

BADANIA DOŚWIADCZALNE WIERCENIA ELEKTROEROZYJNEGO STALI 0H18N9

Magdalena MACHNO, Wojciech BIZOŃ, Sebastian SKOCZYPIEC

Streszczenie: Postępująca miniaturyzacja sprawia, że cały czas wzrasta popyt na technologie mikroobróbki. Wytwarzane mikrokształty muszą posiadać wysoką dokładność oraz jakość powierzchni, co jest trudne do osiągnięcia przy obróbce materiałów trudnoskrawalnych. Dla takich materiałów jak stal nierdzewna, tradycyjne metody obróbki nie dają zadowalających efektów, dlatego konieczne jest zastosowanie alternatywnych metod niekonwencjonalnych. W artykule przedstawiono przegląd wybranych niekonwencjonalnych metod wiercenia oraz wyniki badań doświadczalnych smukłych otworów w stali nierdzewnej 0H18N9.

Słowa kluczowe: Wiercenie elektroerozyjne, mikroobróbka, stal nierdzewna

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach w wielu gałęziach przemysłu zauważalna jest miniaturyzacja produktów i elementów. Znacząco wzrósł popyt na technologie mikroobróbki. Wykonywane mikrokształty muszą posiadać wysoką dokładność i jakość powierzchni, precyzyjne wymiary. Mikroobróbka oznacza kształtowanie elementów o wymiarach w zakresie 1 – 999 μm [1]. Warto również zauważyć, że zastosowanie konwencjonalnych metod obróbki do wytwarzania mikroelementów z twardych materiałów o wysokiej wytrzymałości, okazuje się bardzo trudne. Do trudnych do obróbki tradycyjnymi metodami materiałów zalicza się m. in. stal nierdzewna. Materiał ten znalazł szerokie zastosowanie w wielu różnych sektorach przemysłu tj. przemysł elektroniczny, motoryzacyjny, medyczny, budowniczy i architektoniczny.

Stale nierdzewne zaliczają się do stopów żelaza, chromu, niklu i w różnym stopniu molibdenu. Metal ten musi zawierać minimum 11% chromu. W technologii inżynierii wyróżnia się austeniczne oraz duplexowe stale nierdzewne. Istotną cechą tej stali jest odporność na korozję, która zależy od zawartości chromu oraz wzmacniana jest przez dodanie molibdenu i azotu. Nikiel zapewnia prawidłową mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne. Ponadto stal nierdzewna charakteryzuje się wysoką odpornością temperaturową, wzmocnioną wytrzymałością, wysokim stopniem plastyczności, zwiększoną wytrzymałością, skłonnością do umacniania się podczas obróbki [2]. Także cechuje się mniejszą przewodnością cieplną, ale wysokim współczynnikiem liniowej rozszerzalności, w porównaniu do zwykłej stali, co może przyczyniać się do znacznych odkształceń w przypadku spawania. Podczas obróbki skrawaniem wraz z wiórami odprowadzana jest niewielka ilość ciepła z materiału, natomiast znacznie większą ilość ciepła przejmuje narzędzie skrawające, stąd ostrze narażone jest na odkształcenia plastyczne i obniża się jego wytrzymałość. Stal nierdzewna ponadto charakteryzuje się wysoką ciągliwością oraz przyklejaniem się do narzędzia skrawającego podczas obróbki. Przyklejony materiał gromadzi się na części skrawającej narzędzia tworząc narost, który spowalnia dalszy proces obróbki. Wiercenie stali nierdzewnej charakteryzuje się niską wydajnością ze względu na niską skrawalność materiału, wynikająca z wyższej twardości

w porównaniu do stali węglowych. Podczas konwencjonalnego wiercenia końcówka wiertła z dużą siłą boczną dotyka powierzchni materiału obrabianego. Siła ta sprawia, że wiertło ulega zgięciu i może łatwo ulec złamaniu. Dodatkowo tradycyjne wiercenie pozostawia zadziory na krawędziach otworu, co obniża dokładność i jakość powierzchni po obróbce. Gorące wióry ułożone między krawędzią a ścianą otworu, mogą zostać zgrzane z powierzchnią materiału obrabianego, tworząc zmiany na powierzchni. Dlatego istnieje wiele alternatywnych metod służących do wytwarzania mikrootworów. Najważniejsze z nich zostały scharakteryzowane w tabeli 1.

Tabela 1 Charakterystyka wybranych niekonwencjonalnych metod wiercenia (opracowano na podstawie [3 - 15])

Sposób usuwania materiału	Zalety	Wady
Wiercenie laserowe		
Działanie zogniskowanej wiązki lasera powoduje, że materiał ogrzewa się i w wyniku topnienia, odparowania lub ablacji, zostaje usunięty. Obrabialność zależy głównie od współczynnika odbicia i absorpcji promieniowania laserowego przez obrabiany materiał.	<ul style="list-style-type: none"> - możliwość wiercenia materiałów metalicznych i niemetalicznych, - obróbka bez kontaktu mechanicznego (brak deformacji przedmiotu), - duża wydajność, - łatwość automatyzacji, - ułatwione wiercenie otworów o średnicy < 1 mm (narzędzie nie jest przedmiotem fizycznym). 	<ul style="list-style-type: none"> - występowanie strefy wpływu ciepła po obróbce, - problem z uzyskaniem wysokiej smukłości okrągłych i owalnych otworów, - wysokie koszty sprzętu, - opłacalna tylko w produkcji seryjnej, - wysoka energochłonność.
Wiercenie ultradźwiękowe		
Materiał obrabiany jest w sposób ścierny. Specjalnie zaprojektowane narzędzie oscyluje z częstotliwością i amplitudą w zakresie 10 – 50 µm, przy częstotliwości 18 – 40 kHz. Między przedmiot obrabiany i narzędzie dostarczana jest zawieszina ścierna. Posuw narzędzia w kierunku przedmiotu obrabianego, powoduje że cząstki ściernie uderzają w powierzchnię obrabianą i ten sposób usuwany jest materiał. W niektórych zastosowaniach narzędzie może również wykonywać ruch obrotowy.	<ul style="list-style-type: none"> - możliwość obróbki materiałów twardych i kruchych (z twardością większą niż 40 HRC) materiałów, - wysoka dokładność wymiarowa i jakość powierzchni, - podczas obróbki nie wytwarza się ciepło (brak zmian właściwości fizycznych i mikrostruktury). 	<ul style="list-style-type: none"> - niska wydajność w porównaniu do innych metod (szczególnie w przypadku obróbki materiałów przewodzących prąd elektryczny), - brak możliwości obróbki otworów o średnicach większych niż 20 – 30 mm, - znaczne zużycie czołowe i boczne narzędzia, co obniża dokładność i powoduje powstanie błędów stożkowatości - wysokie koszty eksploatacji (każda obróbka wymaga specjalnego narzędzia, zawieszina ścierna musi być regularnie wymieniana).

Tabela 1 cd.		
Wiercenie elektrochemiczne		
<p>Materiał usuwany jest w wyniku elektrochemicznego procesu roztwarzania anodowego. Katoda (elektroda robocza) oddzielona jest od przedmiotu (anoda) wąską szczeliną, przez którą przepływa elektrolit (wodny roztwór kwasów, zasad, soli). Przepływ prądu przez szczelinę powoduje roztwarzanie powierzchni przedmiotu obrabianego. Jako narzędzie stosowana jest elektroda w kształcie rurki (z mosiądzu, miedzi, stali nierdzewnej), która jest izolowana na całej powierzchni bocznej.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - brak zużycia narzędzia, - wysoka wydajność usuwania materiału, - brak strefy wpływu ciepła, - możliwa obróbka trudnoobrabialnych materiałów (twardszych niż narzędzie), - dobra jakość powierzchni po obróbce, bez naprężeń szczątkowych, zadziorów - możliwość jednoczesnego wiercenia dużej liczby głębokich i smukłych otworów. 	<ul style="list-style-type: none"> - obróbka tylko materiałów przewodzących prąd elektryczny, - proces szkodliwy dla środowiska, - częste uszkodzenia izolacji narzędzia, - heterogeniczność elektrochemiczna powoduje znacznie mniejszą lokalizację usuwania nadmiaru, co jest przyczyną błędów kształtu oraz trudności w uzyskaniu ostrych krawędzi.
Wiercenie elektroerozyjne		
<p>Proces termo – elektryczny, w którym nadatek usuwany jest z przedmiotu obrabianego w wyniku serii wyładowań elektrycznych generowanych między elektrodą roboczą a materiałem obrabianym, zanurzonych w dielektryku. Wyładowania elektryczne usuwają materiał poprzez jego topnienie i parowanie. Przepływ dielektryka między elektrodą a materiałem ułatwia wyładowania oraz usuwa wytopiony lub wykruszony materiał.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - możliwość wiercenia otworów z wysoką dokładnością, bez zadziorów, - możliwość obróbki materiałów, niezależnie od ich wytrzymałości i twardości, - możliwość uzyskania otworów o smukłości nawet 1/400. 	<ul style="list-style-type: none"> - duże trudności podczas obróbki materiałów o obniżonej przewodności elektrycznej, - znaczne zużycie narzędzia, - niska wydajność usuwania materiału w porównaniu do innych metod, - niska spójność powierzchni otworów, - występowanie strefy wpływów ciepła.

W artykule zaprezentowane zostaną wyniki wiercenia elektroerozyjnego w stali nierdzewnej z użyciem wody dejonizowanej jako dielektryka. Ich celem było określenie wpływu wybranych parametrów obróbki, takich jak czas impulsu, amplituda natężenia prądu, średnie napięcie międzyelektrodowe na szybkość wiercenia, liniowe zużycie elektrody roboczej i grubość szczeliny bocznej.

2. Charakterystyka procesu wiercenia elektroerozyjnego

Obróbka elektroerozyjna (EDM - Electrical Discharge Machinig) opiera się na usuwaniu nadmiaru w wyniku erozji elektrycznej, która jest efektem wyładowań elektrycznych pomiędzy dwoma elektrodami oddzielonymi szczeliną międzyelektrodową wypełnioną dielektrykiem. Jedną elektrodę stanowi materiał obrabiany, a drugą elektroda robocza. Obie elektrody podłączone są do generatora prądu impulsowego. Erozja materiału możliwa jest przez zamianę energii elektrycznej w energię cieplną w wyniku zachodzących wyładowań elektrycznych [6, 16].

W zależności od kształtu elektrody roboczej oraz zastosowania kinematyki obróbki, można wyróżnić kilka odmian mikroobróbki elektroerozyjnej [17]:

- wycinanie drutem (średnica drutu może mieć wymiar do 0,02 mm, możliwe precyzyjne wycinanie drutem materiałów przewodzących prąd elektryczny),
- drażnienie (kształtowanie polega na odwzorowaniu kształtu elektrody roboczej w materiale),
- wiercenie (elektroda pełni funkcję wiertła do wykonywania mikrootworów w materiale),
- obróbka elektrodą uniwersalną (obróbka poprzez odwzorowanie w materiale trajektorii elektrody roboczej o średnicy znacznie mniejszej niż wymiary obrabianej powierzchni, możliwe uzyskanie skomplikowanych krzywoliniowych kształtów przestrzennych).

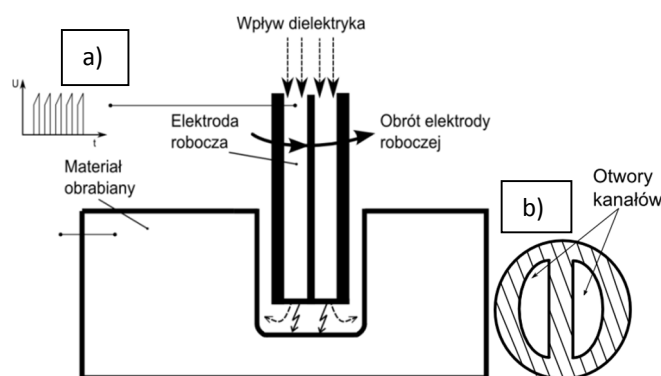
Obróbka elektroerozyjna stanowi alternatywną metodę obróbki materiałów trudnoobrabialnych (tj. utwardzona stal, węgliki, stopy o wysokiej wytrzymałości, materiały kompozytowe, ceramika) tradycyjnymi metodami skrawania. Obróbka odbywa się dzięki elektro termicznemu procesowi, niezależnie od twardości materiału obrabianego, a siły występujące między narzędziem a materiałem są znikome [15, 18]. Podczas wiercenia elektroerozyjnego elektroda robocza pełni funkcję wiertła. Wykonuje ruch posuwowy oraz obrotowy. Do mikrowiercenia metodą elektroerozyjną stosowane są elektrody rurkowe (dielektryk dostarczany jest do obszaru obróbki przez kanały w elektrodzie) oraz prętowe (dielektryk jest dostarczany poprzez wcześniej wywiercony otwór)[6]. Podczas wiercenia elektroerozyjnego elektrodą w kształcie rurki, zużycie występuje na długości (tzn. następuje skrócenie elektrody) oraz ścianach bocznych [19]. W wyniku takiego zużycia elektrody roboczej, wywiercony otwór ma kształt stożka. Wysokie zużycie elektrody ma wpływ także na stabilność, dokładność oraz wydajność procesu. Smukłość otworów wykonanych z użyciem wiercenia elektroerozyjnego jest bardzo duża (możliwy do uzyskania stosunek średnicy do głębokości otworu wynosi 1/400). Możliwość wiercenia głębokich otworów jest ograniczona jedynie przez gromadzenie na dnie otworu kawałków obrabianego materiału, co powoduje nieprawidłowe wyładowania, szczególnie gdy otwór jest wiercony głęboko. Również powstające podczas procesu pęcherzyki gazowe, blokujące wypełnienie dielektryku do obszaru obróbki, mogą ograniczać smukłość otworu [20]. Jednak w przypadku wiercenia głębokich mikrootworów w metalu, mikrowiercenie elektroerozyjne stanowi jedną z najbardziej efektywnych metod [21]. W przypadku mikroobróbki elektroerozyjnej możliwe jest uzyskanie mikrokształtów z wysoką dokładnością (mniejszą niż 5 μm) i dobrą jakością powierzchni (z chropowatością R_a mniejszą niż 0,1 μm). Wykonane otwory, przy zastosowaniu mikrowiercenia elektroerozyjnego, mają regularny kształt oraz wysoką dokładność powierzchni bez zadziórów [18]. Jednak parametry obróbki zapewniające powyższe wskaźniki technologiczne, przyczyniają się do niskiej wydajności procesu i znacznego zużycia

narzędzia. W przypadku mikrokształtów dokładność obróbki ma istotne znaczenia, dlatego znaczne zużycie elektrody (większe niż 50%) stanowi problem. Także wysoka temperatura towarzysząca procesowi, powodująca powstawanie tzw. strefy wpływu ciepła, obniża właściwości powierzchni po obróbce [15, 16, 19].

3. Metodyka badań doświadczalnych

Badania doświadczalne dotyczące wiercenia elektroerozyjnego stali nierdzewnej zostały przeprowadzone w Instytucie Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej. Wiercenie elektroerozyjne wykonano w stali nierdzewnej 0H18N9, na stanowisku badawczym do mikroobróbki elektroerozyjnej.

Wiercenie przeprowadzono z użyciem miedzianej elektrody rurkowej dwukanałowej o średnicy zewnętrznej równej 1 mm. Jako dielektryk zastosowano wodę dejonizowaną, która była dostarczana do obszaru obróbki przez kanały w elektrodzie roboczej (Rys. 1a, 1b).



Rys. 1. a) Schemat przedstawiający drążenie elektroerozyjne z dostarczaniem dielektryka poprzez kanały w elektrodzie roboczej, b) przekrój elektrody roboczej

Badania przeprowadzono w oparciu o metody planowania eksperymentu. Do badań uwzględniono następujące trzy czynniki wejściowe, których wartości zostały wyznaczone zgodnie z planem badań wg Boxa – Benkena:

- czas impulsu t_i (100 – 500 μ m),
- amplitudę natężenia prądu wyładowania I (1,05 – 3,15 A),
- średnie napięcie międzyelektrodowe U (20 – 40 V).

Przyjęcie różnych parametrów obróbki umożliwiło oszacowanie wpływu wybranych parametrów na dokładność i jakość wykonanych otworów, a także na zużycie elektrody roboczej.

Przyjęto następujące czynniki wyjściowe:

- liniowe zużycie elektrody roboczej (v),
- średnia prędkość wiercenia (v),
- grubość szczeliny bocznej (S_b).

W celu obliczenia czynników wyjściowych zmierzono: skrócenie elektrody roboczej (h_t), głębokość otworu (h_h) oraz średnią średnicę otworu (D). Aby zmierzyć skrócenie elektrody roboczej, przed rozpoczęciem każdej próby mierzono punkt styku elektrody z materiałem obrabianym. Odczytano współrzędne punktu styku, następnie po obróbce ponownie

ustawiano elektrodę roboczą w punkcie styku i odczytano współrzędne. Różnica między wartością współrzędnej osi z z punktu styku przed i po obróbce jest wartością skrócenia elektrody roboczej. Liniowe zużycie elektrody roboczej v obliczono według poniższego wzoru:

$$v = \frac{h_t}{h_h} \cdot 100\%$$

Natomiast grubość szczeliny bocznej (S_b) obliczono zgodnie ze wzorem:

$$S_b = \frac{D - d_t}{2}$$

gdzie: D – średnia średnica otworu, d_t – średnica zewnętrzna elektrody roboczej.

Średnią prędkość wiercenia v obliczono następująco:

$$v = \frac{h_h}{t_m}$$

Natomiast przyjętymi czynnikami stałymi były:

- materiał obrabiany (stal nierdzewna 0H18N9),
- miedziana elektroda rurkowa dwukanałowa, o średnicy zewnętrznej $d_t = 1$ mm,
- dielektryk (woda dejonizowana),
- prędkość obrotowa elektrody roboczej (500 obr/min),
- czas obróbki $t_m = 30$ min,
- czas przerwy $t_p = t_i$,
- ciśnienie dostarczania dielektryka (30 bar).

Na podstawie wyznaczonych wartości wielkości wyjściowych wyznaczono funkcję obiektu badań w postaci wielomianu drugiego stopnia z interakcjami dla trzech wielkości wyjściowych, w następującej postaci ogólnej:

$$F(x_1, x_2, x_3) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \\ + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + \\ + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3$$

gdzie: x_1 – czas impulsu t_i , x_2 – amplituda natężenia prądu wyładowania I , x_3 – średnie napięcie międzyelektrodowe U .

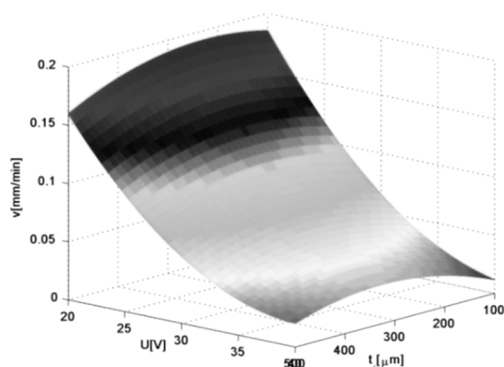
Analizę regresji przeprowadzono z wykorzystaniem programu Matlab (Statistic Toolbox). Przeprowadzona analiza statystyczna badań wykazała, że funkcje obiektu badań dla liniowego zużycia elektrody roboczej oraz średniej prędkości obróbki, są adekwatne na poziomie istotności $\alpha = 0,1$. Parametr grubości szczeliny bocznej okazał się najmniej określony, co związane jest prawdopodobnie z błędami wyznaczenia wartości S_b , które wynikają z mimośrodowego zamocowania elektrody roboczej (bicie promieniowe).

4. Analiza wyników

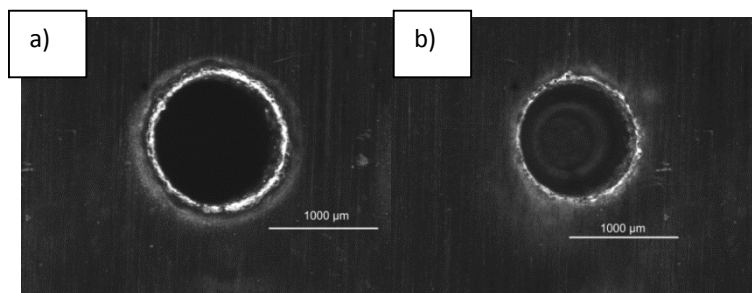
Wykonane badania pokazują, że największy wpływ na czynniki wyjściowe ma natężenie prądu i napięcie międzyelektrodowe, co wynika m. in. z przedstawionych na rysunku 2 zależności.

Z zależności prędkości od napięcie międzyelektrodowego i czasu impulsu (Rys. 2), można zauważyć, że dla niskiej wartości napięcia międzyelektrodowego podczas wyładowania ($U = 20$ V), występuje znacznie wyższa prędkość obróbki, co wynika ze

znacznie wyższej efektywności usuwania materiału. W przypadku niższych wartości napięcia międzyelektrodowego w czasie wyładowania ma miejsce dodatkowo zjawisko roztwarzania elektrochemicznego (proces ma charakter hybrydowy, elektroerozyjno - elektrochemiczny). Roztwarzanie elektrochemiczne występuje tutaj ze względu na zastosowanie jako dielektryka wody dejonizowanej z niską rezystywnością (równą 0,5 MΩcm). Woda dejonizowana posiada cechy płynu dielektrycznego wraz z niską przewodnością elektryczną jako cechę elektrolitu. Umożliwia to powstawanie równoczesnych wyładowań elektrycznych oraz reakcji elektrochemicznych. Jednoczesne występowanie obróbki elektrochemicznej i elektroerozyjnej przyspiesza proces usuwania nadmiaru, a także poprawia dokładność oraz jakość obróbjonej powierzchni [22]. Otwór wykonany z niskim napięciem jest znacznie głębszy oraz posiada znacznie większą średnicę (Rys. 3). Stosowanie wyższych wartości napięcia (na poziomie 30 – 40 V), powoduje znacznie mniejszą prędkość, ponieważ obróbka odbywa się wówczas głównie za pomocą wyładowań elektroerozyjnych.



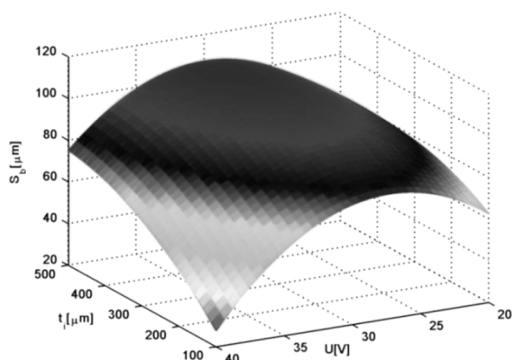
Rys. 2. Wykres przedstawiający zależność między średnią prędkością obróbki v a napięciem międzyelektrodowym i czasem impulsu t_i , $I = 2,1$ A



Rys. 3. Otwory wykonane w stali nierdzewnej, a) parametry obróbki: $t_i = 500$ μm, $I = 2,1$ A, $U = 20$ V, głębokość otworu $h_h = 4381$ μm, $D = 1154$ μm, b) parametry obróbki: $t_i = 100$ μm, $I = 2,1$ A, $U = 40$ V, głębokość otworu $h_h = 738$ μm, $D = 1051$ μm

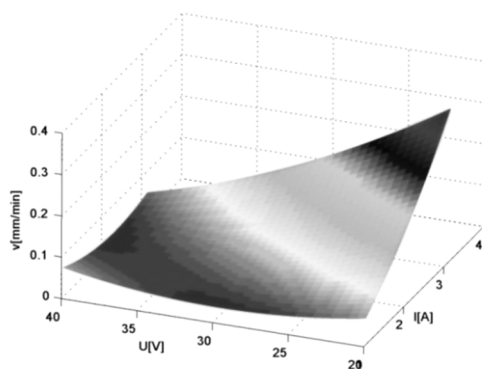
Kiedy napięcie międzyelektrodowe osiąga wyższe wartości, dochodząc do wartości krytycznej, wówczas temperatura dielektryka wzrasta i woda zaczyna wrzeć oraz parować. Przy powierzchni jednej z elektrod powstaje warstwa gazowa, składająca się z dużej ilości pęcherzyków gazowych. Zmniejsza się wówczas grubość szczeliny międzyelektrodowej i pojawiają się wyładowania elektryczne. Proces obróbki przebiega wtedy w typowy dla

EDM sposób. Zauważyć można, że w przypadku dużych wartości napięcia na poziomie 35 – 40 V, szczelina boczna ma zdecydowanie mniejsze wartości, co również wskazuje, że w tym zakresie U materiał usuwany jest elektroerozyjnie (Rys. 4).



Rys. 4. Wykres przedstawiający zależność między szczeliną boczną S_b a napięciem U i czasem impulsu t_i , $I = 2,1$ A

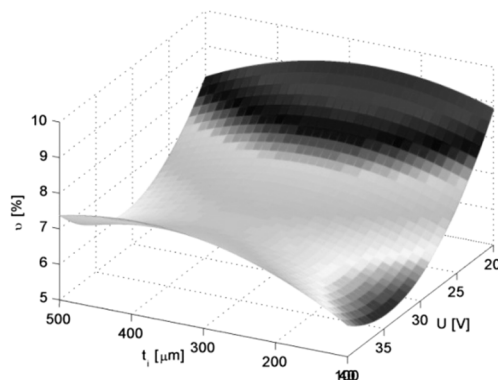
Energia wyładowania określana jest przez natężenie prądu. Stąd zastosowanie wyższej wartości natężenia powoduje wyższą energię wyładowania, a prędkość obróbki wówczas rośnie. W analizowanym przypadku wyraźny wzrost prędkości obróbki dla niskich wartości napięcia międzyelektrodowego, wskazuje że w tym obszarze zachodzi również roztwarzanie elektrochemiczne. Stąd szczelina międzyelektrodowa jest większa i łatwiej usuwane są produkty erozji z obszaru procesu obróbki. Kiedy napięcie ma wyższą wartość, szczelina międzyelektrodowa jest mniejsza, co przyczynia się do problemów z usuwaniem materiału z przestrzeni międzyelektrodowej, a zwiększenie natężenia wówczas nie ułatwia procesu. Zaczynają się tworzyć mostki, występują zwarcia, a szczelina zatyka się (Rys. 5).



Rys. 5. Wykres przedstawiający zależność między średnią prędkością obróbki v a napięciem U i natężeniem prądu I , $t_i = 300$ μ m

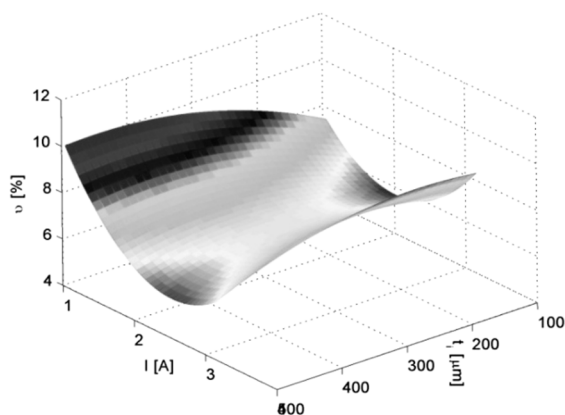
Wysokie liniowe zużycie elektrody roboczej przy małych wartościach napięcia podczas wyładowania wskazuje, że w tych warunkach proces zachodzi w miarę efektywnie. Wyższe

wartości napięcia powodują problemy z obróbką, dlatego niewielka ilość nadatku jest usuwana i elektroda ulega zdecydowanie mniejszemu zużyciu (Rys. 6).

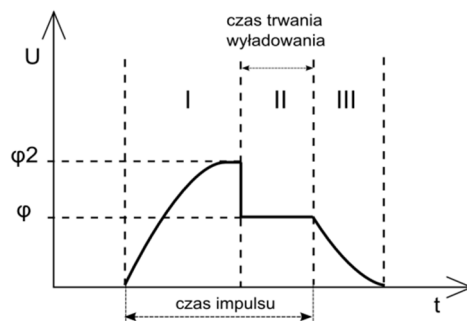


Rys. 6. Wykres przedstawiający zależność między liniowym zużyciem elektrody roboczej v a napięciem U i czasem impulsu t_i , $I = 2,1$ A

Większe liniowe zużycie narzędzia zauważalne jest dla długiego czasu impulsu $t_i = 500 \mu\text{m}$ (rys. 7). Aby możliwe były wyładowania elektryczne między dwoma elektrodami, podczas jednoczesnej obróbki elektroerozyjnej i elektrochemicznej, napięcie międzyelektrodowe musi osiągnąć wartość krytyczną φ_2 (Rys. 8). W przedziale I widoczny jest wzrost napięcia do wartości krytycznej. Po osiągnięciu tej wartości wyładowanie nadal występuje do końca czasu trwania impulsu (przedział II). Dlatego dłuższy czas impulsu pozwala na dłuższe występowanie wyładowania elektrycznego, z czym wiąże się wyższe zużycie narzędzia. [23]. Dla danego czasu impulsu i napięcia istnieje optymalna w aspekcie liniowego zużycia elektrody roboczej wartość natężenia prądu.

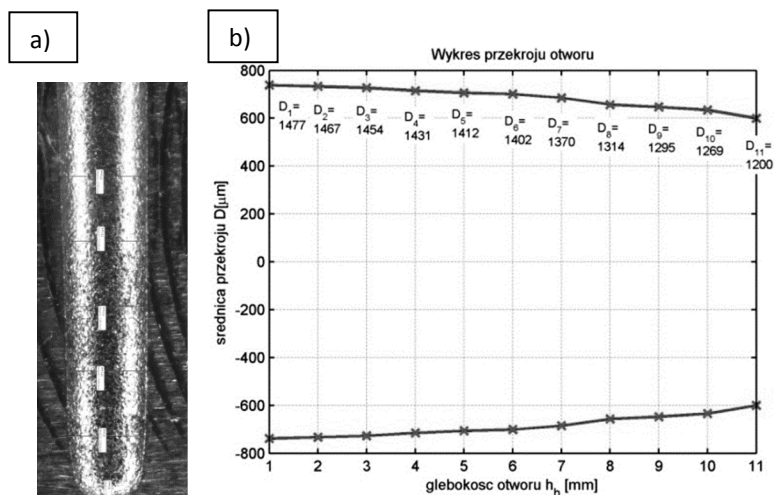


Rys. 7. Wykres przedstawiający zależność między liniowym zużyciem elektrody v a czasem impulsu t_i oraz natężeniem prądu I , $U = 30$ V



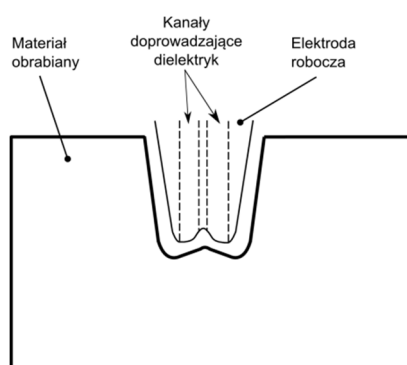
Rys. 8. Schemat przedstawiający przebieg napięcia wyładowania oraz natężenia prądu podczas jednoczesnej obróbki elektroerozyjnej i elektrochemicznej [23]

Wiercenie elektroerozyjne wykonane zostało z użyciem elektrody rurkowej dwukanałowej, co umożliwiło przepływ dielektryka w obszarze obróbki, a także ułatwiało usuwanie kawałków przetopionego metalu pozostałych w otworze. Dielektryk dostarczany był do obszaru obróbki pod ciśnieniem przez kanały w elektrodzie. Jednak zastosowanie takiego rodzaju elektrody powoduje, że otwór ma kształt stożka. Stożkowy kształt otworu jest wynikiem bocznego zużycia elektrody oraz różnego czasu obróbki kolejnych przekrojów (głębsze przekroje obrabiane są krócej). Aby dokonać analizy kształtu otworu po obróbce, wykonano dodatkowo otwory z możliwością oceny ich przekrojów. Wiercenie przeprowadzono na odpowiednio przygotowanych dzielonych próbkach o grubości 11 mm. Po zakończeniu obróbki i rozdzieleniu dwóch części próbki, była możliwa obserwacja oraz określenie zmian średnicy otworu wraz z głębokością wiercenia. Na rysunku 9a widoczny jest zwężający się otwór, co odzwierciedla także wykres w oparciu o pomiary średnic otworu w kolejnych punktach wzdłuż otworu (Rys. 9b).



Rys. 9. a) Zdjęcie przekroju otworu, parametry obróbki: $I = 2,1$ A, $t_i = 500$ μ m, napięcie międzyelektrodowe zmieniało się w zakresie 20 – 40 V, głębokość wiercenia, b) wykres przedstawiający zwężającą się średnicę otworu

W trakcie badań zauważono również, że dno otworu ma zdeformowany kształt, co wynika z występowania kanałów w elektrodzie roboczej (Rys. 10). Podczas obróbki zużycie narzędzia koncentruje się na ścianach bocznych oraz w centrum elektrody. Czoło elektrody zużywa się nierównomiernie, w większym zakresie w środkowej części oddzielającej kanały. Dielektryk przepływa przez kanały na zewnątrz, stąd w centrum przepływ praktycznie nie występuje (tzw. strefa zastoju dielektryka). Efekt ten powoduje, że zużycie jest większe w centrum elektrody, co odzworowuje się na dnie otworu. Zużycie boczne narzędzia przyczynia się do jego stożkowego kształtu po obróbce. Stożkowa forma elektrody widoczna jest w kształcie wierconego otworu, którego średnica ma mniejsze wartości w kolejnych punktach wzdłuż otworu (Rys. 11a, 11b, 11c).

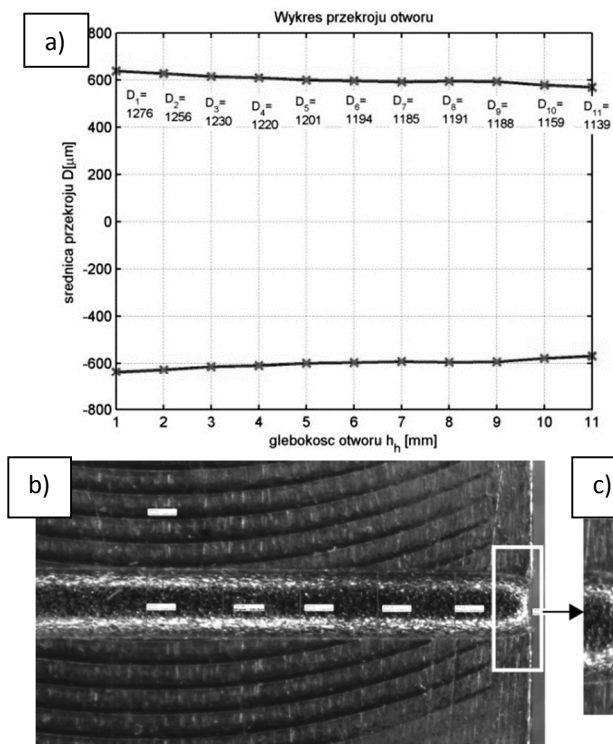


Rys. 10. Schemat przedstawiający kształt elektrody roboczej i otworu po wierceniu elektroerozyjnym

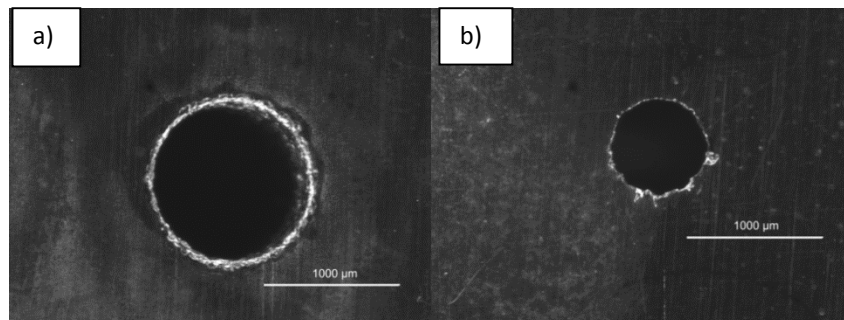
Na zdjęciach poniżej (Rys. 12a, 12b) widoczna jest zdecydowanie mniejsza średnica otworu przy wyjściu elektrody roboczej. Mniejsza średnica otworu wyjściowego wynika w tym przypadku z występującego zużycia elektrody, ale także z braku podkładki podczas wiercenia. Gdy otwór został przewiercony na wylot na dnie całkowicie wypływał dielektryk, stąd obróbka była utrudniona. Efekt ten widoczny jest także na zdjęciu 11c. Bez zastosowania podkładki dalsze wiercenie nie jest możliwe.

5. Podsumowanie

Obróbka elektroerozyjna najczęściej stosowana jest do obróbki trudnoskrawalnych materiałów metalowych. Jak wynika z przeprowadzonej na wstępie analizy literatury, w przypadku wiercenia głębokich otworów w stali nierdzewnej, obróbka elektroerozyjna stanowi jedną z najbardziej i najczęściej stosowanych metod obróbki niekonwencjonalnej. Przeprowadzone badania pokazały, że możliwe jest efektywne wiercenie w stali nierdzewnej. Użyta w badaniach woda dejonizowana jako dielektryk oraz zastosowanie niskiego napięcia wyładowania ($U = 20 \text{ V}$), pozwala uzyskać lepszą wydajność obróbki. Proces ułatwia i przyspiesza występujące roztwarzanie elektrochemiczne. Jednak takie warunki obróbki przyczyniają się do znacznego zużycia elektrody roboczej na ścianach bocznych oraz czole elektrody. Zjawisko to stanowi jedną z głównych wad tego procesu obróbki. Zastosowanie elektrody rurkowej dwukanałowej spowodowało, że dolna część wykonanych otworów ma kształt stożka oraz zdeformowany kształt dna. Warto jednak zaznaczyć, że zastosowanie jako dielektryka wody dejonizowanej sprawiło, że proces jest bezpieczny oraz znacznie tańszy.



Rys. 11. a) wykres przedstawiający zwężającą się średnicę otworu, b) zdjęcie przedstawiające przekrój średnicy otworu, parametry obróbki: $I = 3,15 \text{ A}$, $t_i = 500 \text{ }\mu\text{m}$, $U = 20 \text{ V}$, c) zdjęcie zniekształconego dna otworu



Rys. 12. a) otwór wejściowy wykonany dla parametrów obróbki: $t_i = 300 \text{ }\mu\text{m}$, $I = 3,15 \text{ A}$, $U = 40 \text{ V}$, głębokość wiercenia $h_h = 12885 \text{ }\mu\text{m}$, b) otwór wyjściowy

Zaproponowana metoda umożliwia wiercenie smukłych (stosunek średnicy do głębokości jest znacznie mniejszy niż $1/10$) oraz przelotowych otworów. Efektywne wiercenie elektroerozyjne otworów przelotowych wymaga zastosowania odpowiednich rozwiązań technologicznych umożliwiających minimalizację różnicy pomiędzy wartością średnicy otworu na wejściu i wyjściu (tj. specjalne podkładki umożliwiające prawidłowy przepływ dielektryka).

Literatura

1. Bhattacharyya B., Mitra S., Boro A.K.: Electrochemical machining: new possibilities for micromachining, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 18, 2002, pp.283–289
2. Lin T.-R.: Cutting Behaviour Using Variable Feed and Variable Speed when Drilling Stainless Steel with TiN-Coated Carbide Drills, *The International Journal Advanced Manufacturing Technology* 19, 2002, pp. 629–636
3. Aoki H.: Establishment of design standards and current practice for stainless steel structural design in Japan, *Journal of Constructional Steel Research* 54, 2000, pp. 191–210
4. Okasha M.M., Mativenga P.T., Driver N., Li L.: Sequential laser and mechanical micro-drilling of Ni superalloy for aerospace application, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59, 2010, pp.199–202
5. Liu G., Liu T.-I., Gao Z.: Online detection and measurements of drill wear for the drilling of stainless steel parts, *Int J Adv Manuf Technol* 68, 2013, pp. 1015–1022
6. El-Hofy H.: *Advanced Machining Process. Nontraditional and hybrid machining process*, Alexandria University, Egypt, 2005
7. Sen M., Shan H.S.: A review of electrochemical macro- to micro-hole drilling processes, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45, 2005, pp.137–152
8. Zhang Yi, Li Shichun, Chen Genyu, MazumderJyoti: Experimental observation and simulation of keyhole dynamics during laser drilling, *Optics & Laser Technology* 48, 2013, pp. 405–414
9. Pandey N.D., Shan H.S., Bharti A.: Percussion drilling with laser: hole completion criterion, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.: 28, Issue: 9, 2006, pp.863–868
10. Samant A. N., Dahotre N. B.: Laser machining of structural ceramics—A review, *Journal of the European Ceramic Society* 29, 2009, pp. 969–993
11. Rupinder Singh, Khamba J.S.: Ultrasonic machining of titanium and its alloys: A review, *Journal of Materials Processing Technology* 173 , 2006), pp. 125–135
12. Dvivedi A., Kumar P.: Surface quality evaluation in ultrasonic drilling through the Taguchi technique, *Int J AdvManufTechnol* 34, 2007, pp. 131–140
13. Skoczypiec S., Ruszaj A., Machno M.: Zastosowanie obróbki elektrochemiczno – elektroerozyjnej w mikrowytwarzaniu, *Mechanik* 11, 2014, pp. 881–885
14. Skoczypiec S., Kozak J., Ruszaj A.: Wybrane problemy technologii elektrochemicznej i elektroerozyjnej mikro - narzędzi, *Inżynieria Maszyn*, 2009, 14, pp. 20–30
15. Skoczypiec S., Ruszaj A.: A sequential electrochemical-electrodischarge process for micro part manufacturing, *Precision Engeneering* 38, 2014, pp. 680 – 690
16. Ho K.H., Newman S.T.: State of the art electrical discharge machining (EDM), *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43, 2003, pp.1287–1300
17. Pham D.T., Dimov S.S., Bigot S., Ivanov A., Popov K.: Micro-EDM—recent developments and research issues, *Journal of Materials Processing Technology* 149, 2004, pp. 50–57
18. Jahan M.P. , Rahman M., Wongb Y.S.: A review on the conventional and micro-electrodischarge machining of tungsten carbide, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 51, 2011, pp. 837–858
19. Pham D. T., Ivanov A., Bigot S., Popov K., Dimov S.: An investigation of tube and rod

- electrode wear in micro EDM drilling, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, May 2007, Volume: 3, Issue: 1-2, pp. 103–109
20. Jianzhong L., Guoqiang Y., Cong W., Xuejie G., Zuyuan Y.: Prediction of aspect ratio of a micro hole drilled by EDM, *Journal of Mechanical Science and Technology* 27 (1), 2013, pp. 185–190
 21. D’Urso G., Maccarini G., Ravasio C.: Process performance of micro-EDM drilling of stainless steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, Volume: 72, Issue: 9-12, pp. 1287–1298
 22. Nguyen M. D., Rahman M., Wong Y. S.: Enhanced surface integrity and dimensional accuracy by simultaneous micro-ED/EC milling, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61, 2012, pp. 191–194
 23. Liu J.W., Yue T.M., Guo Z.N.: An analysis of the discharge mechanism in electrochemical discharge machining of particulate reinforced metal matrix composites, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 50, 2010, pp.86–96

Mgr inż. Magdalena MACHNO
Inż. Wojciech BIZOŃ
Dr hab. inż. Sebastian SKOCZYPIEC
Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki
31 – 155 Kraków, ul. Warszawska 24
Tel./fax.: (0 - 12) 374 37 49
e – mail: machno.magda@gmail.com
bizonw@mech.pk.edu.pl
skoczypiec@mech.pk.edu.pl