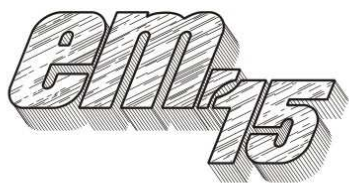


XII Międzynarodowa Konferencja - Electromachining 2015



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

Drażenie elektrochemiczne otworów w elementach silników turbinowych

Electrochemical drilling holes in the jet engine parts

JERZY KOZAK

W referacie przedstawiono zagadnienia chłodzenia łopatek turbin oraz drażnienia otworów chłodzących. Rozpatrzono modelowanie matematyczne procesu drażnienia elektrochemicznego strugą elektrolitu oraz dobór parametrów obróbki. Wykazano, że należy uwzględnić zmienność przewodnictwa elektrycznego elektrolitu wywołaną wydzielaniem ciepła w procesie. Omówiono badania doświadczalne oraz weryfikację modelu matematycznego.

SŁOWA KLUCZOWE: drażnienie, łopaska, chłodzenie, struga, elektrolit

Electrochemical Jet Machining (ECJM) is used for drilling small holes in aircraft turbine blades and complex shape holes. This paper presents a mathematical model for determining the relationship between the machining rates and conditions of ECJM. Experimental verification is also presented.

KEYWORDS: drilling, electrolyte, jet, blade, cooling

Wprowadzenie

Jednym z głównych kierunków rozwoju lotniczych silników turbinowych jest zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa, co wymaga podwyższenia sprawności energetycznej.

Decydujący wpływ na poprawienie całkowitej sprawności silnika ma wartość temperatury gazu przed turbiną. Z tych względów podwyższanie temperatury gazu przed turbiną należy do ważnych problemów rozwoju współczesnych silników turbinowych. Jego rozwiązanie jest utrudnione spadkiem wytrzymałości materiałów konstrukcyjnych ze wzrostem temperatury. Problem ten dotyczy w głównej mierze najbardziej obciążonych cieplnie i mechanicznie ele-

mentów turbiny, jakimi są łopatki.

Równolegle do badań nad nowymi żarowytrzymałymi materiałami na łopatki rozwija się technika chłodzenia łopatek. Pozwala ona dla danego materiału istotnie stosować wyższe temperatury przed turbiną.

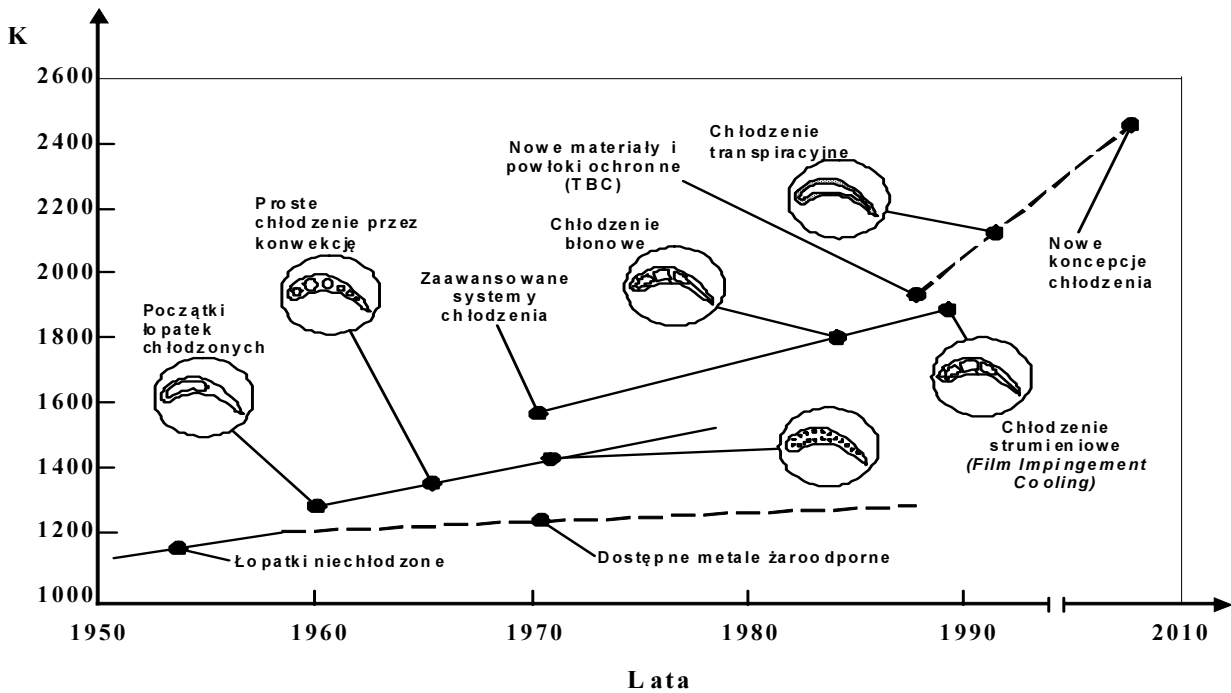
Początki prac nad chłodzeniem łopatek sięgają końca lat trzydziestych XX wieku kiedy to w Niemczech prowadzono prace nad zastosowaniem turbodoładowarek do lotniczych silników tłokowych. W latach czterdziestych chłodzenie łopatek turbin zastosowano w konstrukcji pierwszych silników turboodrzutowych, natomiast dynamiczny rozwój turbin z chłodzonymi łopatkami zaczął się w latach 1958-1960.

Chłodzenie łopatek najczęściej klasyfikuje się ze względu na sposób obiegu czynnika. W szczególności wyróżnia dwa następujące sposoby chłodzenia:

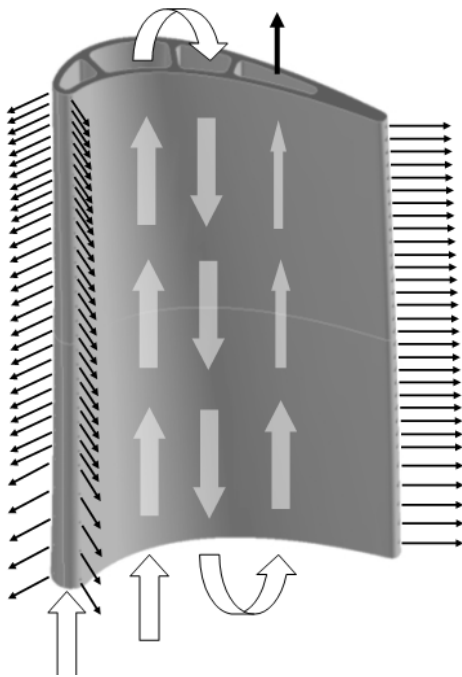
- z odprowadzeniem chłodziwa do czynnika roboczego,
- chłodzenie w obiegu zamkniętym.

W pierwszym przypadku czynnikami chłodzącymi są substancje pierwotne tj.: powietrze i paliwo oraz inne substancje które są w danych warunkach łatwo dostępne i nie działają szkodliwie na części maszyn. W drugim przypadku czynnikiem chłodzącym mogą być dowolne substancje.

Na rys. 1 zilustrowano postęp w podwyższaniu temperatury przed turbiną. Z przedstawionych danych wynika, że o ile ulepszenie własności żaroodpornych materiału pozwoliło na średni przyrost temperatury około 10-12 stopni na rok, to wprowadzenie chłodzenia wewnętrznego pozwoliło na podnoszenie temperatury przed turbiną o około 20 ÷ 25 stopni na rok [1]. Dalsze, znaczące podwyższanie temperatury gazu stało się możliwe dzięki zastosowaniu w łopatkach ochronnych barier termicznych z materiałów ceramicznych lub innych materiałów o małym współczynniku przewodzenia ciepła (TBC - Thermal Barrier Coating).



Rys. 1. Dynamika narastania temperatury gazu przed turbiną na przestrzeni minionych lat [1]



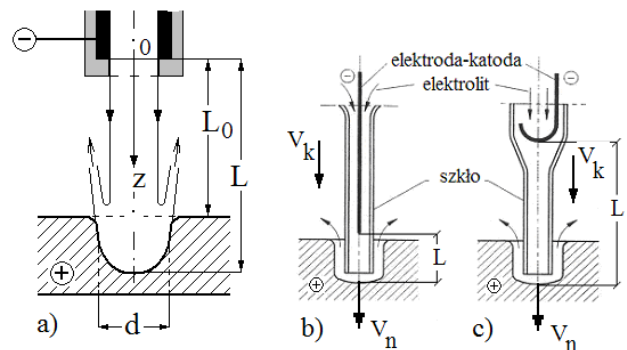
Rys. 2. Schemat chłodzenia łopatki[1]

Przykład łopatki chłodzonej przedstawiono na rys. 2, na którym strzałkami zaznaczono przepływy czynnika chłodzącego kanałami wewnętrznymi oraz jego wyprowadzanie poprzeczne przez otwory na wierzchołku łopatki i na krawędzi spływu.

Drażnienie elektrochemiczne otworów

Przy produkcji łopatek z chłodzeniem poprzecznym duże trudności technologiczne stwarza wykonanie otworów (szczelin) w powierzchniach bocznych łopatki, a szczególnie w krawędzi spływu. Jednym z efektywnych sposobów obróbki otworów o małych średnicach (poniżej 1 mm) jest drażnienie elektrochemiczne strugą elektrolitu (Electrochemical Jet Machining-ECJM) [2-6], strugą swobodną (rys.3a) lub prowadzoną szklaną kapilarą (rys.3b,c).

W obróbce elektrochemicznej (ECM), prędkość rozwarzania anodowego materiału obrabianego jest proporcjonalna do gęstości prądu zależnej od odległości elektrody roboczej-katoda od powierzchni obrabianej-anody. W klasycznym drażnieniu elektrochemicznym elektrodą w postaci rurki metalowej z izolowaną powierzchnią boczną stosuje się odległości-szczeliny między elektrodami w granicach $S=0.05-0.5$ mm.



Rys. 3. Drażnienie elektrochemiczne strugą elektrolitu

W opisywanym sposobie odległość L jest wielokrotnie większa i może w przypadku strugi prowadzonej osiągać wartości $L=10-20$ mm. Z tych względów dla uzyskania dużych gęstości prądu ($20-100$ A/cm²) stosowane są elektrolity o możliwie dużej przewodności elektrycznej (np. kwas siar-

kowy, solny) oraz znaczne robocze napięcie międzyelektrodowe $U = 80-300$ V. Ze względu na dużą odległość L następuje wydłużenie okresu przejściowego obróbki ECM, co prowadzi praktycznie do utraty zdolności samoregulacji procesu.

W tych warunkach ważnym zagadnieniem staje się wyznaczenie z możliwie dużą dokładnością wartości prędkości roztwarzania V_n . Znajomość jej jest niezbędna dla sterowania dosuwem elektrody roboczej tak by prędkość dosuwu V_k była równa V_n . Przy stosowaniu kapilar szklanych źle dobrana prędkość dosuwu ($V_k > V_n$), może spowodować kolizję kapilary z dnem otworu i jej uszkodzenie.

Modelowanie matematyczne procesu drążenia

W modelowaniu matematycznym opisującym powiązania prędkości roztwarzania V_n z parametrami obróbki przyjmuje się następujące założenia:

- wpływ procesów elektrodowych uwzględnia się przez wprowadzenie polaryzacji anody E_a i katody E_c do warunków brzegowych dla potencjału elektrycznego oraz obrabialności elektrochemicznej K_V ,
- rozpatruje się jednowymiarowe modele procesów, a w szczególności zakłada się, że średnica strugi nie zmienia się wzdłuż przepływu oraz w przekroju poprzecznym strugi wartości prędkości, temperatury, gradientu potencjału elektrycznego są stałe i równe wartościom średnim,
- pomija się wpływ fazy gazowej na proces ECJM.

Na podstawie prawa Faraday'a, prędkość V_n opisana jest zależnością:

$$V_n = K_V i \quad (1)$$

gdzie i gęstość prądu, natomiast K_V jest współczynnikiem obrabialności elektrochemicznej zdefiniowanym jako objętość materiału roztworzonego elektrochemicznie podczas przepływu jednostkowego ładunku elektrycznego.

Współczynnik K_V dla danego materiału i elektrolitu zależy od wielu czynników, a w szczególności od gęstości prądu oraz prędkości elektrolitu w .

Dla wyznaczenia gęstości prądu niezbędne jest rozwiązanie równania opisującego rozkład potencjału elektrycznego u w strudze elektrolitu, które przy przyjętych założeniach opisane jest równaniem:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

z warunkami brzegowymi:

$$u(z=0) = 0 \text{ and } u(z=L_e) = U - E$$

gdzie $E = E_a - E_c$, natomiast $L_e = L/\lambda$ jest efektywną odległością elektrody-katody od anody uwzględniającą nierównomierność pola elektrycznego w elektrolicie opisaną współczynnikiem λ [6].

Dla danego układu elektrod (rys. 3), współczynnik nierównomierności pola elektrycznego jest zdefiniowany następująco:

$$\lambda = \frac{L}{U_0} \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=L} \quad (3)$$

Dla przypadku ECJM przedstawionym na rys. 3a dla $L \in (0.25d, 8d)$, [6]:

$$\lambda = 0.58 \left(\frac{2L}{d} \right)^{0.12} \quad (4)$$

Występująca w równaniach konduktywność elektryczna κ przy przyjętych założeniach wyraża się zależnością:

$$\kappa = \kappa_0 (1 + \alpha_T \cdot \theta) \quad (5)$$

gdzie α_T jest termicznym współczynnikiem konduktywności, a $\theta = T - T_0$ przyrostem temperatury elektrolitu w odniesieniu do temperatury początkowej T_0 na wylocie z elektrody-katody.

Całkując równanie (2) z uwzględnieniem zależności (3), otrzymujemy:

$$\kappa_0 [1 + \alpha_T \theta] \cdot \frac{\partial u}{\partial z} = C \quad (6)$$

gdzie stała C równa jest gęstości prądu i w strudze.

Rozkład temperatury w strudze w wyniku wydzielania ciepła Joule'a opisany jest równaniem:

$$w \cdot \frac{d\theta}{dz} = \frac{i^2}{\kappa_0 \cdot \rho_e \cdot C_p \cdot (1 + \alpha_T \cdot \theta)} \quad (7)$$

$$\theta(z=0) = 0$$

gdzie ρ_e , C_p – gęstość i ciepło właściwe elektrolitu.

Po rozwiązaniu równania (7), rozkład temperatury opisany jest zależnością:

$$\theta = \frac{1}{\alpha_T} \left(\sqrt{1 + 2\alpha_T q \cdot z} - 1 \right) \quad (8)$$

gdzie $q = \frac{i^2}{\kappa_0 \rho_e C_p w}$.

Rozwiązując równanie (6) z uwzględnieniem otrzymanego rozkładu temperatury (8) oraz warunków brzegowych, po przekształceniach otrzymujemy zależności na poszukiwaną gęstość prądu i :

$$i = \frac{i_0}{1 - \frac{\alpha_T (U_0 - E) i_0}{2 \rho_e C_p w}} \quad (9)$$

oraz maksymalną prędkość roztwarzania V_m :

$$V_m = \frac{\kappa_0 K_V (U_0 - E)}{L_e - \frac{\alpha_T \kappa_0 (U_0 - E)^2}{2 \rho_e C_p w}} \quad (10)$$

przy czym $i_0 = \kappa_0 \frac{U_0 - E}{L_e}$ jest gęstością prądu przy pominięciu nagrzewania.

Jak wynika z otrzymanej zależności (10), w przypadku gdy współczynnik obrabialności elektrochemicznej K_V zmienia się nieznacznie z warunkami hydrodynamicznymi, przy zmniejszaniu prędkości przepływu elektrolitu, prędkość drążenia rośnie. Wynika to z wzrostu konduktywności elektrycznej elektrolitu wskutek nagrzewania, które przy

mniejszych prędkościach strugi jest większe. Należy jednak mieć na uwadze, że przy doborze parametrów drążenia ECJM, maksymalny przyrost temperatury $\theta_{\max} = \theta(L)$ nie powinien przekraczać wartości dopuszczalnej θ^* .

Wartość θ_{\max} wynosi:

$$\theta_{\max} = \frac{2i_0 U_0}{2\rho_e C_p w - \alpha_T i_0 U_0} \quad (11)$$

Zależność gęstości prądu od maksymalnego przyrostu temperatury ma postać następującą:

$$i = \kappa_0 \left(1 + \frac{1}{2} a_T \theta_{\max} \right) \frac{U_0 - E}{L_e} \quad (12)$$

Prędkość roztwarzania gdy elektrolit nagrzewa się do założonej (dopuszczalnej) temperatury jest graniczną dla danych warunków i jej wartość wynosi:

$$V^* = K_v \kappa_0 \left(1 + \frac{1}{2} a_T \theta^* \right) \frac{U_0 - E}{L_e} \quad (13)$$

Niezbędna prędkość elektrolitu w strudze ze względu na założony przyrost temperatury, równa jest:

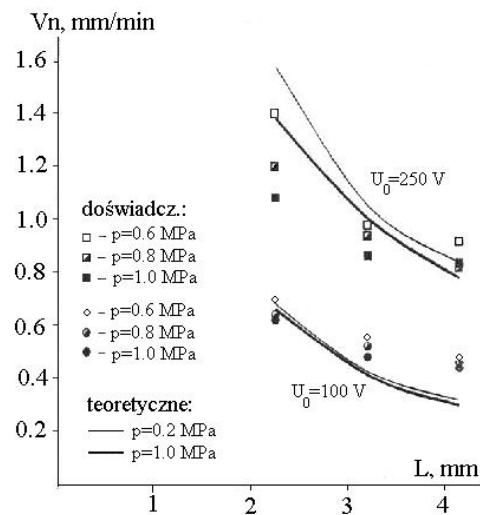
$$w^* = \frac{\kappa_0 U_0^2}{\rho_e C_p L_e \theta^*} \quad (14)$$

Na podstawie przedstawionych zależności (10-14) można wyznaczyć główne charakterystyki procesu ECJM, a w szczególności powiązania prędkości drążenia z napięciem roboczym, położeniem elektrody-katody, prędkością elektrolitu oraz właściwościami fizycznymi układu elektrolit-materiał obrabiany.

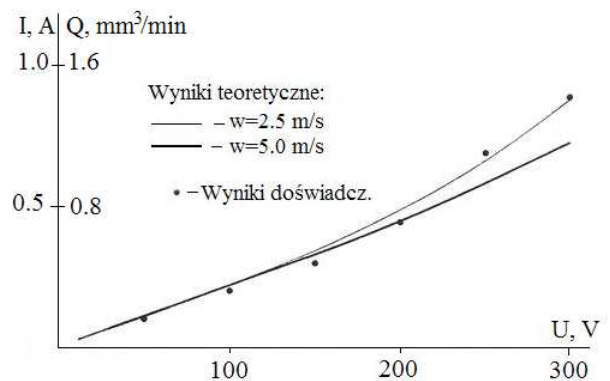
Badania doświadczalne procesu ECJM

Badania doświadczalne ECJM przeprowadzono na stanowisku badawczym wyposażonym w zasilacz prądowy o napięciu roboczym U_0 do 500 V i maksymalnym prądzie roboczym $I = 10$ A. Badania przeprowadzono dla stopu żarowytrzymałego Inconel 600, drążonego w 15% roztworze wodnym NaCl, przy ciśnieniach tłoczenia $p = 0.6, 0.6, 1.0$ MPa, oraz napięciach roboczych $U_0 = 100, 175, 250, 300$ V. W drążeniu stosowane były dysze-elektrody robocze o średnicach $d = 0.25, 0.5, 0.7$ mm, ustawione w odległości $L = 2, 3, 5$ mm od powierzchni obrabianej.

W czasie badań wyznaczane były podstawowe charakterystyki procesu ECJM. Przykładowe wyniki badań przedstawione są na rys. 4 i 5. Zmiany prędkości drążenia z odległością dyszy od powierzchni obrabianej dla różnych ciśnień oraz napięć roboczych pokazane są na rys.4. Badania doświadczalne potwierdziły wniosek analizy teoretycznej odnośnie wzrostu prędkości roztwarzania ze zmniejszaniem się prędkości strugi.



Rys.4. Zależność prędkości drążenia od położenia dyszy



Rys.5. Wpływ napięcia na natężenie i wydajność właściwą ECJM

Na rys.5 przedstawiono wyniki teoretyczne i doświadczalne dotyczące wpływu napięcia roboczego na natężenie prądu w ECJM oraz na wydajność właściwą drążenia.

Podsumowanie

Efektywnym sposobem wykonania otworów chłodzących w łopatkach turbin jest obróbka elektrochemiczna strugą elektrolitu (ECJM). Przedstawione modelowanie matematyczne procesu ECJM opisuje powiązania parametrów drążenia elektrochemicznego. Przeprowadzona weryfikacja wykazała zadowalającą dla potrzeb praktyki, zgodność wyników z modelowaniem matematycznym z wynikami doświadczalnymi.

LITERATURA

1. Wasilewski M.: Wpływ warunków wymiany ciepła na obciążenia cieplne łopatki silnika odrzutowego chłodzonej powietrzem. Praca magisterska. Politechnika Warszawska, Warszawa, 2001.
2. Glew D.A.: Fine Hole with ECM. Proceeding of the 6th ISEM, Krakow, 401-405,1980.
3. Kozak J., Łubkowski K., Rozenek M.: Elektrochemiczne drążenie otworów chłodzących w łopatkach turbinowych. Zbiór prac VI Konferencji „Technologia przepływowych maszyn wirnikowych”, 319-326, Rzeszów 1988.
4. Kozak J., Some Aspects of Electro Jet Drilling, Proceed. Int. Conf. on PEDAC'89, Alexandria, 363-369,1989.
5. J Pattavanitch J, S Hinduja S., - Machining of turbulated cooling channel holes in turbine blades, CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 61, No.1, 2012,199-202,2012.
6. Kozak J., Rajurkar K., P., Balkrishna R., Study of Electrochemical Jet Machining Process, Transactions of the ASME-Journal of Manufacturing Sciences and Engineering, Vol.118, No. 4, 490-498,1996.