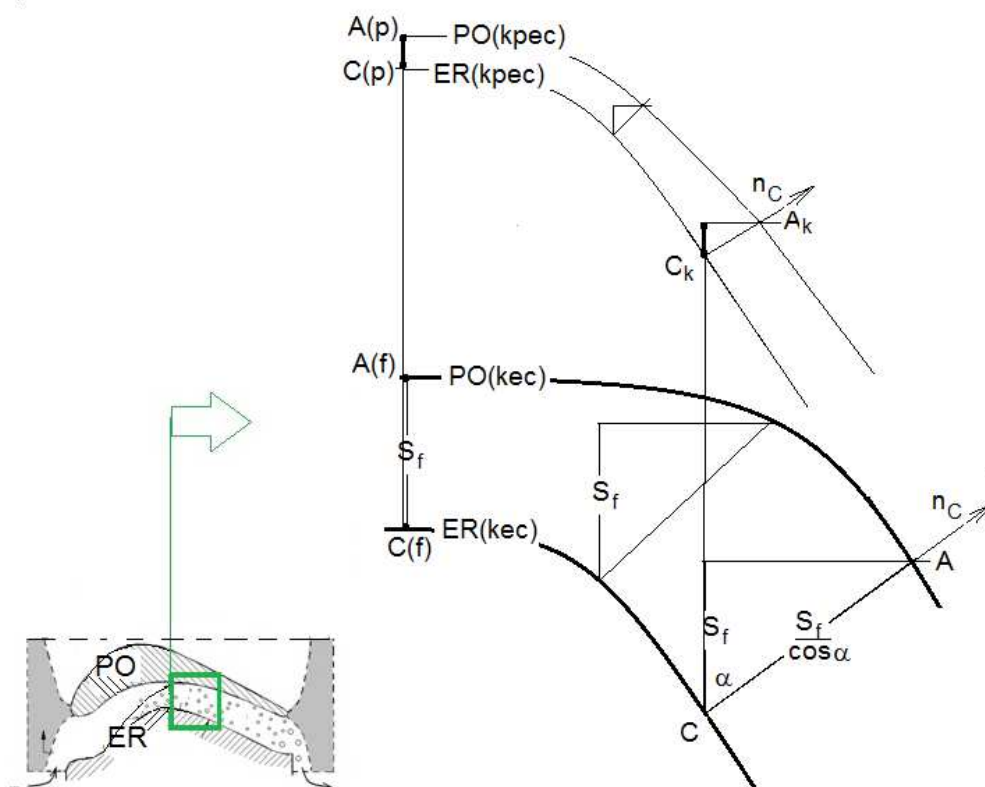
Fig. 2. Principal scheme of the shaping of both side of airfoil with using sequences of ECM and PECM treatments : ER-tool electrode, PO - workpiece, E - electrolyte, DC - power supply of continuous and pulse current

2. Zabieg obróbki wykańczającej usuwającej pozostałą część naddatku z zastosowaniem procesu PECM, w którym uzyskiwany jest finalny kształt pióra łopatki w zadanej tolerancji wymiarowej.

Wytwarzane z zastosowaniem technologii elektrochemicznego kształtowania łopatki sprężarki silnika turbinowego muszą spełniać wysokie wymagania użytkowe. Narzuca to konieczność projektowania i realizacji procesu obróbki zapewniającego uzyskanie wymaganej dokładności wymiarowej łopatek oraz jakości warstwy wierzchniej.

W chwili zakończenia zabiegu ECM, kształtowanie powinno odbywać się w warunkach możliwie jak najbardziej zbliżonych do ustalonych, co uzależnione jest wymiarami materiału wejściowego („kostki”) oraz położenia w nimżądanego profilu pióra.

Rozkład grubości szczeliny w chwili zakończenia fazy ECM, przy założeniu stanu ustalonego przedstawiony jest na (rys. 3) pogrubionymi liniami konturów elektrod: ER(kec) i PO(kec)).



Rys. 3. Schemat położenia elektrod: ER(kec), PO(kec)-odpowiednio położenie elektrody roboczej i powierzchni obrabianej w chwili zakończenia zabiegu ECM i rozpoczęcia PECM; ER(kpec), PO(kpec) - położenie ER i PO w chwili zakończenia PECM

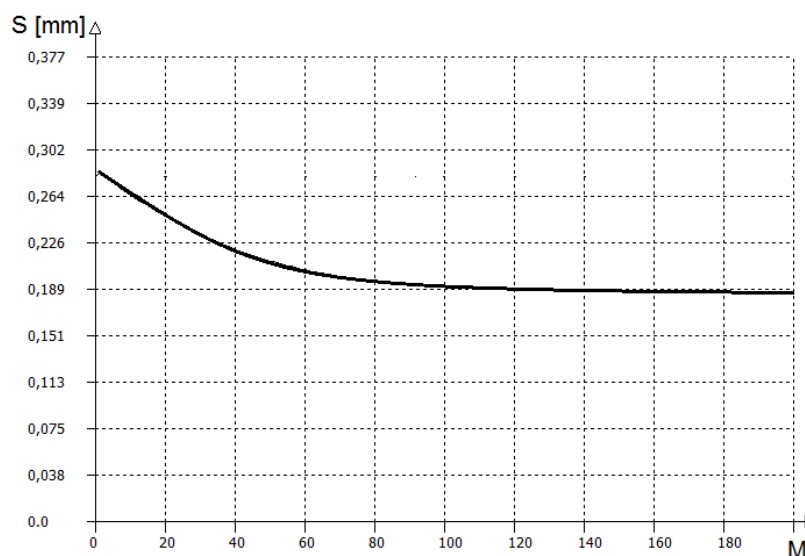
Fig. 3. Scheme of the position of electrodes: ER(kec) and PO(kec): - the position of the tool electrode and machined profile respectively, in the final moment of ECM and the initial moment of PECM; ER(kpec), PO(kpec) – the position of ER and PO in the last moment of PECM

Położenie początkowe elektrod oraz rozkład grubości szczeliny między elektrodami w chwili rozpoczęcia procesu PECM pokrywa się z końcową geometrią szczeliny procesu ECM (rys. 3). Kształt i wymiary profilu pióra uzyskiwane z PECM uwarunkowane są

rozkładem grubości szczeliny w chwili zakończenia procesu [linie cienkie: ER(kpec) i PO(kpec)].

W PECM stan fizyczny szczeliny, na który składają się takie wielkości jak temperatura, koncentracja fazy gazowej, gęstość prądu zmienia się w czasie (zarówno w pojedynczym impulsie jak i ciągu impulsów). Przy spełnieniu pewnych warunków początkowych może wystąpić powtarzanie się charakteru zmian stanu fizycznego szczeliny.

Można więc przyjąć, że następuje ustalanie się przebiegów wielkości fizycznych w szczelinie, co określane jest jako stan quasi-ustalony [1],[2]. Ustalanie się grubości szczeliny w czasie PECM ilustruje rysunek 4.



Rys. 4. Zmiana grubości szczeliny między elektrodami w czasie ciągu pakietów PECM

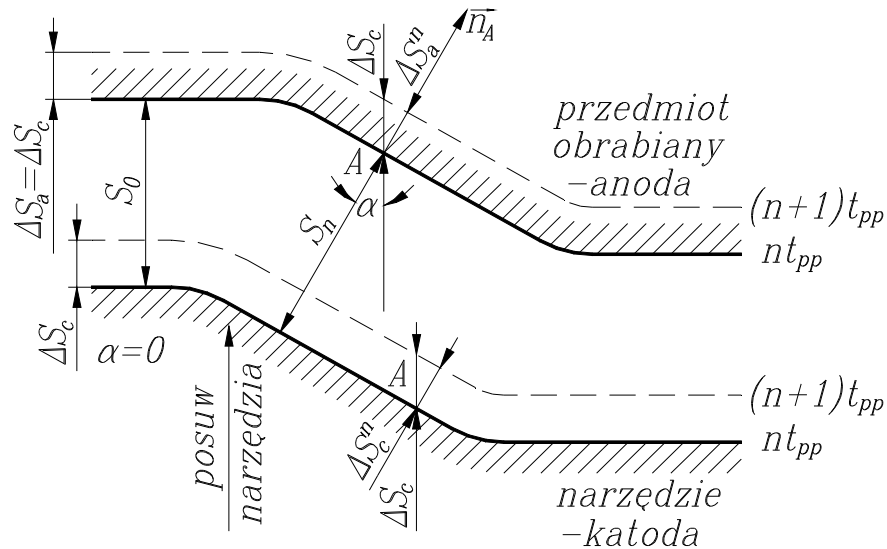
Fig. 4. Changes in the gap size in serial pulse packet

Zakończenie obróbki powinno odbywać się w warunkach możliwie najbardziej zbliżonych do stanu quasi-ustalonego (rys. 5). W stanie quasi-ustalonym grubość usuwanego nadkładu równa jest przemieszczeniu ER w kierunku dosuwu do PO.

W projektowaniu i optymalizacji technologii elektrochemicznej wyróżnia się następujące zadania cząstkowe:

- wstępny dobór parametrów w zabiegach ECM i PECM;
- wyznaczenie profilu elektrody roboczej jako ekwidystanty do profilużądanego łopatki uwarunkowanej czołową grubością szczeliny quasi-ustalonej w procesie impulsowym Sp . Wstępną wartość dobiera się z ograniczenia związanego z dopuszczalnym natężeniem prądu zasilacza impulsowego;
- symulacja kształtowania elektrochemicznego prądem ciągłym (ECM), z której wyznacza się rozkłady w szczelinie: ciśnienia, prędkości elektrolitu, temperatury, koncentracji fazy gazowej, gęstości prądu oraz natężenie prądu roboczego. W czasie

symulacji sprawdzane są warunki odnośnie ograniczeń procesu i ewentualnie przeprowadza się korekcję parametrów wyjściowych. Wynikiem symulacji jest profil powierzchni obrobionej w zabiegu ECM, który staje się profilem początkowym w symulacji procesu PECM;



Rys. 5. Położenie elektrod w stanie quasi-ustalonym: n - numer impulsu, t_{pp} - okres impulsu, ΔS_c - przemieszczenie katody w kierunku posuwu, ΔS_c^n - przesunięcie powierzchni katody w kierunku normalnym, ΔS_a^n - grubość nadatku rozтворzonego w czasie impulsu, ΔS_n - grubość szczeliny na początku impulsu (w przypadku pakietów impulsów: $n \Rightarrow m$, $t_{pp} \Rightarrow T$)

Fig. 5. The electrode surfaces positions under quasi - steady state of PECM: n - pulse number, t_{pp} - pulse period, ΔS_c - displacement of the cathode in feed direction, ΔS_c^n - displacement of the cathode in normal direction, ΔS_a^n - dissolved thickness during pulse, ΔS_n - initial gap size in pulse (in the case of using pulse packets: $n \Rightarrow m$, $t_{pp} \Rightarrow T$).

- symulacja kształtowania elektrochemicznego prądem impulsowym (PECM), z której wyznacza się rozkłady w szczelinie: temperatury, koncentracji fazy gazowej, gęstości prądu oraz natężenie prądu roboczego. W czasie symulacji sprawdzane są warunki odnośnie ograniczeń procesu i ewentualnie przeprowadza się korekcję parametrów wyjściowych. Wynikiem symulacji jest rozkład grubości szczeliny wzdłuż przepływu elektrolitu, a tym samym profil powierzchni obrobionej w zabiegu PECM, który staje się profilem końcowy;
- analiza dokładności profilu obrobionego oraz sprawdzenie czy założona wartość S_p przy projektowaniu elektrody roboczej spełnia warunki odnośnie wymaganej dokładności. W przypadku, gdy odchyłka $\Delta S_p = S_p(\text{symulacja}) - S_p$ przekracza założoną wartość dopuszczalną, należy przeprowadzić korekcję warunków wyjściowych;
- optymalizacja:
 - ECM z kryterium maksymalnej wydajności tj. $\max Vf$
 - PECM z kryterium maksymalnej dokładności tj. $\min. \Delta S = S_p(\alpha) - S_p$

Symulację ECM przeprowadza się z wykorzystaniem oprogramowania komputerowego opracowanego przez zespół Politechniki Warszawskiej i WSK – PZL - Rzeszów.

LITERATURA

- [1] KOZAK J., 1976, *Kształtowanie powierzchni obróbką elektrochemiczną bezstykową (ECM)*, Prace Naukowe PW, Mechanika, 41.
- [2] KOZAK J., RAJURKAR K. P., WEI B., 1994, *Modeling and Analysis of Pulse Electrochemical Machining (PECM)*, Transactions of the ASME- Journal of Engineering for Industry, 116/3, 316-323.

ELECTROCHEMICAL SHAPING OF AIRFOILS WITH USING SEQUENCES OF ECM-PECM TREATMENTS

Electrochemical machining using continuous and pulse current (ECM, PECM) provides an economical and effective method for machining high strength, heat-resistant materials into complex shapes such as airfoils of titanium alloys. The dimensional accuracy of ECM/PECM can be improved if a small interelectrode gap is maintained. This paper presents the manufacturing of airfoils by sequences both treatments ECM and PECM.