



BADANIA WSTĘPNE OBRÓBKI ELEKTROEROZYJNEJ W GAZIE Z ZASTOSOWANIEM DODATKOWEGO CHŁODZENIA PRZEDMIOTU OBRABIANEGO

Agnieszka Żyra, Sebastian Skoczypiec

Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Poland

Corresponding author:

Agnieszka Żyra

Politechnika Krakowska

Wydział Mechaniczny

Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji

al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, Poland

phone: (+48) 12 6283228

e-mail: agazyra@gmail.com

PRELIMINARY TESTS OF ELECTRODISCHARGE MACHINING IN GASEOUS DIELECTRIC WITH ADDITIONAL WORKPIECE COOLING

ABSTRACT

Electrodischarge machining (EDM) in the gas can be an alternative to traditional electrodischarge machining in dielectric liquids. Dry EDM has many advantages comparing with traditional EDM, what is more with optimal machining parameters it is possible to gain very good accuracy and quality of machined surface. Moreover, EDM in the gas is environmental friendly, even that it is still not used in industry because of the problems with proper heat dissipation from the machining gap which results in problems with achieving satisfying repetitiveness. In the paper the results of austenitic steel X5CrNi 1810 electrodischarge drilling in the air and in the air in deionised water environment were presented. The aim of the research was to determinate the influence of current intensity, current voltage, pulse on time, pulse off time and a type of electrodes' polarization on the material removal rate, working electrode wear and the machined material surface structure.

KEYWORDS

Electrodischarge machining (EDM), Dry EDM, austenitic steel X5CrNi 1810.

1. Wstęp

Obróbka elektroerozyjna (EDM) jest niekonwencjonalną metodą kształtowania części maszyn i narzędzi powszechnie wykorzystywaną w zastosowaniach przemysłowych. Jest szczególnie doceniana ze względu na możliwości obróbki materiałów przewodzących prąd elektryczny bez względu na ich własności mechaniczne. EDM jest stosunkowo tania i elastyczną metodą obróbki, pozwalającą osiągnąć bardzo dobrą dokładność wymiarowo-kształtową (także w przypadku mikrokształtowania).

W ostatnich latach zaczęto jednak zwracać coraz większą uwagę na aspekty środowiskowe związane ze stosowaniem EDM. W szczególności dotyczy to cieczy dielektrycznych stosowanych w tym procesie, czyli najpowszechniej wykorzystywanych dielektryków węglodorowych. Jak wiadomo powstające w trakcie obróbki opary (tj. CO i CH₄) są bardzo szkodliwe. Drugi bardzo często wykorzystywany dielektryk czyli woda dejonizowana jest stosowany przede wszystkim podczas wycinania elektroerozyjnego, co wynika z konieczności minimalizacji zagrożenia pożarowego oraz możliwość obrób-

ki przy relatywnie dużej szczelinie międzyelektrodowej. Jednak, ze względu na trudne do ustabilizowania właściwości (z czasem traci swoje właściwości izolacyjne) oraz niską dokładność obróbki jej zastosowanie w innych odmianach kinematycznych jest ograniczone.

Biorąc pod uwagę wymienione problemy z dielektrykami ciekłymi, badacze kilkanaście lat temu zaczęli poszukiwać alternatywnego rodzaju dielektryka. Zaczęto m.in. prowadzić badania nad wykorzystaniem dielektryków gazowych. Wykazano, że ich stosowanie do obróbki EDM pozwala osiągać bardzo dobre rezultaty obróbkowe przy odpowiednio dobranych parametrach obróbki – wysoką wydajność obróbki, bardzo dobry poziom chropowatości powierzchni, przy praktycznie zerowym zużyciu elektrody roboczej. Jednak nadal nie poznano do końca dokładnego mechanizmu usuwania nadmiaru obróbkowego w dielektrykach gazowych (wskazuje się na o termiczno-chemicznym charakter wylądowań pomiędzy elektrodą roboczą a materiałem obrabianym) [10]. Co więcej, wciąż nie rozwiązano podstawowego problemu występującego podczas obróbki EDM w gazie, mianowicie nie znaleziono skutecznego sposobu na dyssypację ciepła ze strefy obróbki. Pro-

blem stanowią również powstające produkty obróbki, które m.in. w postaci pyłu mogą stanowić potencjalne zagrożenie dla zdrowia operatora, a z pewnością obniżyć komfort jego pracy. W dobie dbania o zachowanie bezpieczeństwa i ergonomii stanowiska pracy, wydaje się to również istotnym zagadnieniem. Z powyższych względów dalsze poznanie i rozwój EDM w gazie jest zagadnieniem bardzo aktualnym.

2. Ogólna charakterystyka obróbki elektroerozyjnej

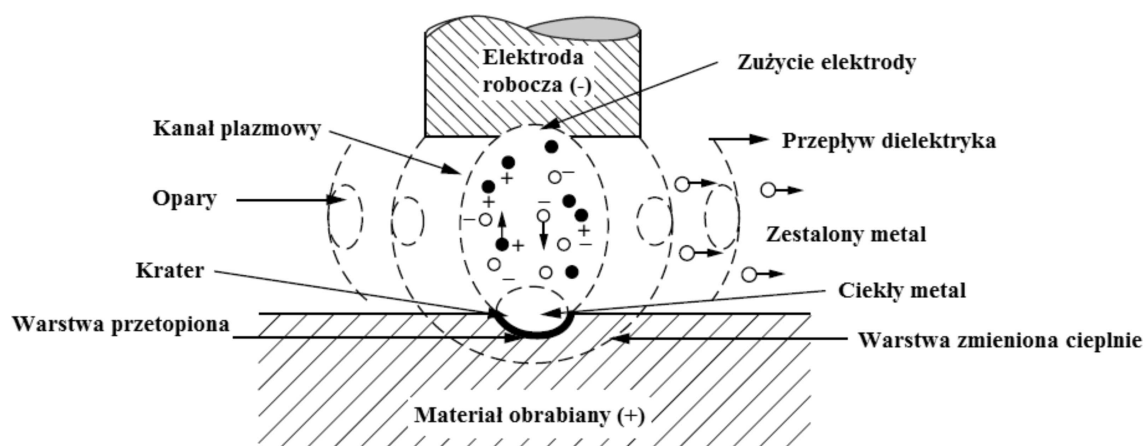
Obróbka elektroerozyjna (EDM), jest jedną z najczęściej wykorzystywanych niekonwencjonalnych metod obróbki we wszystkich gałęziach przemysłu [7]. Może ona być stosowana do obróbki wszystkich materiałów o przewodności elektrycznej powyżej 10^{-2} S/cm, niezależnie od ich składu chemicznego i własności mechanicznych [7]. Dzięki obróbce EDM możliwe jest otrzymywanie elementów o skomplikowanej geometrii, niewielkich rozmiarach, czy struktur cienkościennych [5, 7]. Podczas obróbki elektroerozyjnej, naddatek jest usuwany w wyniku erozji elektrycznej, zachodzącej na skutek zjawisk towarzyszących impulsowym wyładowaniom elektrycznym, pomiędzy elektrodą roboczą a przedmiotem obrabianym, oddzielonych warstwą dielektryka (rys. 1). Pomiędzy elektrodami powstaje kanał plazmowy, a materiał jest topiony i odparowywany w miejscu wyładowania. W strefie obróbki cały czas wymuszony jest przepływ dielektryka, którego głównym zadaniem jest chłodzenie, zestalanie stopionego materiału i jego usuwanie ze strefy obróbki [1, 6,13, 15].

Warto również zaznaczyć, że termiczny i elektryczny charakter obróbki elektroerozyjnej implikuje konieczność zwracania szczególnej uwagi na właściwości termiczne i elektryczne materiałów poddawanych obróbce. Determinują one obrabialność elektroerozyjną oraz efektywność topienia, parowania oraz chłodzenia materiału.

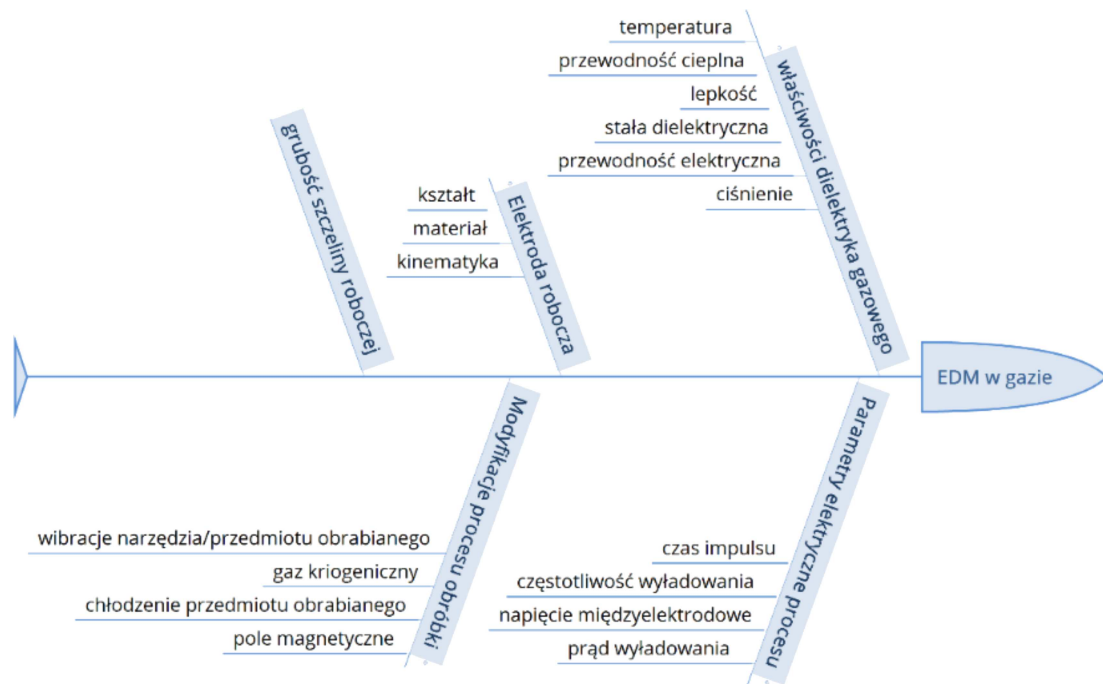
3. Dielektryki gazowe

Pierwsze badania nad wykorzystaniem dielektryków gazowych w obróbce elektroerozyjnej przeprowadzono w końcu lat dziewięćdziesiątych XX wieku [9]. W tym wariantcie obróbki stopiony materiał przedmiotu obrabianego jest usuwany ze szczeliny międzyelektrodowej przez strumień gazu (np. tlen, argon, azot, powietrze) dostarczany do strefy obróbki pod ciśnieniem przez kanał w elektrodzie roboczej. Jedną z podstawowych funkcji gazu w tym przypadku jest chłodzenie, zestalanie i usuwanie stopionego materiału z przestrzeni międzyelektrodowej. Zapobiega to tym samym powtórnemu wtapianiu produktów obróbki w przedmiot obrabiany i elektrodę roboczą. Ponadto strumień gazu wygasza kanał plazmowy pomiędzy kolejnymi wyładowaniami, pozwalając na odzyskanie odpowiednich paramentów dielektrycznych gazu oraz inicjację kolejnego wyładowania. W [10] wskazuje się na istotne różnice w charakterze energetycznym procesu EDM w gazie, przywołując różne modele wyładowań. Konwencjonalna obróbka EDM w dielektryku ciekłym jest procesem stricte termicznym, podczas gdy w obróbce EDM w gazie dochodzi także do reakcji chemicznych – można zatem mówić o termiczno-chemicznym charakterze obróbki [10].

Autorzy [3, 4, 9, 11, 12, 14, 20], wskazują na szereg zalet obróbki EDM w gazie w porównaniu z obróbką w dielektrykach ciekłych. Niewątpliwą przewagą EDM w gazie jest jej neutralność w stosunku do środowiska naturalnego (do atmosfery nie trafiają żadne szkodliwe produkty rozpadu dielektryka). EDM w gazie pozwala uzyskać: (1) znikome zużycie elektrody roboczej, (2) dzięki cieńszej szczelinie międzyelektrodowej lepszą dokładność obróbki, (3) relatywnie dobrą jakość powierzchni (cienka warstwa wpływów cieplnych, niewielka ilość mikropełnięć), (4) większą wydajność obróbki – co wynika z łatwiejszego formowanie kanału plazmowego, za sprawą mniejszej wartości stałej dielektrycznej i niższej lepkości gazu, (5) praktycznie niewystępujące podczas obróbki naprężenia i siły. Kunieda [9]



Rys. 1. Schemat przebiegu procesu EDM [2].



Rys. 2. Czynniki wpływające na wydajność obróbki EDM w gazie.

podkreśla minimalne zużycie elektrody roboczej podczas obróbki stali w powietrzu oraz wzrost wydajności obróbki zaobserwowany w przypadku zwiększenia zawartości tlenu w dostarczanej mieszance gazu. Także Macedo [11, 12] w swoich badaniach wskazuje na istotne różnice w mechanizmie formowania kanału plazmowego, a w efekcie różnicach w charakterze powstawania kraterów podczas obróbki EDM w zależności od użytego gazu. Rodzaj gazowego dielektryka ma tym samym bezpośredni wpływ na wydajność obróbki. Podkreśla także wpływ napięcia wyładowania, grubości szczeliny międzyelektrodowej, materiału i kształtu elektrody roboczej [17]. Co więcej Roth [16] zwraca także uwagę na różnice w stabilności tlenu i gazów mniej utleniających, co bezpośrednio przekłada się na stabilność i wydajność obróbki. Chcąc nakreślić złożoność procesu obróbki EDM w gazie i ilość czynników mających na nią bezpośredni wpływ, zebrano je na poniższym diagramie Ishikawy (rys. 2).

Pomimo szeregu wymienionych zalet procesu EDM w gazie, problem nadal stanowi efektywne odprowadzanie ciepła ze strefy obróbki, odpowiedni dobór parametrów procesu, a tym samym osiągnięcie odpowiedniej stabilności i wydajności obróbki. Z tego względu EDM w gazie nie jest obecnie stosowane w warunkach przemysłowych. W aspekcie przedstawionej charakterystyki jako główny obszar potencjalnego zastosowania EDM w gazie należy upatrywać mikroobróbki [19], obróbkę z zastosowaniem uniwersalnej elektrody (np. frezowanie elektroerozyjne [10, 18]), drażnienie otworów [19] oraz wycinanie [8] (zastosowanie w ostatnim przejściu elektrody, w tym przypadku osiąga się bardzo dobre rezultaty dokładności wymiarowo-kształtowej).

Na podstawie analizy literatury przedmiotu zidentyfikowano, że jednym z kluczowych problemów szer-

szego zastosowania EDM w gazie jest efektywne odprowadzanie ciepła ze strefy obróbki, a także odpowiedni dobór parametrów procesu, pozwalający na osiągnięcie odpowiedniej niezawodności usuwania materiału. Jako główny obszar potencjalnego zastosowania EDM w gazie należy upatrywać mikroobróbki, obróbkę z zastosowaniem uniwersalnej elektrody, drażnienie otworów oraz wycinanie. Problemy z rozproszeniem ciepła w strefie obróbki powodują jednak, że EDM w gazie nie znalazło jak dotychczas szerszych zastosowań przemysłowych.

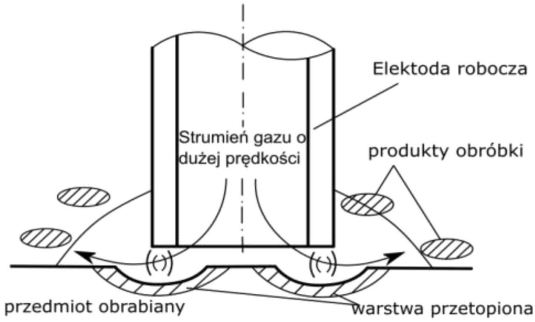
4. Metodyka badań

Badania drażnienia elektroerozyjnego stali X5CrNi 1810 z wykorzystaniem dielektryka gazowego (powietrza) przeprowadzono w dwóch wariantach: bez (rys. 3a) oraz z zanurzeniem przedmiotu obrabianego w wodzie dejonizowanej (rys. 3b), na dostosowanym stanowisku badawczym, wyposażonym w generator elektroerozyjny BP 95 produkcji ZAP B.P. Końskie-Kutno oraz zewnętrzny system chłodzenia powietrzem (sprężarka o ciśnieniu maksymalnym $p_{\max} = 8$ bar). Wykorzystany do obróbki generator był przystosowany do obróbki przy napięciu roboczym do 550 V. Badania przeprowadzono w dwóch konfiguracjach:

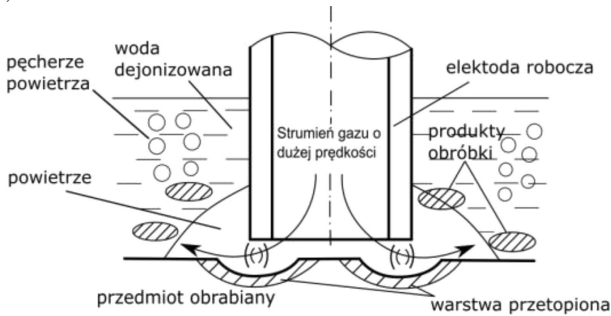
a) w pierwszej konfiguracji powietrze jako dielektryk gazowy było dostarczane do strefy obróbki przez jednokanałową, rurkową, nierotującą elektrodę roboczą (rys. 3a),

b) w drugiej konfiguracji powietrze było dostarczane do szczeliny roboczej w ten sam sposób, natomiast przedmiot obrabiany był zanurzony w wodzie dejonizowanej z zapewnionym stałym dopływem wody (rys. 3b).

a)



b)



Rys. 3. Schemat obszaru obróbki w dwóch badanych wariantach EDM w gazie: a) EDM w powietrzu, b) EDM w powietrzu z zanurzeniem przedmiotu obrabianego w wodzie dejonizowanej.

Jako, że przeprowadzone badania miały charakter prób wstępnych, przeanalizowano wpływ możliwie du-

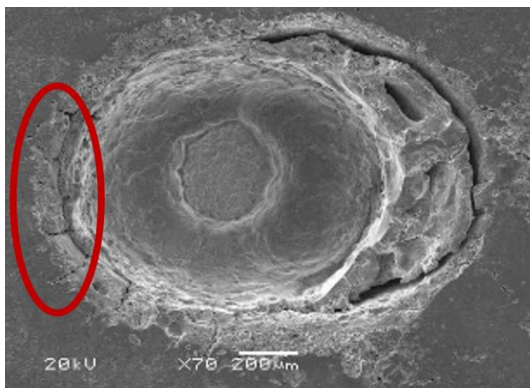
żej grupy czynników wejściowych. Głównymi celami badań było: (1) wykazanie, że zanurzenie przedmiotu w wodzie dejonizowanej poprawia wskaźniki technologiczne EDM w gazie oraz (2) znalezienie zakresu paramentów wejściowych, w jakim zostaną przeprowadzone dalsze, właściwe badania doświadczalne. W obydwu konfiguracjach obróbka była prowadzona z wykorzystaniem miedzianej, jednokanałowej, rurkowej, nierotującej elektrody roboczej o średnicy zewnętrznej 1 mm, w dwóch polaryzacjach: prostej – elektroda robocza (-), przedmiot obrabiany (+) oraz odwrotnej: elektroda robocza (+), przedmiot obrabiany (-). Podczas badań czynnikami wejściowymi były: natężenie prądu wyładowania, napięcie elektryczne, czas impulsu, czas przerwy. W tabeli 1 zawarto szczegółowe informacje dotyczące poszczególnych parametrów drążenia. Łącznie wykonano 120 prób.

Po każdej próbie zarówno elektroda robocza jak i przedmiot obrabiany były ważone, w celu określenia wydajności obróbki i zużycia elektrody roboczej. Chcąc zidentyfikować zmiany strukturalne i morfologiczne przedmiotu obrabianego, a także określić dokładność obróbki, wykonano zdjęcia SEM (przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego JSM5510LV) przygotowanych zglądów (rys. 4). Dokonano również analizy zmian składu chemicznego w analizowanych obszarach poddawanych obróbce w dwóch konfiguracjach wykorzystując przystawkę EDS (spektroskopia energo-dyspersyjna).

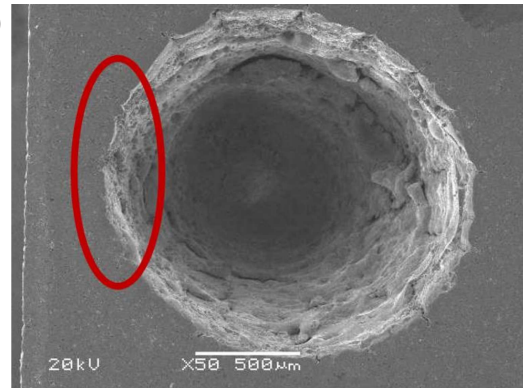
Tabela 1
Parametry obróbki w dwóch konfiguracjach.

| Materiał obrabiany | stal X5CrNi 1810 | | |
|----------------------|---|-----|----|
| Elektroda robocza | Jednokanałowa, rurkowa, miedziana elektroda, średnica zewnętrzna 1 mm | | |
| Rodzaj gazu | powietrze | | |
| Natężenie prądu [A] | 5, 10, 15 | | |
| Napięcie [V] | 220, 330, 440, 550 | | |
| Czas impulsu [μs] | 200 | 100 | 25 |
| Czas przerwy [μs] | 50 | 25 | 10 |
| Ciśnienie gazu [bar] | 4 | | |
| Czas obróbki [min.] | 10 | | |
| Biegunowość | prosta: elektroda robocza (-), przedmiot obrabiany (+) | | |
| | odwrotna: elektroda robocza (+), przedmiot obrabiany (-) | | |

a)



b)



Rys. 4. Umiejscowienie obszaru, objętego zdjęciami SEM oraz analizą EDS, biegunowość prosta, czas impulsu = 100 μs, czas przerwy = 25 μs: a) EDM w powietrzu, b) EDM w powietrzu w środowisku wody dejonizowanej.

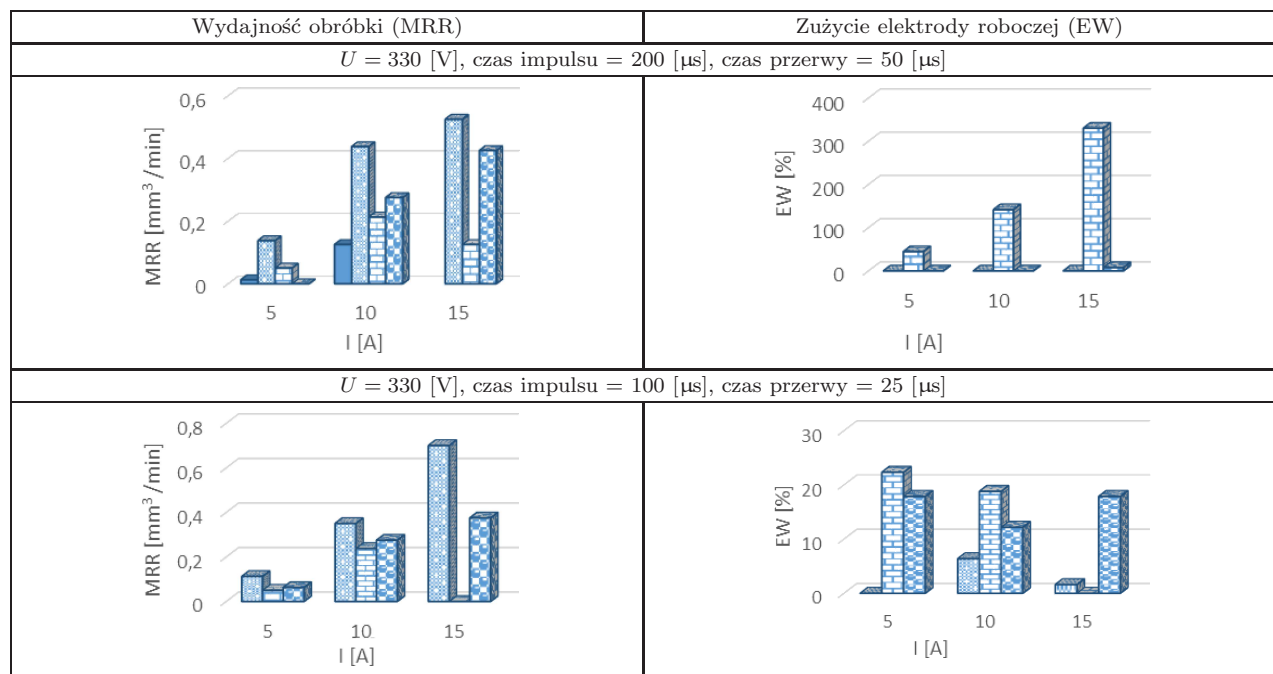
5. Wyniki badań

Z analizy wyników badań obróbki EDM w gazie (tabela 2) w pierwszej konfiguracji (tzn. bez zanurzenia w wodzie dejonizowanej), wynika że jest to proces bardzo niestabilny. Problem stanowiło odprowadzanie ciepła ze strefy obróbki, co prowadziło do wzrostu temperatury przedmiotu obrabianego. Z tego powodu obserwowano m.in. bardzo duże zużycie elektrody roboczej (sięgające nawet 1400%) przy jednocześnie znikomej wydajności obróbki. Największe problemy ze zużyciem elektrody roboczej i niską wydajnością obróbki zauważono podczas obróbki w powietrzu przy biegunowości prostej (elektroda robocza (-), przedmiot obrabiany (+)). Przy tej biegunowości w wielu przypadkach przeprowadzenie prób było niemożliwe ze względu na gwałtowne nagrzewanie się elektrody roboczej i jej wtapianie w przedmiot obrabiany. Problem ten nie występował podczas obróbki w biegunowości odwrotnej, podczas, której stwierdzono wyższą wydajność obróbki, pomimo nadal wysokiego zużycia elektrody roboczej (nawet do 340% przy $U = 330$ V, $I = 15$ A, czasie impulsu = 200 μ s, czasie przerwy = 50 μ s). Należy tutaj wspomnieć, że przy biegunowości odwrotnej przy krótszym czasie impulsu (100 μ s) i przerwy (25 μ s) uzyskano kilkukrotnie niższy poziom zużycia elektrody roboczej przy tej samej wydajności obróbki.

Badania w drugiej konfiguracji tzn. EDM w powietrzu przy zanurzonej w wodzie dejonizowanej przedmiocie obrabianym, prowadzono przy zachowaniu tych samych parametrów (tabela 2). Pozwoliło to na sprawdzenie wpływu dodatkowego chłodzenia ciekłym medium (woda dejonizowana) na wydajność obróbki EDM. Stwierdzono, że obróbka EDM w powietrzu przy przedmiocie obrabianym zanurzonej w wodzie dejonizowanej dla praktycznie wszystkich parametrów przebiega lepiej niż w samym powietrzu (lepsze wskaźniki: wyższa wydajność obróbki, mniejsze zużycie elektrody roboczej, większa stabilność procesu). Wzrost natężenia prądu przy badanym czasie impulsu i przerwy (czas impulsu odpowiednio = 200 μ s, a także 100 μ s, czas przerwy odpowiednio = 50 μ s i 25 μ s) prowadzi do wzrostu wydajności obróbki. Co więcej obróbka przebiegała stabilniej przy zastosowaniu biegunowości prostej, pozwalając osiągnąć większą wydajność obróbki przy mniejszym zużyciu elektrody roboczej (w niektórych przypadkach odnotowano 0% zużycie elektrody roboczej). Zauważono również mniejsze zużycie elektrody roboczej dla dłuższych czasów impulsu i przerwy, jednakże większą wydajność obróbki osiągnano przy krótszych czasach impulsu i przerwy. Podsumowując, dostrzega się większy potencjał aplikacyjny obróbki elektroerozyjnej prowadzonej w powietrzu z przedmiotem zanurzonej w wodzie dejonizowanej nad tą prowadzoną tylko w powietrzu.

Tabela 2

Porównanie wydajności obróbki EDM stali X5CrNi1810 i zużycia elektrody roboczej prowadzonej w powietrzu oraz w powietrzu w środowisku wody dejonizowanej, przy różnych wartościach natężenia [21].



Legenda:

Biegunowość:

prosta: elektroda robocza (-), przedmiot obrabiany (+)

odwrotna: elektroda robocza (+), przedmiot obrabiany (-)

■ powietrze, ER(-), PO (+)

■ powietrze+woda dejonizowana, ER(-), PO (+)

■ powietrze, ER(+), PO (-)

■ powietrze+woda dejonizowana, ER(+), PO (-)

Kolejnym rozważanym parametrem było napięcie międzyelektrodowe. Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń można stwierdzić, że (tabela 3):

1) największą wydajność obróbki EDM w gazie w środowisku wody dejonizowanej osiągnięto przy natężeniu prądu $I = 10$ A, biegunowości prostej, czasie impulsu = 200 μ s, czasie przerwy = 50 μ s, niezależnie od wartości napięcia elektrycznego,

2) dla obydwu biegunowości, praktycznie niemożliwe było prowadzenie obróbki przy napięciu międzyelektrodowym na poziomie 440 V i 550 V,

3) o wydajnej obróbce można mówić w przypadku obróbki EDM prowadzonej w powietrzu w środo-

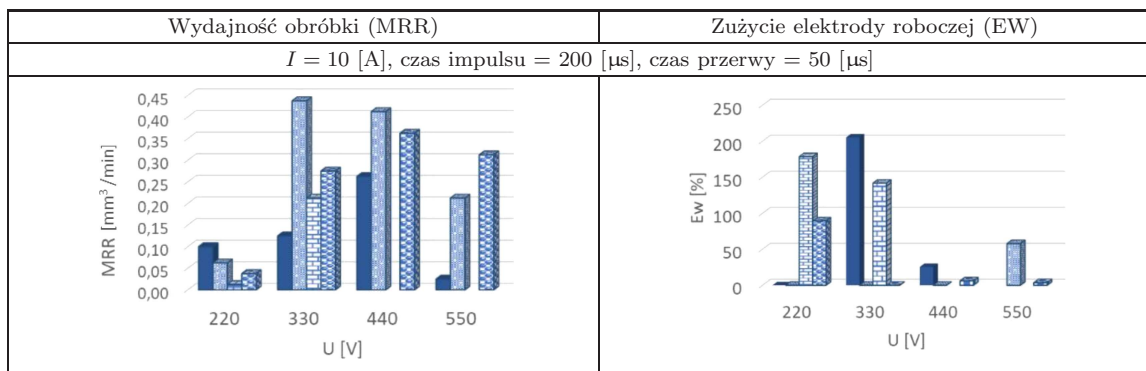
wisku wody dejonizowanej przy biegunowości prostej (w tym przypadku zużycie elektrody wystąpiło dopiero przy napięciu 550 V, natomiast najlepszą wydajność obróbki osiąga się przy 330 V),

4) bardzo duże zużycie elektrody roboczej zaobserwowano przy niskiej wartości napięcia – na poziomie 220 V, przy biegunowości odwrotnej gdzie doszło do procesu utleniania elektrody roboczej.

W tabeli 4 zawarto wybrane zdjęcia SEM otworów wydrążonych przy napięciu równym 330 V, natężeniu prądu 10 A, czasie impulsu 100 μ s, czasie przerwy 25 μ s. Ze względu na generowaną w trakcie procesu obróbki EDM wysoką temperaturę w strefie obróbki na analizo-

Tabela 3

Porównanie wydajności obróbki EDM stali X5CrNi1810 i zużycia elektrody roboczej prowadzonej w powietrzu oraz w powietrzu w środowisku wody dejonizowanej, przy różnych wartościach napięcia [21].



Legenda:

Biegunowość:

prosta: elektroda robocza (-), przedmiot obrabiany (+)

odwrotna: elektroda robocza (+), przedmiot obrabiany (-)

■ powietrze, ER(-), PO (+)

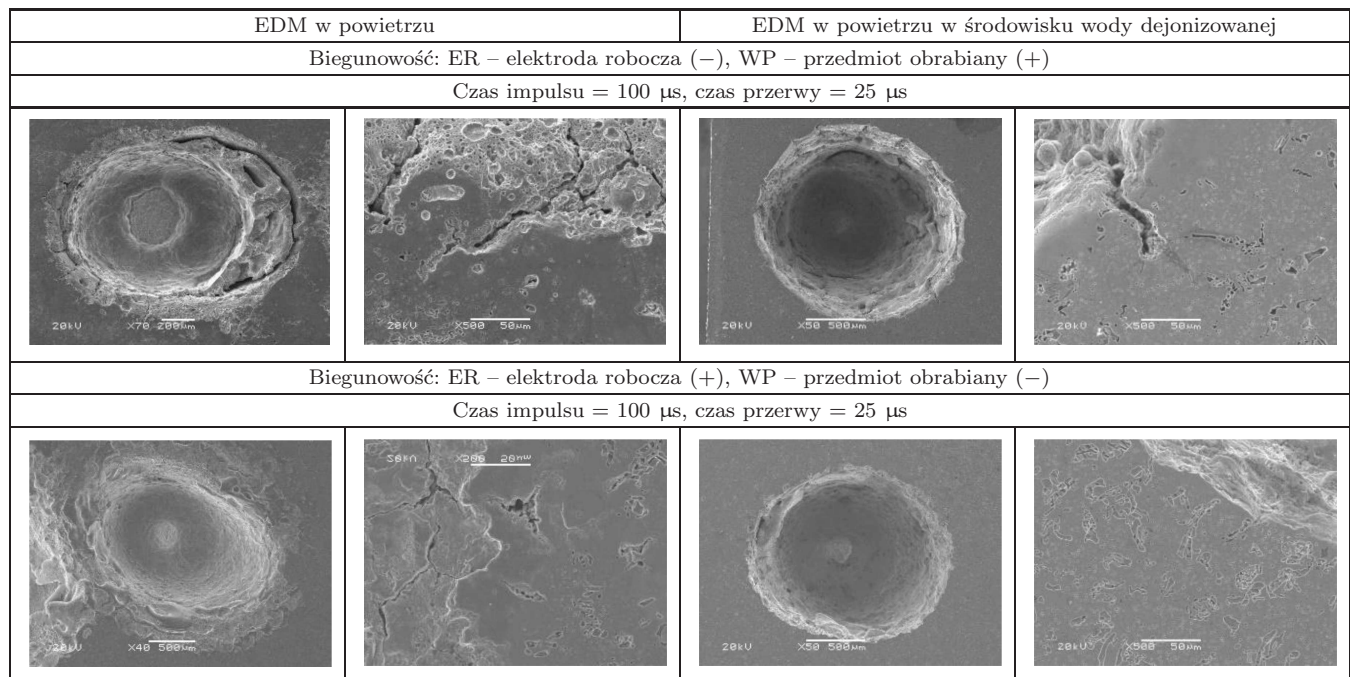
■ powietrze+woda dejonizowana, ER(-), PO (+)

■ powietrze, ER(+), PO (-)

■ powietrze+woda dejonizowana, ER(+), PO (-)

Tabela 4

Zdjęcia SEM po obróbce EDM w powietrzu w dwóch konfiguracjach, $I = 10$ A, $U = 330$ V [21].



wanej powierzchni można zauważyć charakterystyczne mikropęknięcia. Większe i głębsze mikropęknięcia można zaobserwować w przypadku otworów drażnionych w powietrzu, w porównaniu to tych wykonanych w powietrzu przy przedmiocie obrabianym zanurzonym w wodzie dejonizowanej. Na zdjęciach występują charakterystyczne białe obszary, powstałe najpewniej w wyniku reakcji utleniania, jak również zastygłe produkty obróbki, czy kratery po wyładowaniach o zróżnicowanej geometrii. Zauważono także istotny problem z lokalizacją drażenia (dokładność odwzorowania elektrody roboczej) w przypadku drażenia w samym powietrzu. Zdecydowanie lepszą jakość powierzchni, z mniejszą ilością mikropęknięć, zestalonych produktów obróbki oraz karbów otrzymano w wyniku obróbki w powietrzu z zanurzeniem przedmiotu obrabianego w wodzie dejonizowanej. Dokładność obróbki w tym przypadku jest znacznie lepsza, jednak jakość powierzchni nadal nie jest idealna.

Podczas analizy EDS w warstwie wierzchniej zidentyfikowano tlen, w obydwu konfiguracjach obróbki. Dodatkowo, na powierzchni poddawanej obróbce tylko w powietrzu znaleziono miedź.

6. Wnioski

Na podstawie zrealizowanych badań wstępnych można sformułować następujące wnioski:

- 1) zanurzenie przedmiotu obrabianego w wodzie dejonizowanej umożliwia ustabilizowanie procesu przez zwiększenie efektywności odprowadzania ciepła ze strefy obróbki,
- 2) przy zastosowanym wariacie kinematycznym w przypadku EDM w powietrzu trudno mówić o obróbce kształtowej,
- 3) podczas zastosowania polaryzacji odwrotnej w środowisku wody dejonizowanej utlenianiu ulega materiał elektrody roboczej,
- 4) bardzo istotny ze względu na przebieg obróbki jest właściwy dobór czasu impulsu oraz czasu przerwy (wymaga to dalszej, pogłębionej analizy),
- 5) obróbka EDM w powietrzu w zanurzeniu znacznie poprawia komfort pracy operatora (do otoczenia nie trafiają pyły powstające w trakcie obróbki co jest problemem podczas obróbki w samym gazie),
- 6) koniecznym warunkiem prowadzenia procesu EDM w gazie jest wymuszony przepływ dielektryka przez szczelinę międzyelektrodową. Konieczność ciągłego doprowadzania dielektryka gazowego do szczeliny ogranicza to obszar zastosowania do kształtowania elektrodą uniwersalną oraz innych wariantów pozwalających na efektywne doprowadzenie dielektryka. Dodatkowo, ze względu na problemy z usuwaniem ciepła i produktów erozji ze strefy obróbki jako potencjalny obszar stosowania wskazywać należy szeroko rozumianą mikroobróbkę.

W kolejnych etapach badań zasadnym wydaje się podjęcie następujących działań: wprowadzenie obrotów elektrody roboczej, przeprowadzenie analogicznych

prób na zasilaczu o mniejszych wartościach napięcia roboczego (zasilacz przystosowany do mikroobróbki), przebadanie procesu w kinematyce frezowania, zastosowanie innego gazu jako dielektryka (np. azot, argon, tlen), a także optymalizacja ciśnienia dielektryka dostarczanego do strefy obróbki.

Literatura

- [1] Banu A., Ali Mohammad Yeakub, *Electrical Discharge Machining (EDM): A Review*, International Journal of Engineering Materials and Manufacture, 1, 3–10, 2016.
- [2] El-Hofy H., *Advanced machining processes*, McGraw-Hill, 2005.
- [3] Fattahi S., Baseri H., *Analysis of dry electrical discharge machining in different dielectric mediums*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering IME-CHE, 231, 3, 497–512, 2015.
- [4] Govindan P., Joshi S., *Experimental characterization of material removal in dry electrical discharge drilling*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Elsevier, 50, 5, 431–443, 2010.
- [5] Hourmand M., Sarhan A., Sayuti M., *Micro-electrode fabrication processes for micro-EDM drilling and milling: a state-of-the-art review*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, pp. 1–34, 2016.
- [6] Jha B., Ram K., Rao M., *An overview of technology and research in electrode design and manufacturing in sinking electrical discharge machining*, Journal of Engineering Science and Technology Review, 4, 2, 118–130, 2011.
- [7] Klink A., *Process signatures of EDM and ECM Processes – overview from part functionality and surface modification point of view*, Procedia CIRP, 42, 240–245, 2016.
- [8] Kunieda M., Furudate C., *High precision finish cutting by dry WEDM*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 50, 1, 121–124, 2001.
- [9] Kunieda M., Yoshida M., Taniguchi N., *Electrical Discharge Machining in Gas*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 46, 1, 143–146, 1997.
- [10] Kunieda M. et al., *High Speed 3D Milling by Dry EDM*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 52, 1, 147–150, 2003.
- [11] Macedo F.T.B., Wiessner M., Hollenstein C., Kuster F., Wegener K., *Investigation of the Fundamentals of Tool Electrode Wear in Dry EDM*, Procedia CIRP, Elsevier B.V., 46, Hpc Vii, 55–58, 2016.
- [12] Macedo F.T.B., Wiessner M., Hollenstein C., Kuster F., Wegener K., *Dependence of Crater Formation in Dry EDM on Electrical Breakdown Mechanism*, Procedia CIRP, 42, 161–166, 2016.

- [13] Miernikiewicz A., *Doświadczalno-teoretyczne podstawy obróbki elektroerozyjnej (EDM)*, Kraków, Politechnika Krakowska, 2000.
- [14] Puthumana G., Joshi S., *Investigations into performance of dry EDM using slotted electrodes*, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 12, 6, 957–963, 2011.
- [15] Rajurkar K.P., Sundaram M.M., Malshe A.P., *Review of Electrochemical and Electrodischarge Machining*, Procedia CIRP, Elsevier B.V., 6, 13–26, 2013.
- [16] Roth R. Kuster F., Wegener K., *Influence of oxidizing gas on the stability of dry electrical discharge machining process*, Procedia CIRP, Elsevier B.V., 6, 338–343, 2013.
- [17] Saha K., Choudhury S.K., *Experimental investigation and empirical modeling of the dry electric discharge machining process*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 49, 3–4, 297–308, 2009.
- [18] Skrabalak G., Kozak J., Zybura M., *Optimization of dry EDM milling process*, Procedia CIRP, Elsevier B.V., 6, 332–337, 2013.
- [19] Uhlmann E. et al., *Comparative Analysis of Dry-EDM and Conventional EDM for the Manufacturing of Micro Holes in Si₃N₄-tin*, Procedia CIRP, 42, 173–178, 2016.
- [20] Yang D. et al., *Technology of ablation milling by fast-moving electrode*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018.
- [21] Żyra A., Bizoń W., Skoczypiec S., *Primary Research On Dry Electrodischarge Machining With Additional Workpiece Cooling*, AIP Conference Proceedings, 2017, 020034, 2018.