



Organizator:
Politechnika Warszawska
Instytut Techniki Wytwarzania

Przewodniczący:
Lucjan Dąbrowski
ld@meil.pw.edu.pl
http://snoe.meil.pw.edu.pl

Szkoła Naukowa Obróbek Erozyjnych

SNOE

Artykuły naukowe z 2014 r.

Patronat naukowy: SEKCJA PODSTAW TECHNOLOGII KOMITETU BUDOWY MASZYN POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Wpływ parametrów obróbki na stan warstwy wierzchniej elementów po wycinaniu elektroerozyjnym

Influence of processing parameters on the state of the surface layer after WEDM process

DOROTA ONISZCZUK - ŚWIERCZ
RAFAŁ ŚWIERCZ*

Stan warstwy wierzchniej po obróbce WEDM uwarunkowany jest wpływem szeregu zjawisk fizycznych zachodzących podczas procesu. W rezultacie kształtowana jest nowa warstwa wierzchnia a jej budowa istotnie wpływa na właściwości tribologiczne przedmiotów. W artykule przedstawiono wpływ parametrów obróbki na stan warstwy wierzchniej dla Inconelu 718.

SŁOWA KLUCZOWE: WEDM, struktura metalograficzna, SGP, Inconel 718

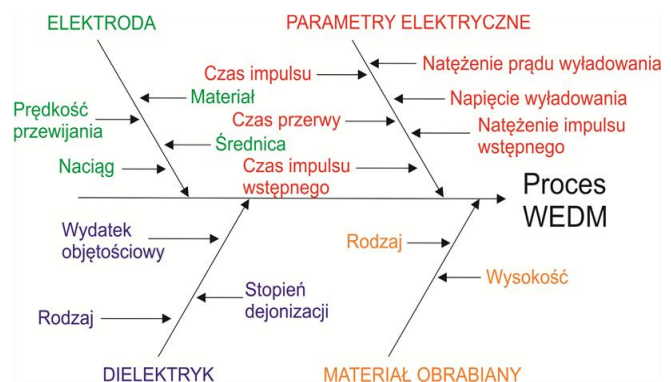
The state of the surface layer after WEDM is conditioned by the influence of a number of physical phenomena. As a result a specific surface layer is formed and its structure has a significant impact on the tribological properties. This article presents influence of processing parameters on the surface layers after WEDM for Inconel 718.

KEYWORDS: WEDM, metallographic surface, SGP, Inconel 718

Wycinanie elektroerozyjne (WEDM) zostało wprowadzone w połowie 1970 r. i w odróżnieniu od obróbki elektroerozyjnej EDM, w procesie WEDM, elektrodą roboczą jest cienki drut o średnicy od 0,02 – 0,5 mm najczęściej wykonany z mosiądzu. Proces erozji polega na usunięciu materiału z przedmiotu obrabianego w wyniku wyładowań elektrycznych zachodzących pomiędzy elektrodą roboczą a powierzchnią przedmiotu obrabianego. Elektroda i materiał obrabiany podłączone są do generatora impulsów elektrycznych. Mechanizm usuwania materiału w procesie erozji jest w głównej mierze wynikiem oddziaływania cieplnego wyładowania elektrycznego prowadzącego do topnienia

i parowania w lokalnych warstwach powierzchniowych zarówno powierzchni przedmiotu obrabianego jak i elektrody roboczej [5]. Podczas obróbki do szczeliny pomiędzy elektrodą roboczą a powierzchnią przedmiotu obrabianego doprowadzany jest dielektryk, najczęściej w postaci wody dejonizowanej i demineralizowanej, którego zadaniem jest usuwanie produktów wyerodowanego materiału ze strefy obróbkowej, chłodzenie i izolowanie elektrod.

Proces wycinania elektroerozyjnego ma złożony charakter. Podstawowymi parametrami i warunkami obróbki determinującymi zjawiska fizyczne występujące w procesie są: parametry elektryczne, parametry związane z elektrodą roboczą, dielektrykiem i materiałem obrabianym.



Rys. 1. Parametry i warunki obróbki determinujące zjawiska fizyczne występujące w procesie WEDM

Obróbka elektroerozyjna głównie zastosowanie znajduje w kształtowaniu elementów z materiałów trudnoskrawalnych. W ostatnich latach zauważyć można znaczny wzrost zastosowań stopów wysokotemperaturowych w przemyśle lotniczym, samochodowym i energetycznym. Jednymi z tej

dr inż. Dorota
Rafał Świercz
Politechnika Warszawska

dr inż.
Instytut Techniki Wytwarzania,

grupy materiałów są stopy żarowytrzymałe na osnowie niklu (zwane też superstopami). Cechą charakterystyczną tych materiałów jest zachowanie właściwości wytrzymałościowych nawet w wysokich temperaturach. Jednak niska przewodność cieplna powoduje, że są to materiały trudnoskradane.

Przykładem superstopu często wykorzystywanego w produkcji części lotniczych jest Inconel 718. Jest to stop niklowo – chromowy, poszczególne udziały procentowe pierwiastków przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Równania regresji opisujące wpływ parametrów obróbki na chropowatość powierzchni R_a

Parametry wejściowe	Udział procentowy %
Ni + CO	50 – 55 %
Cr	17 – 21 %
Nb + Ta	4,75 – 5,5 %
Mo	2,8 – 3,3 %
Ti	0,65 – 1,15 %
Al	0,2 – 0,8 %
C	max 0,08
Fe	18,5

Inconel głównie stosowany jest na niektóre elementy turbin gazowych, silników rakietowych, promów kosmicznych, reaktorów jądrowych, itp. Elementy wykonane z omawianego stopu zazwyczaj pracują w trudnych warunkach – podczas pracy przenoszą bardzo duże obciążenia. Części te muszą charakteryzować się wysoką jakością obróbeni powierzchni po to, aby zapewnić odpowiednie warunki dla uzyskania większej trwałości i wytrzymałości zmęczeniowej [1, 3].

Metodyka badań

Badania doświadczalne wpływu parametrów obróbki na stan warstwy wierzchniej dla Inocelu 718 przeprowadzono na wycinarce elektroerozyjnej Robofil 440. Wycinano kostki prostopadłościowe o wymiarach 10 x 10 mm i wysokości 10 mm. Zastosowano elektrodę w postaci drutu mosiężnego o średnicy 0,25 mm. Dielektrykiem była woda demineralizowana i dejonizowana.

Badania wpływu wybranych parametrów na efekty obróbki przeprowadzono według eksperymentu Hartley'a rotatablego, pięciopozomowego, trójparametrowego. Plan ten charakteryzuje się założeniem osiągnięcia stałej dokładności modelu określonej poprzez wariancję wzdłuż odległości od punktu centralnego planu [2]. Wybór takiego eksperymentu umożliwił zbadanie w użytkowym zakresie zmienności (przy pięciu poziomach wartości) wpływu poszczególnych parametrów wejściowych na efekty obróbki.

Na podstawie przeprowadzonych dotychczasowych badań własnych [4] oraz przeglądu literatury stwierdzono, iż głównym czynnikiem determinującym stan warstwy wierzchniej po WEDM oraz wydajność obróbki jest czas impulsu. Należy zwrócić przy tym uwagę, iż czas impulsu jest parametrem warunkującym jednocześnie natężenie prądu wyładowania. Wraz ze wzrostem czasu impulsu wzrasta natężenie prądu. Badania własne dowodzą, iż z punktu widzenia wydajności obróbki istotnym parametrem warunkującym proces usuwania produktów ze szczeliny międzyelektrodowej jest ciśnienie podawania dielektryka. Biorąc pod uwagę kryterium ekonomiczności obróbki w eksperymencie uwzględniono również prędkość przewijania elektrody roboczej.

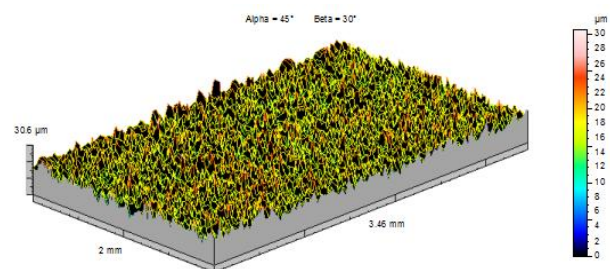
Parametrami wejściowymi zastosowanymi w planowanym eksperymencie był: czas impulsu (ton) w zakresie: 0,6 - 1,8 μ s, ciśnienie podawania dielektryka (p) w zakresie: 0,04 – 0,32 MPa oraz prędkość przewijania elektrody roboczej (WS) w zakresie: 2 – 10 m/min. Zakresy użytkowe wartości parametrów doświadczeń w planowanym eksperymencie dobrano na podstawie przeprowadzonej analizy tablic technologicznych dla: przyjętego rodzaju materiału o wysokości cięcia 10 mm, pojedynczego przejścia oraz na podstawie badań wstępnych, które uwzględniały stabilność obróbki oraz brak zerwań drutu.

Wyniki i analiza badań

Pomiaru chropowatości wyciętych próbek dokonano przy użyciu profilometru skanującego FORMTALYSURF Series 2 firmy Taylor – Hobson. Struktura geometryczna powierzchni po WEDM ma charakter losowy o dużej gęstości powierzchniowej miejscowych wzniesień S_{ds} . W zależności od dostarczonej energii wyładowania elektrycznego następuje zmiana poszczególnych parametrów struktury geometrycznej powierzchni a w głównej mierze następuje zmiana parametrów wysokościowych (rys. 2a, b). W przypadku zmniejszenia energii wyładowania elektrycznego uzyskano prawie dwukrotne zmniejszenie parametru wysokościowego S_a . Parametry przestrzenne nie ulegają istotnym zmianom.

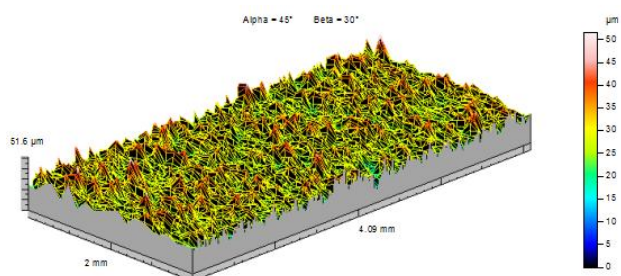
a)

$$S_a = 2,09 \mu\text{m}, S_p = 14,2 \mu\text{m}, S_v = 16,4 \mu\text{m}, S_{ds} = 1452 \text{ pks/mm}^2$$



b)

$$S_a = 3,78 \mu\text{m}, S_p = 24,9 \mu\text{m}, S_v = 26,6 \mu\text{m}, S_{ds} = 1624 \text{ pks/mm}^2$$

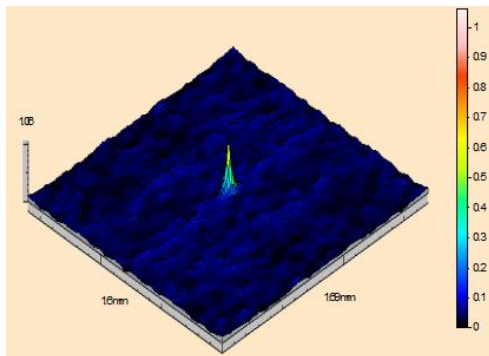


Rys. 2. Topografia powierzchni po obróbce WEDM uzyskana przy: a) $t_{on} = 0,6 \mu\text{s}$, b) $t_{on} = 1,8 \mu\text{s}$, przy stałych pozostałych parametrach WS = 6 m/min, p = 0,18 MPa

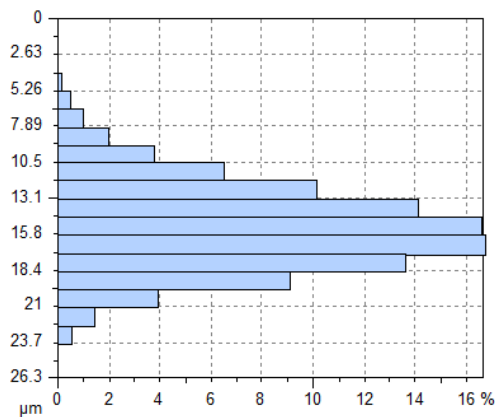
Losowość struktury wynika z szybko zanikającej funkcji autokorelacji ($S_a l = 0,0508 \text{ mm}$) (rys. 3a). Otrzymana struktura charakteryzuje się dodatnią skośnością S_{sk} co świadczy o zaostreniu wierzchołków nierówności. Rozkład rzędnych ma charakter normalny (rys. 3b) – otrzymana struktura charakteryzuje się niekorzystną właściwością nośną powierzchni. Różnica pomiędzy parametrami S_x i S_z jest

niewielka, udział przypadkowych wierzchołków i wgłębień jest pomijalnie mały, co świadczy o stabilności procesu.

a)



b)



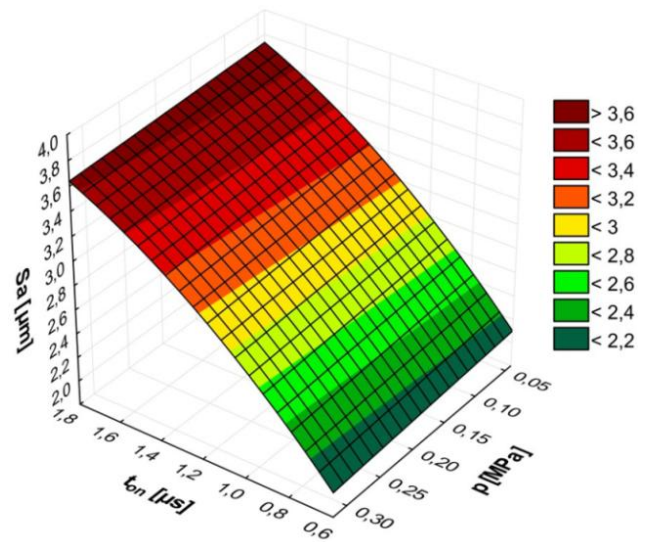
Rys. 3. Funkcja autokorelacji w układzie 3D (a) i rozkład rzędnych dla badanej próbki (b)

Na podstawie otrzymanych wyników badań w programie Statistica utworzono statystyczne modele matematyczne opisujące wpływ czynników wejściowych na wybrane parametry struktury geometrycznej powierzchni. Wyniki aproksymowano wielomianową funkcją regresji. Na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ uzyskano wysokie wartości współczynników korelacji wielokrotnej R , które określają jakość dopasowania funkcji do wyników pomiarów. Istotność poszczególnych współczynników korelacji sprawdzano testem $F - \text{Snedecora}$ (jeżeli $F/F_{kr} \geq 1$ – współczynnik R jest istotny). Brano również pod uwagę istotność wpływu poszczególnych współczynników równania regresji, którą weryfikowano testem $t - \text{Studenta}$ (na poziomie istotności $\alpha = 0,1$). Wybraną zależność regresyjną chropowatości powierzchni przedstawiono w tabeli 2, a jej interpretację graficzną przedstawiono na rysunku 4.

Tab. 2. Równania regresji opisujące wpływ parametrów obróbki na chropowatość powierzchni Ra

Równanie regresji parametru chropowatość powierzchni Ra	R	F/F_{kr}
$Sa = 0,79 + 2,48 t_{on} - 0,47 t_{on}^2 - 0,34 t_{on}^2 p$	0,98	10,53

Parametr chropowatości powierzchni Sa zawiera się w przedziale: 2 – 4 μm . Głównym czynnikiem wpływającym na chropowatość powierzchni Sa jest czas impulsu a tym samym energia wyładowania elektrycznego. Wraz ze wzrostem czasu impulsu chropowatość rośnie.



Rys. 4. Zależność parametru Sa po WEDM od czasu impulsu t_{on} i ciśnienia podawania dielektryka p

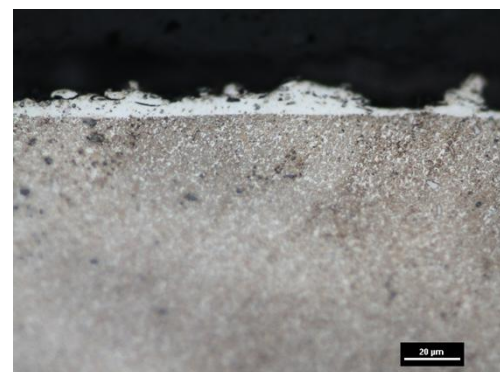
Na podstawie opracowanej zależności stwierdzono również, iż prędkość przewijania elektrody roboczej nie wpływa na generowanie struktury geometrycznej powierzchni.

Struktura metalograficzna

Oddziaływanie lokalnych gwałtownych procesów termicznych powstałych w wyniku wyładowań elektrycznych prowadzi do przemiany struktury metalograficznej powierzchni. Warstwa wierzchnia po obróbce elektroerozyjnej EDM charakteryzuje się występowaniem 3 warstw: przetopionej (tak zwanej białej), zahartowanej i odpuszczonej [5, 6].

Warstwa biała powstaje w wyniku krzepnięcia uprzednio roztopionego metalu, który w procesie erozji nie został usunięty z kanału wyładowania i ponownie zakrzepł na powierzchni krateru. Warstwa ta charakteryzuje się obecnością pierwiastków zarówno materiału rodzimego jak i elektrody roboczej. Warstwa wpływów cieplnych znajduje się bezpośrednio pod warstwą przetopioną i posiada zazwyczaj strukturę martenzytyczną. Charakteryzuje się podwyższoną twardością w stosunku do materiału rdzenia a wzrost twardości wynika z szybkiego chłodzenia około 10^6K/s . Natomiast warstwa odpuszczona charakteryzuje się zmniejszoną twardością w stosunku do materiału rdzenia.

Na podstawie analizy mikroskopowej zglądów metalograficznych stwierdzono, iż w przypadku obróbki Inconelu po obróbce WEDM zaobserwowano występowanie głównie warstwy białej (rys. 5).



Rys. 5. Struktura metalograficzna powierzchni po WEDM dla Inconelu 718 otrzymana przy: $t_{on} = 1,2 \mu\text{s}$, $I = 110 \text{A}$, $U = 30 \text{V}$

Warstwa biała charakteryzuje się nieciągłością z lokalnie występującymi pogrubieniami bez typowych dla obróbki elektroerozyjnej defektów mikrostruktury w postaci mikropęknięć. Nieciągłość warstwy przetopionej wynika z losowości występowania wyładowań elektrycznych oraz warunków obróbki, tj. przemieszczenia elektrody roboczej, podawanie dielektryka pod ciśnieniem, itp. Grubości warstwy przetopionej dla obróbki zgrubnej sięgają nawet około 10 μm . Natomiast dla najmniejszej energii wyładowania uzyskano grubość warstwy przetopionej rzędu 1,5 μm .

Na podstawie przeprowadzonej analizy zglądów metalograficznych stwierdzono, iż występuje wyraźna granica pomiędzy warstwą przetopioną a materiałem rodzimym natomiast nie zaobserwowano wyraźnej strefy wpływu ciepła i odpuszczonej.

Podsumowanie

Wycinanie elektroerozyjne charakteryzuje się dużą liczbą zmiennych procesowych, tj. parametrów energetycznych, hydromechanicznych i warunków obróbki wpływających na zjawiska fizyczne występujące w szczelinie międzyelektrodowej. Struktura geometryczna powierzchni po WEDM ma charakter losowy o dużym zagęszczeniu wierzchołków miejscowych wzniesień. Wraz ze wzrostem energii wyładowania powstają krater o większej średnicy, głębokości.

W przypadku obróbki Inconelu 718 zaobserwowano występowanie głównie warstwy białej. Nie zaobserwowano natomiast wyraźnej strefy wpływu ciepła, strefy odpuszczonej oraz defektów mikrostruktury (mikropęknięć).

Opracowane na podstawie wyników badań doświadczalnych równania regresji mogą być wykorzystane w procesie projektowania technologii obróbki WEDM jako wytyczne doboru parametrów, w celu zapewnienia pożądanych właściwości warstwy wierzchniej. Mogą stanowić one podstawę do opracowania optymalizacji wielokryterialnej procesu WEDM.

LITERATURA

1. Li L., Guo Y.B., Wei X.T., Li W.: Surface integrity characteristics in wire-EDM of inconel 718 at different discharge energy, *Procedia CIRP* 6, pp.: 220 – 225, 2013.
2. Mańczak K.: Technika planowania eksperymentu, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa, 1976.
3. Newton T. R., Melkote S. N., Watkins T. R., Trejo R.M., Reister L.: Investigation of the effect of process parameters on the formation and characteristics of recast layer in wire-EDM of Inconel 718, *Materials Science and Engineering A* 513–514, pp.: 208–215, 2009.
4. Oniszczuk D., Świercz R.: Investigation into the impact of electrical pulse character on surface texture in the EDM and WEDM process, *Advances in Manufacturing Science and Technology*, pp.: 43 – 53, 2012.
5. Popiłow Ł. Ja.: Elektrofizyczna i elektrochemiczna obróbka materiałów, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa, 1971.
6. Świercz R.: Kształtowanie stereometrii powierzchni w obróbce elektroerozyjnej EDM, *Mechanik, Agenda Wydawnicza SIMP*, 960-963, pp.: 960-963, 2013.