

ELEKTROEROZYJNE DRAŻENIE ŻAROWYTRZYMAŁYCH STOPÓW NIKLU

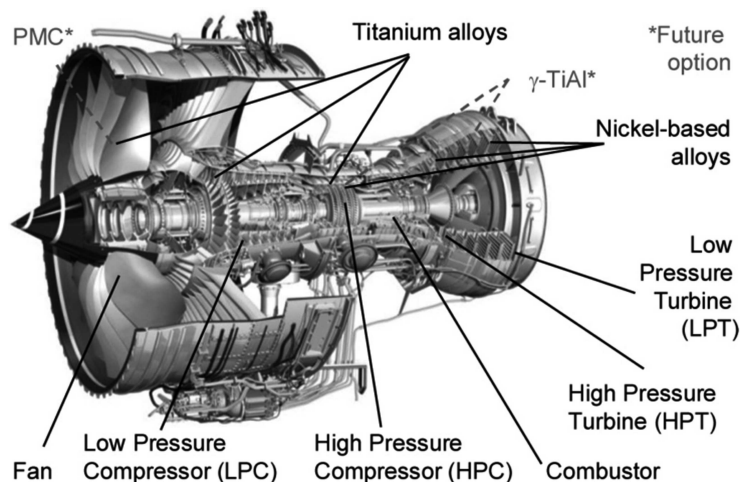
Słowa kluczowe:

żarowytrzymałe stopy niklu, obróbka elektroerozyjna, drażnienie elektroerozyjne, Inconel 625, Inconel 718

1. Wstęp

Wysoki popyt na silniki odrzutowe nowej generacji jest spowodowany obostrzeniami [14] związanymi z koniecznością ograniczenia emisji spalin, szkodliwych gazów, a także redukcją hałasu. Co więcej, na rynku silników odrzutowych istnieje dość duża konkurencja, która zmusza producentów do minimalizacji kosztów produkcji, a tym samym stosowania wydajnych i niedrogich technologii obróbkowych, umożliwiających jednocześnie zachowanie integralności powierzchni i geometrii wytwarzanych elementów [3]. Bardzo wysokie temperatury i ciśnienie panujące w silnikach odrzutowych (przekraczające 800°C) w znacznym stopniu ograniczają wybór materiałów na ich komponenty. Ze względu na bardzo dobre własności mechaniczne, chemiczne i termiczne w tak ekstremalnych środowiskach pracy wykorzystywane są żarowytrzymałe stopy niklu [10]. Są to stopy wieloskładnikowe, zawierające oprócz niklu chrom, molibden, żelazo i inne dodatki stopowe. Komponenty wykonane z tych stopów znajdują także zastosowanie w przemyśle medycznym, chemicznym, nuklearnym, samochodowym i paliwowym [11]. Typowymi przykładami zastosowania superstopów niklu są komponenty silników odrzutowych, takie jak łopatki turbin i komory spalania (rys. 1).

Pomimo doskonałych własności wytrzymałościowych i termicznych, elementy wykonane ze stopów niklu wymagają dodatkowego wewnętrznego i zewnętrznego chłodzenia, tak aby dostatecznie długo zachować swoje własności,



Rys. 1. Elementy silnika odrzutowego Rolls Royce Trend 800 [8]

w tych bardzo niekorzystnych warunkach pracy. Chłodzenie wewnętrzne, polega na przepływie gazu lub cieczy przez kanały wewnątrz łopatki (rys. 2). Najpopularniejszą metodą chłodzenia zewnętrznego turbiny jest przepływ powietrza przez otwory wewnątrz łopatki, a następnie przez dyfuzyjny wylot w ścianie łopatki, na zewnętrzną powierzchnię łopatki. W każdej łopatce wykonuje się więc bardzo dużą ilość otworów, do równomiernego i efektywnego chłodzenia [6]. Z tego też powodu, jednym z ważniejszych zabiegów przy wykonywaniu łopatek turbin jest drażnienie otworów.



Rys. 2. Elementy turbiny z otworami chłodzącymi [8]

W celu maksymalizacji zdolności chłodzenia turbiny, przy równoczesnej minimalizacji zużycia paliwa, drażnione są otwory o bardzo małych średnicach, dużej smukłości i odpowiednich kątach nachylenia względem powierzchni łopatek [1]. Stosowanie konwencjonalnych metod obróbki jest w tym przypadku bardzo trudne i kosztowne, a przy otworach o średnicy poniżej 1 mm, wręcz niemożliwe. Należy zwrócić uwagę, że podczas obróbki wiórowej żarowytrzymałe stopy niklu mają tendencję do tworzenia narostów na ostrzach skrawających, utwardzania się, a stosunkowo niska przewodność cieplna powoduje, że usuwanie materiału związane jest z generacją dużej ilości ciepła w strefie skrawania [11, 13]. Powierzchnia uzyskana w wyniku obróbki skrawaniem charakteryzuje się więc dużymi wpływami mechaniczno-cieplnymi i uszkodzeniami, a duże siły skrawania powodują szybkie zużywanie się ostrza skrawającego. Z tego też powodu obróbka skrawaniem żarowytrzymałych stopów niklu charakteryzuje się bardzo niską wydajnością, dokładnością i jakością obrabianej powierzchni, a także generuje wysokie koszty [7, 12]. Alternatywę stanowią niekonwencjonalne metody obróbkowe, jedną z nich jest obróbka elektroerozyjna, należąca do kluczowych technologii obróbkowych wykorzystywanych w procesie wytwarzania łopatek turbin.

2. Elektroerozyjne drażenie otworów w żarowytrzymałych stopach niklu

Obróbka elektroerozyjna (EDM) jest jedną z najczęściej wykorzystywanych niekonwencjonalnych metod obróbki. Może ona być stosowana do wszystkich materiałów przewodzących prąd elektryczny, niezależnie od ich składu chemicznego i własności mechanicznych. Dzięki obróbce EDM możliwe jest otrzymywanie elementów o skomplikowanej geometrii, niewielkich rozmiarach czy struktur cienkościennych. Ponadto jest to metoda stosunkowo tania, dlatego stała się jedną z najpopularniejszych metod obróbkowych [9]. Podczas obróbki elektroerozyjnej naddatek jest usuwany w wyniku erozji elektrycznej, zachodzącej na skutek zjawisk towarzyszących impulsowemu wyładowaniu elektrycznym, pomiędzy elektrodą roboczą a przedmiotem obrabianym (rys. 3). Do generatora impulsów napięcia elektrycznego podłączona jest elektroda robocza i przedmiot obrabiany, a szczelina pomiędzy nimi wypełniona jest dielektrykiem [12]. W strefie obróbki cały czas wymuszony jest przepływ dielektryka, którego głównym zadaniem jest chłodzenie, zestalanie stopionego materiału i jego usuwanie ze strefy obróbki. Do obróbki elektroerozyjnej najczęściej wykorzystywane są dielektryki węglowodorowe i wodne [9].

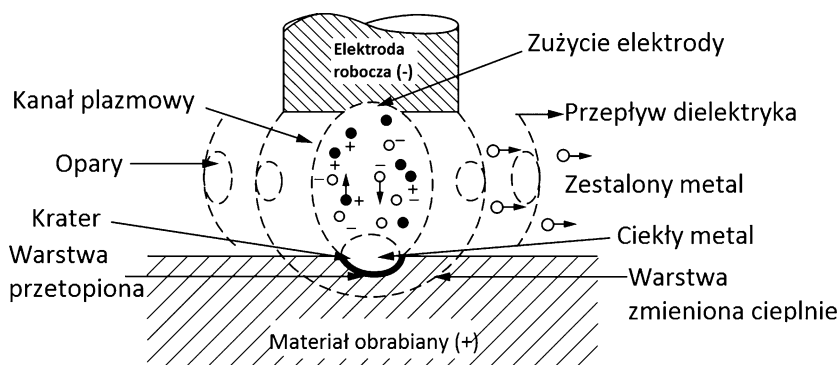
Ze względu na termiczny charakter usuwania materiału w EDM, podczas obróbki w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego powstaje strefa wpływów cieplnych. Charakteryzuje się ona zmienionymi własnościami w stosunku do materiału rodzimego (można zaobserwować mikropęknięcia, związane z obecnością dużych naprężeń własnych, porowatość powierzchni, rozrost granic ziaren, czy wreszcie zmiany w składzie chemicznym) [10]. Grubość warstwy wpływów cieplnych jest jednym z najważniejszych parametrów, determinujących jakość komponentu, a tym samym dopuszczenie go do zastosowania w przemyśle lotniczym. Zbadano [6], że im grubsza warstwa wpływów cieplnych, tym tendencja do powstawania mikropęknięć jest większa, a tym samym wytrzymałość i integralność powierzchni przedmiotu obrabianego jest mniejsza.

Zmiany właściwości technologicznej warstwy wierzchniej powstałe w wyniku obróbki elektroerozyjnej, związane są z zastosowanymi parametrami technologicznymi (do najważniejszych należy zaliczyć czas impulsu, napięcie wyładowania oraz amplitudę natężenia prądu, które określają energię wyładowania) oraz rodzajem zastosowanego dielektryka

[11]. Biorąc pod uwagę problem elektroerozyjnego drażenia otworów (EDD) [5], trzeba także zwrócić uwagę na przepływ dielektryka. Odgrywa on bardzo ważną rolę w utrzymaniu stabilnych warunków obróbki, usuwając powstałe cząstki materiału ze strefy obróbki, zapobiega powstawaniu zwarć. Pomimo, że istnieje kilka metod podawania cieczy roboczej do strefy obróbki, problemem nadal jest całkowita eliminacja zanieczyszczeń z bardzo wąskiej przestrzeni pomiędzy elektrodą roboczą a powierzchnią poddawaną obróbce [2]. Jest to bardzo istotne zagadnienie, szczególnie w przypadku drażenia głębokich i bardzo wąskich otworów w żarowytrzymałych stopach niklu (elementy silników odrzutowych), gdzie w drażonym zagłębieniu gromadzą się zanieczyszczenia, które powodują wydłużenie przebiegu drażenia elektroerozyjnego i pojawianie się wyładowań zwarciovych [2]. Z dotychczas przeprowadzonych badań [2] wynika, że usuwanie zestalonego materiału jest znacznie łatwiejsze z otworów drażonych pod pewnym kątem. Zauważono także, że dielektryk węglowodorowy musi być podawany w strefę obróbki w sposób ciągły, natomiast elektroda robocza musi być podrywana powyżej obrabianej powierzchni bazowej, by umożliwić przepływ dielektryka przez drażony otwór [2].

Czynnikiem najbardziej wpływającym na wydajność obróbki elektroerozyjnej jest amplituda natężenia prądu w impulsie [11]. Zwiększając natężenie prądu uzyskuje się większą wydajność obróbki, przy jednoczesnym pogorszeniu jakości obrabianej powierzchni. Wydłużenie czasu impulsu prowadzi natomiast do znacznego obniżenia zużycia elektrody roboczej, przy równoczesnym obniżeniu wydajności obróbki elektroerozyjnej. Uzyskanie pożądanego objętościowego ubytku w przypadku obróbki EDM żarowytrzymałych stopów niklu jest bardzo trudne, ze względu na to, że istotny wpływ na wydajność obróbki mają właściwości cieplne tych stopów – temperatura topnienia, przewodność cieplna, współczynnik rozszerzalności cieplnej oraz pojemność cieplna [12].

Biorąc pod uwagę możliwości, jakie daje obróbka elektroerozyjna przy odpowiednio dobranych parametrach obróbkowych, jest ona jedną z najczęściej wykorzystywanych niekonwencjonalnych metod obróbki elementów wykonanych z materiałów trudnoobrabialnych, gdy konieczne jest uzyskanie bardzo dużej dokładności wymiarowo-kształtowej, bez wprowadzania istotnych zmian w strukturze warstwy wierzchniej.



Rys. 3. Schemat przebiegu procesu EDM [4]

3. Metodyka badań

Celem przeprowadzonych badań doświadczalnych było określenie wpływu amplitudy natężenia prądu oraz czasu impulsu na wydajności obróbki żaroodpornych stopów niklu Inconel 718 oraz Inconel 625. Ponadto podjęto próbę określenia wpływu wspomnianych parametrów obróbki (amplituda natężenia prądu i czas impulsu) na stan struktury warstwy wierzchniej stopu Inconel 718. Do badań wykorzystano próbki stopów Inconel 718 oraz Inconel 625, w których drażono otwory, w obecności dielektryka

węglowodorowego (Exxsol D80). Badania doświadczalne przeprowadzono w Instytucie Technologii Maszyn i Automatykacji produkcji Politechniki Krakowskiej, na stanowisku badawczym (rys. 4) wyposażonym w generator elektroerozyjny BP 95 produkcji ZAP B.P. Końskie-Kutno oraz oscyloskop Tektronix TDS 3032C (300 MHz; 2,5 GS/s) [12]. Warunki obróbki zestawiono w tabeli 1.

Zgodnie z planem badań w próbkach stopu Inconel 625 oraz Inconel 718 zostało wydrążonych elektroerozyjnie 11 otworów. W celu określenia dokładności badań próbę odpowiadającą centrum badań (amplituda natężenia prądu $I=10$ A, $t_i=150$ μ s, $t_p=15$ μ s) powtórzono trzykrotnie. Po przeprowadzonych próbach doświadczalnych:

- na podstawie zarejestrowanych podczas drażenia przebiegów prądowo-napięciowych obliczono średnią energię wyładowania zgodnie z zależnością:

$$E = \int_0^{t_i} U(t) \times I(t) dt, \quad (1)$$

gdzie:

E – energia wyładowania,

$U(t)$ – napięcie,

$I(t)$ – natężenie prądu,

- dokonano pomiaru średnic wydrążonych otworów, by możliwe było obliczenie grubości szczeliny bocznej S_b ,

- zważono elektrodę roboczą oraz próbki (przed i po każdej próbie) i na tej podstawie obliczono ubytki objętościowe, w celu określenia objętościowej wydajności obróbki oraz względnego objętościowego zużycia elektrody roboczej,
- w celu identyfikacji zmian struktury warstwy wierzchniej wykonano zdjęcia powierzchni próbki Inconel 718 skaningowym mikroskopem elektronowym JSM 5510 LV,
- z wykorzystaniem przystawki EDS (rentgenowskiej spektroskopii energodispersyjnej) oznaczono zmiany składu chemicznego w obszarach stopu Inconel 718 poddawanych analizie (przyjęto metodę jakościową, która umożliwia jedynie stwierdzenie występowania poszczególnych pierwiastków w badanym obszarze).

4. Analiza wyników

Na rysunku 5. przedstawione zostały zależności pomiędzy amplitudą natężenia prądu podczas obróbki elektroerozyjnej a wydajnością obróbki. Wynika z nich, że wzrost wydajności obróbki jest powodowany wzrostem amplitudy natężenia prądu, natomiast znacznie większą wydajność obróbki EDM przy tych samych wartościach amplitudy natężenia prądu i czasu impulsu obserwuje się dla stopu Inconel 625, w porównaniu ze stopem Inconel 718. Największą

wartość wydajności obróbki na poziomie 20 mm³/min zaobserwowano w przypadku obróbki stopu Inconel 625 przy natężeniu prądu 15 A i czasie impulsu 200 μ s.

Z zależności przedstawionej na rysunku 6. wynika, że wydajność objętościowa obróbki jest mocno związana ze średnią energią wyładowania. Trzeba zaznaczyć, że w przypadku stopu Inconel 625 obserwuje się znacznie wyższą wydajność obróbki przy niższych średnich energiach wyładowania. Przy średniej energii w impulsie wynoszącej 0,07 J osiągana jest najwyższa wydajność obróbki (na poziomie 20 mm³/min). Średnie energie wyładowań występujące podczas obróbki stopu Inconel 718 są znacznie wyższe niż przy obróbce stopu Inconel 625 – osiągają poziom 0,05-0,18 J. Jeśli chodzi o wydajność obróbki stopu Inconel 718 to jest ona czterokrotnie niższa (5 mm³/min) w stosunku do stopu Inconel 625.

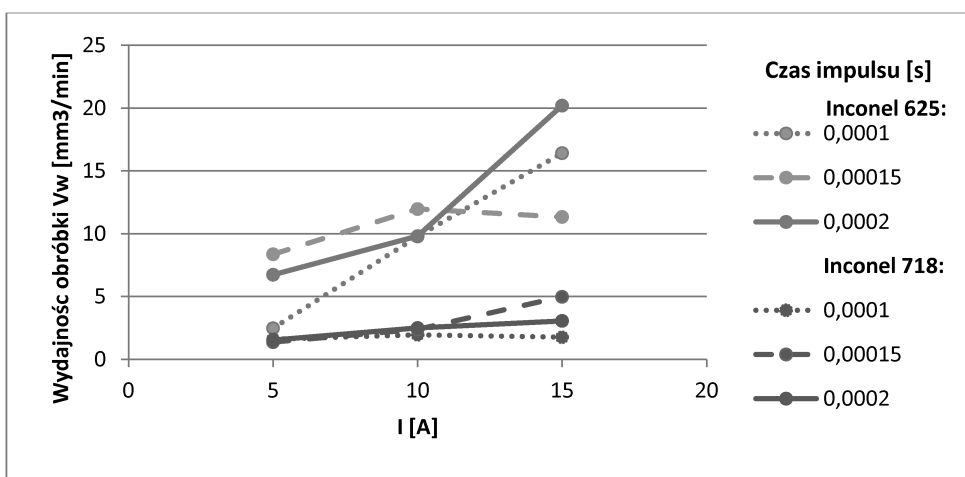
Poddając analizie wpływ długości czasu impulsu na wydajność obróbki (zestawienie w tab. 2) można zauważyć, że w przydadku stopu Inconel 718 wydajność obróbki nieznacznie wzrasta wraz z wydłużaniem czasu impulsu do wartości 150 μ s (wyjątek stanowi obróbka przy $I=5$ A, gdzie obserwuje się nieznaczny spadek wydajności, wynikający najprawdopodobniej z zaburzenia



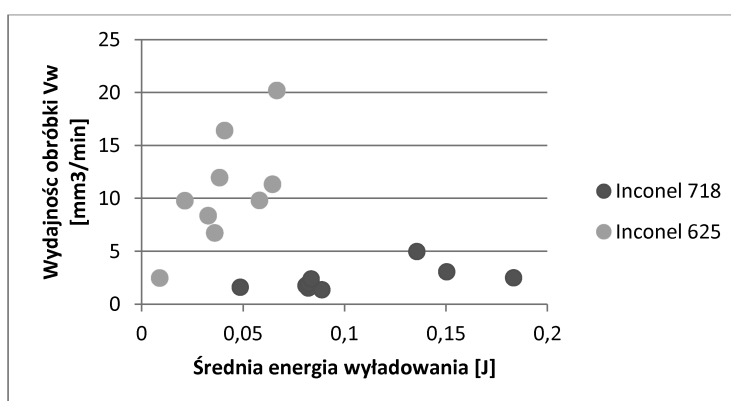
Rys. 4. Stanowisko badawcze

Material próbki	Inconel 718	Inconel 625	
Elektroda robocza:	walcowa elektroda miedziana		
	\varnothing 4 mm	\varnothing 10,3 mm	
Dielektryk	Exxsol D80		
Czas impulsu	100 μ s	150 μ s	200 μ s
Czas przerwy:	10 μ s	15 μ s	20 μ s
Amplituda natężenia prądu	5 A, 10 A, 15 A		
Biegunowość elektrody i materiału obrabianego	biegunowość prosta		
Czas obróbki	15 min.		

Tab. 1. Warunki przeprowadzonych prób obróbki EDM



Rys. 5. Zależność wydajności obróbki stopu Inconel 625 i Inconel 718 od zadanego natężenia prądu, dla poszczególnych wartości czasu impulsu [12]



Rys. 6. Zależność wydajności obróbki stopów Inconel 718 i Inconel 625 od średniej energii wyładowania [12]

Natężenie prądu 5 A		Natężenie prądu 10 A		Natężenie prądu 15 A	
<p>Legend: Inconel 625 (light grey), Inconel 718 (dark grey)</p>					

Tab. 2. Zależności wydajności obróbki od czasu trwania impulsu, przy różnych natężeniach prądu [12]

stabilności procesu), po czym spada – przy najdłuższym czasie impulsu – 200 μs. Największa wartość wydajności obróbki dla stopu Inconel 718 wynosiła 4,9 mm³/min przy I=15 A. W przypadku stopu Inconel 625 to charakter zmian wydajności obróbki jest zachowany z niewielkimi odchyleniami (spowodowanymi zapewne zaburzeniem stabilności procesu obróbki EDM), mianowicie wydłużenie czasu trwania impulsu także powoduje spadek wydajności obróbki. Największa zaobserwowana dla stopu Inconel 625 wartość wydajności obróbki wynosiła 20,2 mm³/min przy I=15 A.

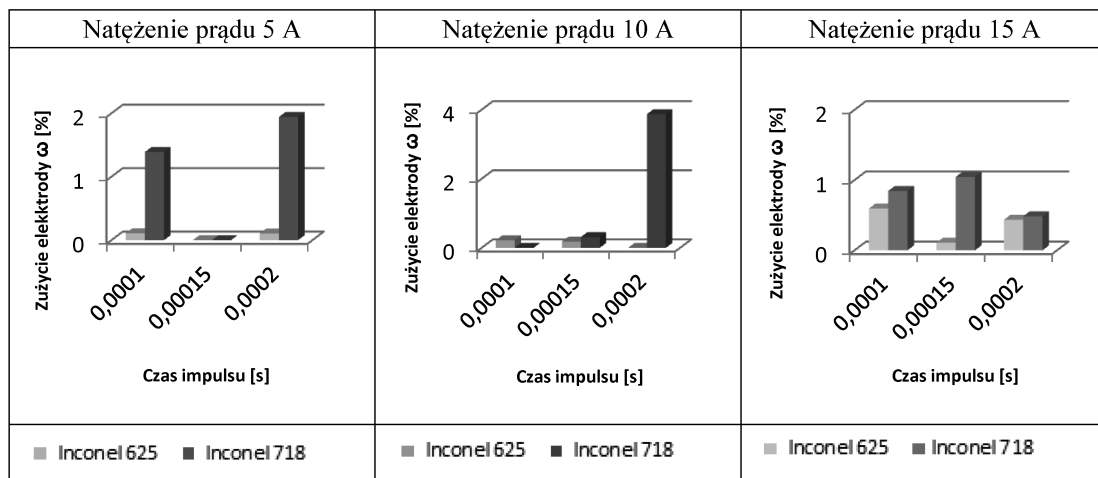
Wszystkie zaburzenia zależności pomiędzy badanymi czynnikami wskazują na utrudnione odprowadzenie ciepła z obszaru wyładowania i są związane z wyraźnie mniejszą przewodnością cieplną badanych stopów w porównaniu do innych materiałów przewodzących prąd. Bardzo trudno jest określić zależność pomiędzy czasem impulsu a zużyciem elektrody roboczej. Jest to zapewne związane z niską dokładnością przyjętej metody obliczenia zużycia (odchylenie względne z powtórzonych pomiarów dla centrum planu badań wynosiło 88%). Zdecydowanie

większe procentowe zużycie elektrody roboczej zaobserwowano, w porównaniu do obróbki stopu Inconel 625 przy tych samych parametrach, przy obróbce EDM stopu Inconel 718, przy wszystkich wartościach amplitudy natężenia prądu. Warto zaznaczyć, że maksymalne procentowe zużycie elektrody roboczej dla stopu Inconel 718 wynosiło 3,9%, podczas gdy dla stopu Inconel 625 0,6% (tab. 3).

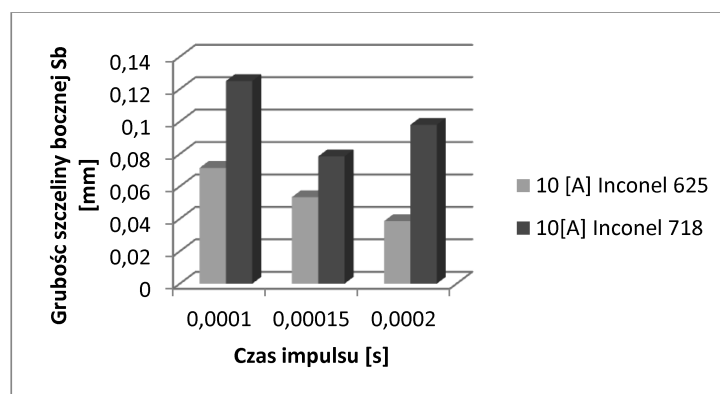
Z pomiarów szczelin bocznych otrzymanych w wyniku obróbki elektroerozyjnej obydwu żarowytrzymałych stopów niklu przy różnych natężeniach prądu wynika, że grubość szczeliny bocznej była mniejsza dla stopu Inconel 625 w porównaniu do stopu Inconel 718, niezależnie od natężenia prądu (rys. 7). Na tej podstawie można więc oczekiwać większej dokładności obróbki elektroerozyjnej stopu Inconel 625. Bardzo trudno na podstawie otrzymanych wyników wskazać zależność pomiędzy czasem impulsu a grubością szczeliny bocznej, co jest związane najpewniej z niedokładnością przyjętej metody pomiaru szczeliny bocznej.

Na podstawie zdjęć SEM obrabianej powierzchni stopu Inconel 718, możliwa była identyfikacja zmian struktury warstwy wierzchniej (tab. 4), ponieważ podczas obróbki EDM generowana jest bardzo wysoka temperatura, dochodzi do topienia materiału i jego gwałtownego parowania z obrabianej powierzchni, co można zaobserwować na zdjęciach SEM w postaci wgłębien (kratery po wyładowaniach). Wraz ze wzrostem energii wyładowania powstające kratery

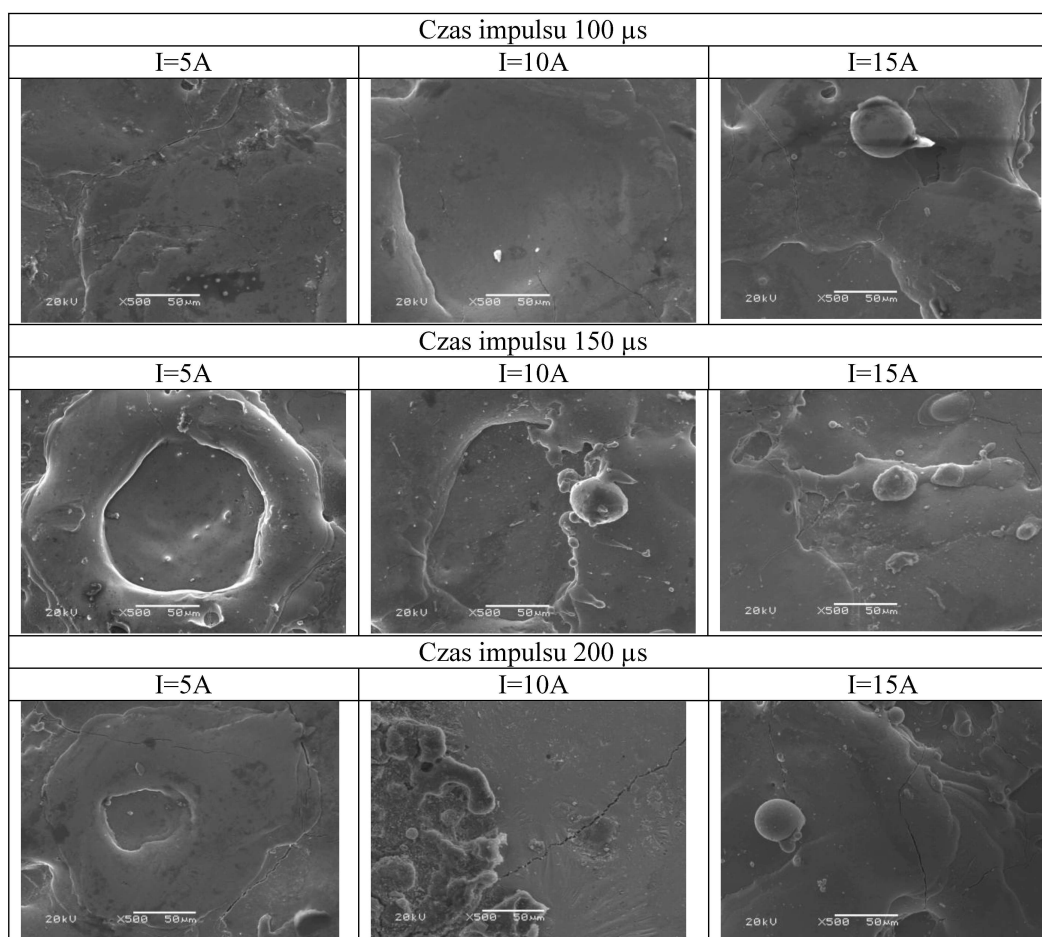
są głębsze i mają większą powierzchnię. Co więcej, wraz ze wzrostem amplitudy natężenia prądu obserwuje się powiększające się mikropęknięcia w analizowanych obszarach. Największa koncentracja mikropęknięć występuje bezpośrednio w obrębie kraterów po wyładowaniach. Porównując zdjęcia SEM wykonane przy tych samych natężeniach prądu, a różnych czasach impulsu, można zaobserwować różnice w powstającej wielkości kraterów po wyładowaniach. Wraz ze wzrostem czasu impulsu dochodzi do zwiększania się powierzchni kraterów po wyładowaniach. Jednoznaczne określenie takiej zależności wymaga jednak dalszych analiz. Widoczne na zdjęciach sferoidalne cząstki (tab. 4), pojawiają się w wyniku niedostatecznego przepływu dielektryka przez strefę obróbki, a tym samym nieodprowadzania wszystkich stopionych i zakrzepłych produktów obróbki EDM. Jak wynika z przeprowadzonej analizy EDS w obszarze występowania zakrzepłych produktów obróbki (rys. 8), oprócz materiału obrabianego (stop Inconel 718) zawierającego w swoim składzie głównie takie pierwiastki jak nikiel, chrom, niob, molibden, żelazo, tytan i aluminium, w zaznaczonym obszarze obserwuje się znaczny wzrost występowania węgla (rys. 9). Można więc wnioskować, że niektóre elementy zastosowanego w czasie obróbki EDM dielektryka węglowodorowego (Exsol D80) przeniknęły do zestalającej się cząstki produktów obróbki. Porównując występowanie sferoidalnych cząstek produktów obróbki



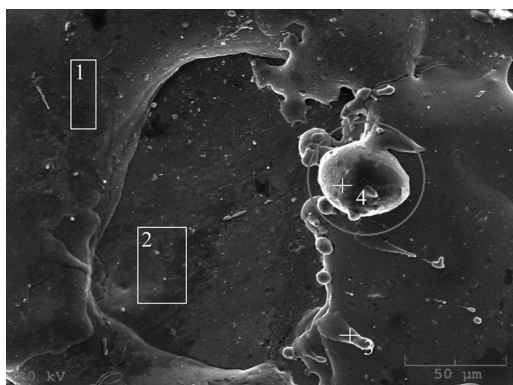
Tab. 3. Zestawienie zależności procentowego zużycia elektrody roboczej podczas obróbki EDM od czasu trwania impulsu, przy różnych natężeniach prądu [12]



Rys. 7. Grubość szczeliny bocznej powstałej w wyniku obróbki EDM stopu Inconel 625 i Inconel 718 przy natężeniu prądu 10 A i różnych czasach impulsu



Tab. 4. Zdjęcia mikroskopowe powierzchni stopu Inconel 718 po drażeniu elektroerozyjnym, powiększenie $\times 500$

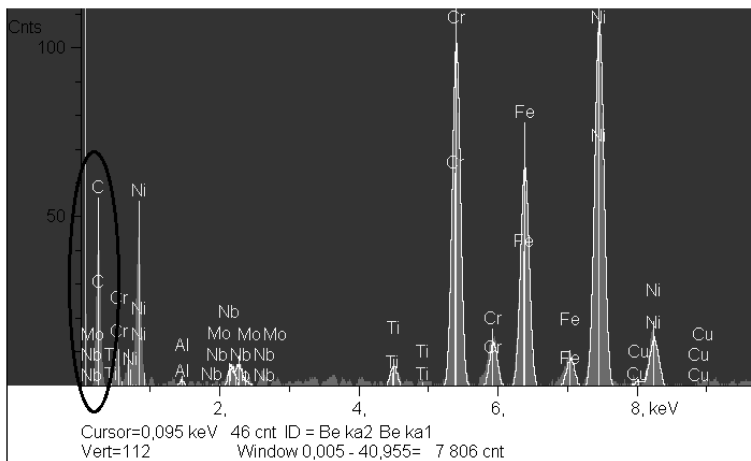


Rys. 8. Zdjęcie SEM powierzchni stopu Inconel 718 poddawanej analizie EDS, I=10A, czas impulsu=150 μ s

przy różnych natężeniach prądu (tab. 4), widać, że pojawiają się one zazwyczaj przy wyższych energiach wyładowań (przy amplitudzie natężenia prądu w impulsie I=5 A, niezależnie od czasu impulsu, nie obserwuje się zakrzepłych produktów obróbki), gdzie czas potrzebny na schłodzenie powierzchni obrabianej i usunięcie produktów obróbki, wynikający z założonych warunków badań, był jednak zbyt krótki. Z analizy EDS przeprowadzonej w pozostałych obszarach obróbki wynika, że do warstwy wierzchniej nie dyfundował materiał elektrody roboczej (miedź), nie obserwuje się także znaczących zmian w składzie pierwiastkowym w porównaniu do składu chemicznego niepoddawanej obróbce EDM próbki odniesienia.

5. Podsumowanie i wnioski

Z przeprowadzonych badań drażenia elektroerozyjnego żarowytrzymałych stopów niklu Inconel 625 oraz Inconel 718 wynika, że istotny wpływ na wydajność obróbki elektroerozyjnej ma amplituda natężenia prądu w pojedynczym impulsie – wraz ze wzrostem natężenia prądu wzrasta wydajność obróbki. Pokazano także korelację pomiędzy średnią energią wyładowania a objętościową wydajnością obróbki EDM. Ponieważ obróbka EDM stopu Inconel 625 przebiegała przy mniejszych wartościach energii wyładowania, można oczekiwać większej dokładności obróbki tego stopu oraz mniejszych zmian w warstwie wierzchniej. Na podstawie przeprowadzonych analiz można jednoznacznie stwierdzić, że materiałem łatwiej obrabialnym elektroerozyjnie jest stop Inconel 625 – w porównaniu do stopu Inconel 718. Jest to związane z różnicami we właściwościach cieplnych tych stopów – temperaturze topnienia, przewodności cieplnej, współczynniku rozszerzalności cieplnej oraz pojemności cieplnej. Z analizy zdjęć powierzchni stopu Inconel 718 po drażeniu elektroerozyjnym, wykonanych skaningowym mikroskopem elektronowym oraz przeprowadzonej analizie metodą rentgenowskiej spektroskopii energodispersyjnej, wynika, że wraz ze wzrostem energii wyładowania zmiany występujące w strukturze warstwy wierzchniej są coraz większe (powstające kraterki po wyładowaniach są głębsze, mają większą powierzchnię, dochodzi do coraz większej propagacji pogłębiających się mikropęknięć). Wydaje się



Rys. 9. Analiza EDS powierzchni stopu Inconel 718 po obróbce EDM, I=10A, czas impulsu=150 μ s

także, że wzrost czasu impulsu, ma także istotny wpływ na powiększanie się powierzchni kraterów po wyładowaniach. Zagadnienie to wymaga jednak głębszej analizy. W dalszym etapie badań planowane jest przeprowadzenie takiej samej analizy zmian w warstwie wierzchniej po drażeniu elektroerozyjnym dla stopu Inconel 625 i porównanie z wynikami otrzymanymi dla stopu Inconel 718.

Literatura:

- [1] Antar M., Chantzis D., Hayward P., Marimuthu S., *High Speed EDM and Laser Drilling of Aerospace Alloys*. Procedia CIRP (2016), Volume: 42, pp. 526-531.
- [2] Ayesta I. (et al.), *Experimental Study on Debris Evacuation during Slot EDMing*. Procedia CIRP (2016), Volume: 42, pp. 6-11.
- [3] Domingos D., Uhlmann E., *Investigations on Vibration-assisted EDM-machining of Seal Slots in High-Temperature Resistant Materials for Turbine Components – Part II*. Procedia CIRP (2013) Volume: 6, pp. 71-76.
- [4] El-Hofy H. A.-G., *Advanced Machining Processes, Nontraditional and Hybrid Machining Processes*. McGraw-Hill 2005.
- [5] Haas R., Munz M., Risto, M., *Optimization of the EDM Drilling Process to Increase the Productivity and Geometrical Accuracy*. Procedia CIRP (2016), Volume: 42, pp. 537-542.
- [6] Kliuev M. (et al.), *EDM Drilling and Shaping of Cooling Holes in Inconel 718 Turbine Blades*. Procedia CIRP (2016), Volume: 42, pp. 322-327.
- [7] Klocke F. (et al.), *Evaluation of advanced wire-EDM capabilities for the manufacture of fir tree slots in Inconel 718*. 6th CIRP International Conference of High Performance Cutting, HPC 2014.
- [8] Klocke F. (et al.), *Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes*. CIRP Annals – Manufacturing Technology 63 (2014).
- [9] Kunieda M., Lauwers B., Rajurkar K.P., Schumacher B.M., *Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process*. CIRP Annals – Manufacturing Technology, No. 54 (2), (2005), pp. 64-87.
- [10] Li L., Li W., Guo Y.B., *Surface integrity characteristics in wire-EDM of Inconel 718 at different Discharge Energy*. Procedia CIRP 6 (2013), pp. 220-225.

- [11] Luis C.J., Puertas I., Torres A., *Modelling of surface finish, electrode wear and material removal rate in electrical discharge machining of hard-to-machine alloys*. "Precision Engineering" 40 (2015).
- [12] Skoczypiec S., Żyra A., *Badania obróbki elektroerozyjnej żarowytrzymałych stopów niklu Inconel 718 oraz Inconel 652*. „Stal Metale Nowe Technologie”, 3-4/2016, s. 46-50.
- [13] Zębala W., *Modelowanie procesu skrawania*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2011.
- [14] *Global Market Forecast Flying by numbers 2015-2034*. Dostępny w Internecie: <http://www.airbus.com/company/market/forecast/>, (maj 2016).

ELECTRODISCHARGE DRILLING OF HEAT RESISTING NICKEL ALLOYS

Key words:

heat resisting nickel alloys, electrodischarge machining, electrodischarge drilling, Inconel 625, Inconel 718

Abstract:

High demand for turbomachinery devices is constantly growing due to the constrains of reduction noise generation, fuel burn and gases emission. Competitiveness on the turbomachinery market forces manufactures to look for possibilities of reducing production costs – using cost-effective machining methods. According to the safety requirements in area of aeronautical industry, it is very important to ensure high geometrical and dimensional accuracy. Because of the very good mechanical properties, high temperature resistance and corrosion resistance, hard to machine nickel based superalloys are commonly used as components of aero engines. Due to the mentioned properties it is very hard to machine heat resisting nickel alloys with conventional machining methods. One of the non-conventional machining methods which is commonly used is electrodischarge machining. The main advantage of this method is that it is possible to machine each material which is an electrical conductor, regardless of its mechanical properties. In this paper the results of electrodischarge drilling of Inconel 625 and Inconel 718 with different values of current intensity and pulse time were presented. There was pointed the relation between current intensity and material removal rate and also correlation between discharge intensity and material removal rate. On the basis of experiment results it is known that Inconel 625 is easier to machine by EDM than Inconel 718. As a result of SEM photos and EDS analysis of the Inconel 718 surface it is possible to say that discharge intensity growth results in occurring bigger and deeper electroerosion craters, microcracks and solidified debris with content of carbon. It is required to expand the research of analysis of changes in Inconel's 625 surface.

Mgr inż. Agnieszka ŻYRA

doktorantka

Wydział Mechaniczny

Politechnika Krakowska

agazyra@gmail.com