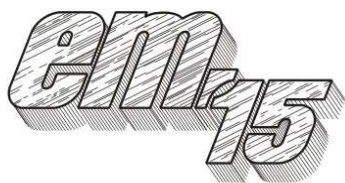


XII Międzynarodowa Konferencja - Electromachining 2015



UNIwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Inżynierii Produkcji
STOWARZYSZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
MECHANIKÓW POLSKICH – Koło Uczelniane UTP

85-789 Bydgoszcz, ul. Kaliskiego 7
tel. (0 52) 340-87-47, fax. (0 52) 340-82-45,
e-mail: tomasz.paczkowski@utp.edu.pl

Proekologiczne trendy w obróbce elektroerozyjnej

Environmentally friendly trends in electrical discharge machining (EDM)

TADEUSZ LEPPERT*

Obróbka elektroerozyjna (Electro-Discharge Machining - EDM) jest jednym z najbardziej rozpowszechnionych sposobów niekonwencjonalnego kształtowania przedmiotów, stosowanym do wytwarzania powierzchni o złożonych kształtach, głównie w materiałach o dużej twardości i trudnoskrawalnych. Rosnące zainteresowanie wpływem procesów wytwarzania na środowisko naturalne i zdrowie pracowników spowodowało podjęcie badań zmierzających do opracowania nowych lub zmodyfikowanych sposobów obróbki zmniejszających lub eliminujących ich negatywne oddziaływanie ekologiczne. W artykule przedstawiono analizę czynników procesu drażenia elektroerozyjnego będących źródłem zagrożeń środowiskowych oraz scharakteryzowano podejmowane próby ich ograniczenia z zastosowaniem innowacyjnych rozwiązań technologicznych obróbki elektroerozyjnej.

SŁOWA KLUCZOWE: obróbka elektroerozyjna, drażenie, cięcie elektroerozyjne, na sucho, z minimalną ilością dielektryka

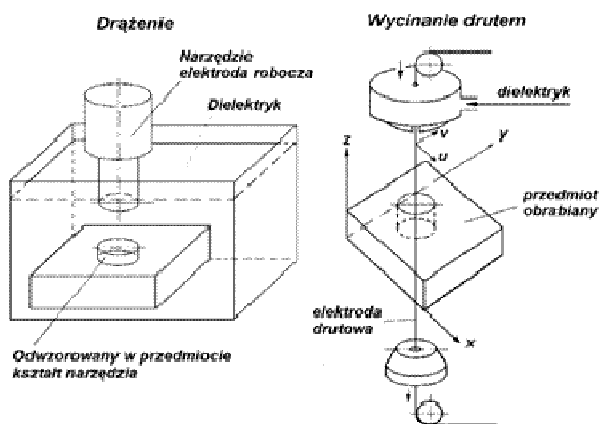
EDM (Electrical Discharge Machining-- EDM) is one of the most common ways of unconventional machining of objects with the surfaces of complex shape mainly in materials with high hardness and difficult to cut. The growing concern of the impact of manufacturing processes on the environment and health of workers has prompted research to develop innovative solutions to reduce or eliminate their negative environmental impacts. The article presents an analysis of the EDM factors generating environmental risks and characterizes the attempts to limit their negative influence by introducing innovative EDM technologies.

KEYWORDS: EDM, dry EDM, wire electrical discharge WEDM, minimum amount of the dielectric

dr hab. inż. Tadeusz Leppert (tleppert@utp.edu.pl)

Wstęp

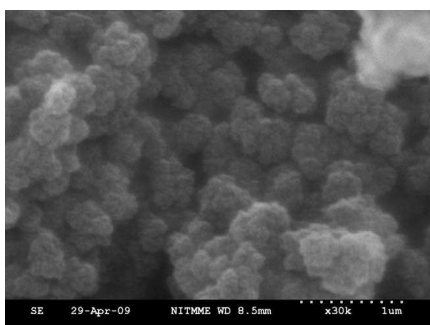
Obróbka elektroerozyjna (Electro-Discharge Machining - EDM) jest jednym z najbardziej rozpowszechnionych sposobów obróbki, spośród niekonwencjonalnych metod kształtowania przedmiotów, stosowanym do wytwarzania powierzchni o złożonych kształtach, w tym szczególnie do produkcji form i matryc w przetwórstwie tworzyw sztucznych a także obróbce plastycznej, w przemyśle lotniczym, nuklearnym i narzędzi chirurgicznych. Ze względu na brak bezpośredniego styku między narzędziem i przedmiotem obrabianym oraz bardzo dużą koncentrację energii na jednostkę powierzchni, w wyniku której ubytek materiału obrabianego następuje poprzez stopienie i odparowanie drobnych jego cząstek, metoda ta umożliwia obróbkę materiałów twardych i kruchych, jak stale w stanie utwardzonym i materiały ceramiczne. Materiały obrabiane tą metodą powinny charakteryzować się dobrą przewodnością elektryczną, warunkującą przebieg procesów elektrotermicznych zachodzących podczas impulsowych wyładowań elektrycznych pomiędzy elektrodą roboczą (narzędziem) a przedmiotem obrabianym, oddzieloną warstwą dielektryku. W praktyce występują dwie odmiany obróbki elektroerozyjnej różniące się głównie kształtem narzędzia: drażenie elektroerozyjne wgłębne, w którym uformowanie obrobionej powierzchni powstaje w wyniku odwzorowania geometrycznego profilu elektrody roboczej oraz elektroerozyjne cięcie drutem, w którym przedmiot obrabiany kształtowany jest w wyniku zaprogramowanych przemieszczeń stołu względem odpowiednio usytuowanej elektrody drutowej wykonującej ponadto osiowy ruch przesuwowy (rys. 1). Do wzrostu znaczenia obróbki elektroerozyjnej przyczyniły się przede wszystkim postępy w rozwoju generatorów impulsów, materiałów stosowanych na elektrody i układów konstrukcyjnych obrabiarek, co wpłynęło na wzrost wydajności procesu i dokładności wymiarowo - kształtowej obrabianych powierzchni oraz zmniejszenie zużycia narzędzia. Rozwój i upowszechnienie układów sterowania komputerowego zwiększyło zdolności ruchowe narzędzia względem przedmiotu obrabianego, pozwalając na optymalizację procesu kształtowania powierzchni i erozji [1, 3, 13, 16, 25, 26].



Rys. 1. Schemat drążenia elektroerozyjnego i wycinania drutem

Ekologiczne zagrożenia obróbki elektroerozyjnej

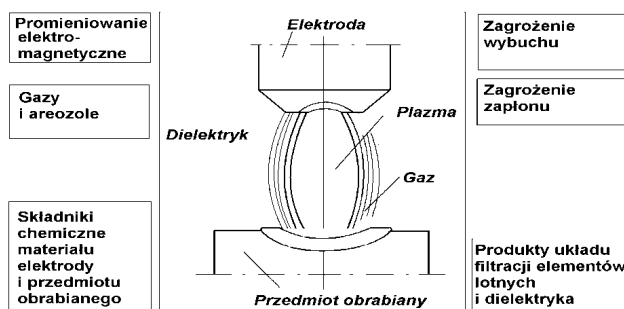
Obróbka elektroerozyjna pomimo wielu technologicznych/produkcyjnych zalet w kształtowaniu złożonych powierzchni w materiałach twardych i utwardzonych posiada szereg potencjalnych zagrożeń zarówno dla obsługi i bezpośredniego otoczenia stanowiska pracy, jak również dla środowiska naturalnego. Zagrożenia te wynikają z charakteru zachodzących w niej zjawisk elektrotermicznych, wywołanych wyładowaniami elektrycznymi, jak również zależą od rodzaju i składu chemicznego materiału narzędzia i obrabianego przedmiotu oraz stosowanego dielektryka. Powstające w wyniku realizacji procesu obróbki erozyjnej produkty uboczne są toksyczne i stanowią źródło zanieczyszczeń oraz zagrożeń dla otoczenia. Należą do nich drobne elementy wyerodowanego materiału a także wydzielające się gazy i aerozole, składniki rozkładu temperaturowego dielektryku oraz poerozyjny szlam, w skład których wchodzi ciężkie metale i inne niebezpieczne dla obsługi i środowiska produkty erozji. Dodatkowym źródłem zagrożenia są łatwo palne i wybuchowe właściwości dielektryka oraz potencjalnie szkodliwe działanie promieniowania elektromagnetycznego (rys. 2).



Rys. 2. Zdjęcie SEM generowanego aeroszolu podczas drążenia elektroerozyjnego [20]

Wśród przedstawionych negatywnych oddziaływań obróbki elektroerozyjnej największe znaczenie dla zdrowia obsługi i otoczenia drążarki mają występujące w wysokich temperaturach gazy i aerozole, których intensywność wydzielania zależy od rodzaju i odmiany drążenia, właściwości dielektryka oraz materiału elektrody i przedmiotu obrabianego a także stosowanych parametrów, w tym głównie natężenia prądu i czasu trwania pulsu drążenia [5, 6, 20]. Stwierdzono, że aerosol zawiera około 69% cząstek metalicznych i 12,2% węglowodorów z nimi związanych. Pozostała zawartość to pył węglowy i bliżej niezidentyfikowane

składniki. Natomiast ich wymiary mieszczą się w przedziale od 25-29 nm i w większości mają kształt sferyczny (rys. 3) [20].



Rys. 3. Potencjalne zagrożenia obróbki elektroerozyjnej

Badania wykazały, że koncentracja emisji lotnych produktów erozji w powietrzu, w zależności od warunków obróbki elektroerozyjnej, zawiera się w granicach od 60–155 mg/m³ przy dopuszczalnej zawartości nieprzekraczającej 20 mg/m³ [14]. Spełnienie tego warunku wymaga zastosowania środków technicznych ograniczających emisję gazów i aerozoli. Intensywność emisji lotnych w dużym stopniu zależy od sposobu i rodzaju obróbki elektroerozyjnej. Drążenie elektroerozyjne, szczególnie w zastosowaniu do obróbki zgrubnej, jest źródłem powstawania znacznie większej ilości gazów i aerozoli niż cięcie elektroerozyjne drutem.

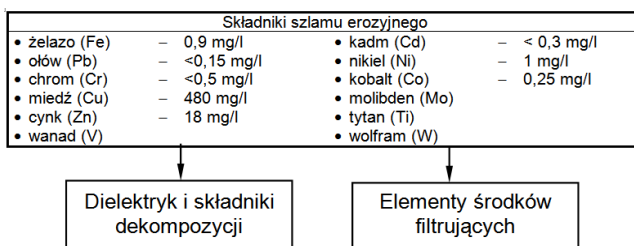
Szkodliwość ekologiczna ubocznych produktów procesu obróbki elektroerozyjnej zależy od rodzaju i zawartości szkodliwych dla zdrowia pierwiastków. Do najbardziej niebezpiecznych, niekiedy kancerogennych, które na skutek erozji uwalniane są do otoczenia w postaci lotnej, a następnie w wyniku schładzania tworzą bardzo drobne cząsteczki rzędu 20 do 50 nm, zaliczane są składniki materiału obrabianego takie jak: węgliki wolframu i tytanu, chrom, nikiel, molibden i bar [5, 6]. Poza rozmiarem, istotne znaczenie pod względem oddziaływania na środowisko ma ich liczba, kształt i powierzchnia. Stwierdzono, że 69% składu aerosolu stanowią cząsteczki metalu [20]. Jego zawartość poza składem chemicznym materiału obrabianego zależy ponadto od rodzaju materiału stosowanego na elektrody robocze. W drążeniu elektroerozyjnym są to najczęściej miedź lub grafit, rzadziej stal, brąz i mosiądz. Elektrody robocze dla elektroerozyjnego cięcia drutem wykonane są najczęściej z tych samych materiałów, co elektrody stosowane do drążenia. Materiały te nie wykazują szczególnie szkodliwego wpływu na zdrowie, natomiast, jako składniki szlamu erozyjnego stanowią obciążenia dla środowiska i wymagają właściwej utylizacji [21].

Istotny wpływ na efekty procesu drążenia elektroerozyjnego oraz wystąpienie potencjalnych zagrożeń dla zdrowia i środowiska naturalnego mają właściwości stosowanej cieczy dielektrycznej. W konwencjonalnym drążeniu elektroerozyjnym stosuje się dielektryki w postaci wysoko-rafinowanych frakcji oleju mineralnego, syntetycznych węglowodorów a także naftę. Stosowanie dielektryków na bazie olejów mineralnych lub organicznych w elektroerozyjnym drążeniu powoduje wydzielanie się takich szkodliwych produktów jak: wielopierścieniowe aromatyczne węglowodory, węglowodory alifatyczne, nieokreślone węglowodory alifatyczne, benzen, opary i aerozole olejów mineralnych oraz inne składniki dysocjacji oleju i jego dodatków. W przypadku stosowania syntetycznych dielektryków, typu syntetycznych węglowodorów powstające gazy i aerozole zawierają nieokreślone alifatyczne węglowodory oraz parę, natomiast w znacznie mniejszym stopniu występują alifatyczne węglowodory, aerozole i benzen [14]. Stosując roztwór glicery-

ny z wodą mogą wystąpić niewielkie ilości produktów dekompozycji gliceryny, takich jak akrolina, która w przypadku bezpośredniego kontaktu z oczami może powodować ich podrażnienie i łzawienie. Wymienione względy skłaniają wytwórców drążarek do zastępowania dielektryków węglowodorowych dielektrykami na bazie dejonizowanej wody, powszechnie stosowanej w elektroerozyjnym cięciu drutem.

W elektroerozyjnym cięciu drutem rolę dielektryka spełnia dejonizowana, za pomocą wysoko cząsteczkowych polimerów woda, której zadaniem jest usunięcie jonów magnezu i wapnia oraz jonów molibdenu, chromu, wanadu i innych metali ciężkich powstałych w procesie erozji. Niebezpieczne składniki występujące podczas cięcia drutem z zastosowaniem dejonizowanej wody to: jedno tlenek węgla, tlenek azotu i węgla, ozon i aerozole zawierające produkty erozji. Tym niemniej dejonizowana woda, w porównaniu z innymi dielektrykami uważana jest, jako ciecz o najmniejszej szkodliwości dla środowiska [21].

Wydzielające się w czasie drążenia dymy i opary w znacznym stopniu zależą od lepkości cieczy dielektryka. Ze zmniejszeniem lepkości maleje ilość wydzielanych dymów i oparów. Ważnym czynnikiem o podobnym oddziaływaniu jest poziom dielektryku nad powierzchnią erozji, którego wysokość powinna przekraczać 40 mm, co przyczynia się do kondensacji i absorbowania znacznej części wydzielających się gazów. Zalecana w tym względzie wysokość powinna wynosić 80 mm [6]. Istotnym źródłem szkodliwych dla środowiska produktów ubocznych procesu obróbki elektroerozyjnej jest zawartość gromadzącego się, w wyniku filtracji przez układ filtrujący obrabiarki, szlamu. Główne składniki to produkty wyerodowanego materiału obrabianego i elektrody a także dekompozycji dielektryka oraz produktów zużycia stosowanych filtrów (rys. 4). Ze względu na ich szkodliwość ekologiczną powinny być dokładnie monitorowane i dokumentowane [1, 5].



Rys. 4. Możliwe składniki szlamu erozyjnego [16]

Tym niemniej największe zagrożenie dla zdrowia obsługi drążarek stanowią powstające emisje gazowe i aerozole, których największa koncentracja występuje na powierzchni lustra dielektryka i maleje w miarę oddalania się od miejsca erozji. Wymusza to konieczność stosowania środków zaradczych w postaci filtrów lub urządzeń wyciągowych odprowadzających powstające emisje lotne z otoczenia obróbki [6]. Ich dobór wymaga znajomości składu chemicznego i zawartości ilościowej wydzielających się gazów i aerozoli.

Proekologiczne tendencje w obróbce elektroerozyjnej

Postęp w obróbce elektroerozyjnej mający na celu zmniejszenie negatywnego oddziaływania procesu na zdro-

wie obsługi obrabiarki i środowisko naturalne koncentruje się na:

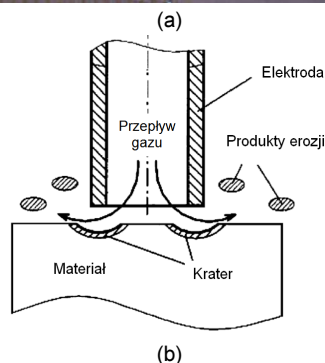
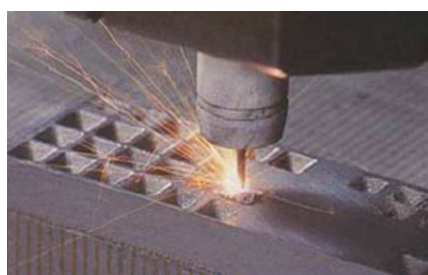
- zmniejszeniu szkodliwości stosowanych cieczy dielektryków - drążenie w wodzie, w środowisku gazowym,
- zredukowanie lub wyeliminowanie cieczy dielektryków - obróbka elektroerozyjna na sucho lub z minimalnym wydatkiem cieczy,
- zmniejszenie ilości gazów i aerozoli w powietrzu – optymalizacja warunków/parametrów drążenia, stosowanie osłon i wyciągów.

Jednym ze sposobów zmniejszających zagrożenia dla zdrowia i środowiska naturalnego jest stosowanie alternatywnych cieczy dielektryków w stosunku do dielektryków węglowodorowych, powszechnie używanych w obróbce elektroerozyjnej, których dekompozycja w procesie drążenia powoduje wydzielanie się szkodliwych substancji. Przyjaznym dla środowiska dielektrykiem, będącym przedmiotem badań, jest czysta lub destylowana woda względnie mieszanina wody z dodatkami. Badania porównawcze [1] drążenia w nafcie i w wodzie z kranu lub w wodzie destylowanej a także ich mieszaniny w stosunku 25/75% wykazały, że drążenie w wodzie umożliwia zwiększenie wydajności objętościowej obróbki i znaczne zredukowanie zużycia elektrody miedzianej. Dokładność wymiarowa obróbki w tych warunkach drążenia była mniejsza, natomiast gładkość obrobionej powierzchni większa. Doprowadzenie do szczeliny elektrodowej dodatkowo tlenu zwiększyło wydajność objętościową drążenia w środowisku wodnym [19]. Podobne efekty uzyskano doprowadzając do szczeliny elektrodowej azot w postaci gazowej pod ciśnieniem.

W celu ulepszenia właściwości wody, jako dielektryka, prowadzone są badania nad wpływem dodatków organicznych takich jak: glikol etylenowy, glikol polietylenowy, glukoza lub sacharoza. Dotychczasowe badania wykazały pozytywne oddziaływanie dodatków, szczególnie w odniesieniu do chropowatości obrobionej powierzchni. W porównaniu z dielektrykiem węglowodorowym korzystne efekty drążenia uzyskano również stosując wysoce skoncentrowany roztwór wodny gliceryny [1, 4]. Pomimo korzyści ekologicznych metody te nie znalazły dotąd szerszego zastosowania w przemyśle i są przedmiotem licznych, w tym zakresie, badań.

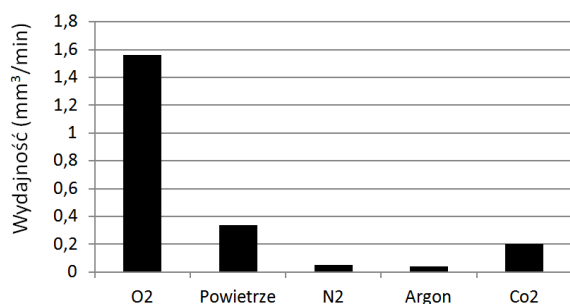
Z szerokim zainteresowaniem spotkało się drążenie na sucho, w którym powszechnie stosowane cieczy węglowodorowe zastąpione zostały medium gazowym. Elektroda w tym sposobie drążenia posiada kształt rury, przez którą do strefy drążenia doprowadzany jest gaz pod wysokim ciśnieniem. Głównym przeznaczeniem gazu jest usuwanie drobin materiału obrabianego z elektrody oraz chłodzenie w obszarze szczeliny elektrodowej (rys. 5).

Badania porównawcze [1] drążenia w oleju i na sucho węglików spiekanych wykazały, że wyeliminowanie cieczy wpływa na wydłużenie czasu drążenia i pogorszenie chropowatości powierzchni na skutek przywarcia produktów drążenia do elektrody. Uwzględniając jednak konieczność wytworzenia elektrody dla drążenia konwencjonalnego,



Rys. 5. Drażenie na sucho (a) oraz schemat drażenia z udziałem gazu (b) [13]

wydłużenie czasu drażenia podczas drażenia na sucho stanowi alternatywę, biorąc pod uwagę rosnące wymagania ekologiczne produkcji [1]. Korzystną cechą drażenia na sucho jest istotne zmniejszenie zużycia elektrody. Zwiększenie wydajności drażenia, dzięki zwiększeniu objętości wytwarzanych kraterów i częstotliwości wyładowań elektrycznych, umożliwia doprowadzenie tlenu do szczeliny elektrodowej [15, 18]. Natomiast zastosowanie sterowania numerycznego do sterowania ruchem elektrody pozwala na dokładne sterowanie przepływem powietrza w szczeliny elektrodowej a tym samym zwiększenie wydajności drażenia dzięki zwiększonej koncentracji tlenu. Zapewnienie stabilności procesu drażenia na sucho i warunków generowania iskry wymaga utrzymywania określonego ciśnienia gazu w szczeliny elektrodowej. W celu zwiększenia wydajności procesu drażenia, poza tlenem, prowadzono badania z zastosowaniem takich gazów jak: azot, dwutlenek węgla i argon (rys. 6).



Rys. 6. Wydajność objętościowa drażenia w stali węglowej z zastosowaniem różnych gazów [15]

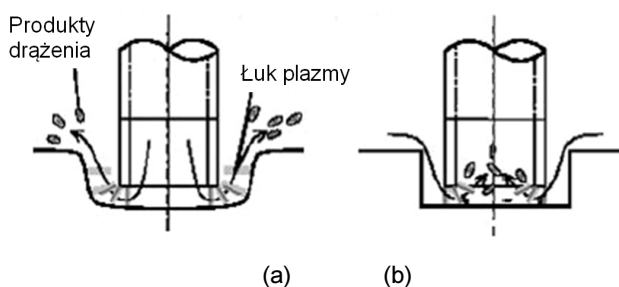
Według [1] cechy drażenia nasucho są następujące:

- zużycie elektrody jest minimalne/pomijalne bez względu na czas trwania impulsu,
- występuje mniejsza szczelina między elektrodą a materiałem obrabianym,
- siły w trakcie realizacji procesu są mniejsze niż w konwencjonalnym drażeniu,
- w zależności od zastosowania istnieje możliwość dostosowania rodzaju i parametrów dopływu gazu,

- naprężenia własne w warstwie wierzchniej są małe ze względu na niewielką warstwę stopionego materiału,
- grubość białej warstwy ulega zmniejszeniu łącznie z głębokością występowania oddziaływań cieplnych,
- szczelina między elektrodą a materiałem obrabianym jest mniejsza niż w klasycznym drażeniu,
- proces drażenia nasucho może być prowadzony zarówno w próżni jak i z przepływem gazu,
- konstrukcja drążarki może być uproszczona, ponieważ wanna i zbiornik oraz układ zasilania dielektryka są zbędne.

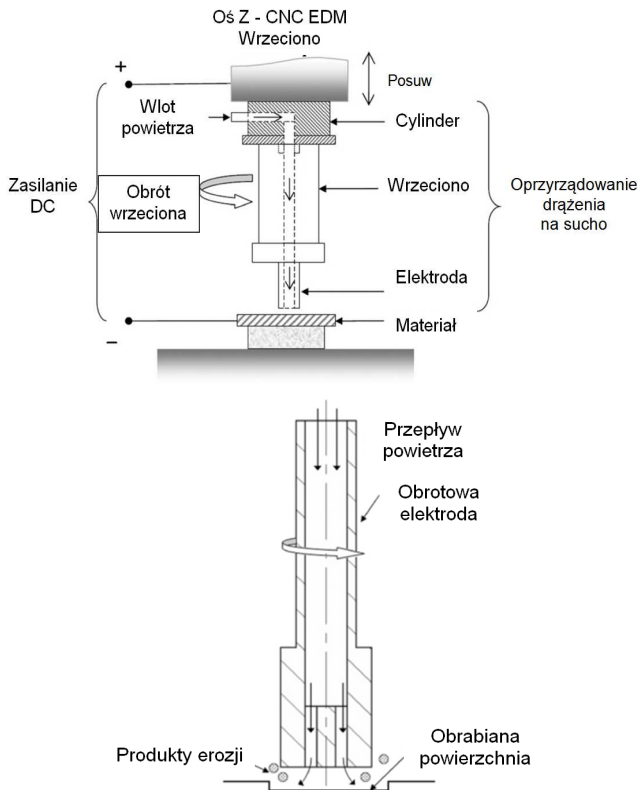
Prowadzone badania drażenia nasucho, zmniejszającego obciążenie środowiska i zagrożenia dla zdrowia, zmierzają do zwiększenia wydajności objętościowej procesu, porównywalnej do drażenia konwencjonalnego, oraz opracowania warunków drażenia zapewniających wymagane właściwości obrabianej powierzchni. Modyfikacją drażenia nasucho z zastosowaniem gazu, opracowaną w celu zwiększenia wydajności drażenia, jest drażenie z wibracjami o wysokiej częstotliwości (ultrasonic vibration electrical discharge dry UEDM) [1, 17, 23]. Zastosowanie tej metody, łącznie ze zwiększeniem napięcia, czasu impulsu, amplitudy drgań, jak wykazały badania [17] przyczynia się do istotnego zwiększenia wydajności procesu. Przy czym zastosowanie tlenu umożliwia dwukrotne zwiększenie wydajności w porównaniu do powietrza przy zachowaniu tej samej chropowatości powierzchni, jednak w porównaniu do drażenia konwencjonalnego wydajność drażenia jest mniejsza. Drażenie (UEDM) z częstotliwością 17 do 25 kHz, nasucho z udziałem powietrza lub tlenu znalazło zastosowanie w drażeniu małych i głębokich otworów w twardych materiałach [1].

Odmianą drażenia nasucho z udziałem gazu zaproponowaną w badaniach [13] jest sposób, w którym gaz zamiast być tłoczony do szczeliny elektrodowej jest z niej zasysany (rys. 7). W ten sposób uzyskano zmniejszenie chropowatości powierzchni, jednak z upływem czasu drażenia przepływ gazu przez otwór lub otwory wykonane w elektrodzie był blokowany przez produkty procesu drażenia.



Rys. 7. Schemat drażenia z udziałem gazu: tłoczonym (a) i zasysanym (b) [13]

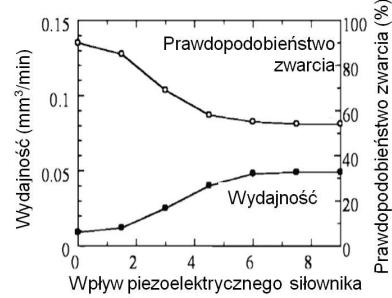
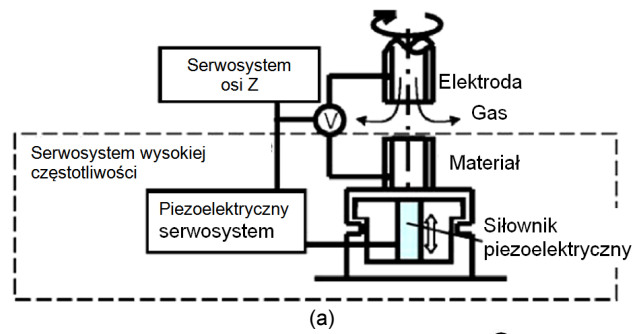
Stwierdzono [19], że wprowadzenie rurowej elektrody w ruch obrotowy względnie planetarny zwiększa stabilność procesu, zmniejsza powstawanie łuku między elektrodą i materiałem obrabianym oraz ułatwia odprowadzenie produktów drażenia (rys. 8).



Rys. 8. Schemat drążenia na sucho z przepływem gazu i obracającą elektrodą [19]

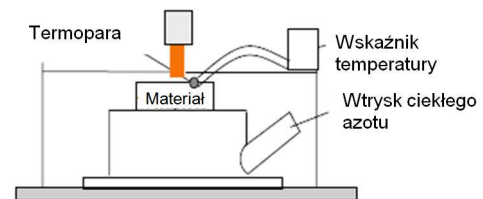
Rozwiązaniem mającym na celu stabilizowanie procesu drążenia na sucho, przede wszystkim likwidacji zwarć zmniejszających wydajność procesu, jest zastosowanie wysokoczęstotliwościowego piezoelektrycznego sterowania szczeliną [12, 17, 23, 27]. W rozwiązaniu przedstawionym na rys. 9 przedmiot obrabiany zamocowany został na piezoelektrycznym siłowniku działającym z częstotliwością 500 Hz w kierunku osi Z. Stabilizacja szczeliny międzyelektrodowej spowodowała znaczny wzrost wydajności drążenia na sucho. Przeprowadzone doświadczenia wykazały, że wzrost napięcia, czasu trwania impulsu, amplitudy drgań ultradźwiękowych oraz zmniejszenie grubości ścianki elektrody rurowej umożliwia zwiększenie wydajności drążenia na sucho.

Kolejnym sposobem umożliwiającym zredukowanie wad drążenia na sucho wspomaganego gazem jest zastosowanie w obszarze działania elektrody pulsującego pola magnetycznego umożliwiającego według autorów pracy [8] wzrost wydajności o około 130% i wyeliminowanie zużycia elektrody. Wytworzone pole magnetyczne, na skutek zwiększonej jonizacji, wzmacnia przepływ energii cieplnej do drążonego materiału, co powoduje wzrost wydajności, dokładności kształtu oraz chropowatości powierzchni po drążeniu na sucho.

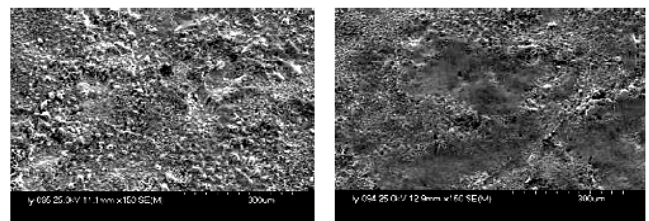


Rys. 9. Serwosystem wysokiej częstotliwości w osi Z z siłownikiem piezoelektrycznym (a), objętościowa wydajność drążenia (b) [12]

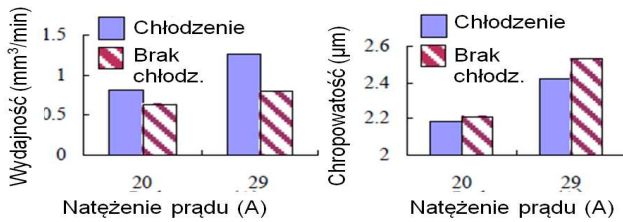
Odmianą drążenia na sucho zmierzającą do wyeliminowania cieczy dielektryka jest również drążenie z kriogenicznie (ciełym azotem) schłodzonym materiałem obrabianym i/lub elektrodą (rys. 10). Zastosowanie tego sposobu do drążenia stopu tytanowego Ti-6Al-4V0 spowodowało zmniejszenie zużycia elektrody o około 27% w porównaniu do konwencjonalnego drążenia, przy jednoczesnym zmniejszeniu chropowatości powierzchni i zwiększeniu wydajności drążenia (rys. 11, 12). Istotny wpływ na wartość tych parametrów ma biegunowość elektrody i materiału obrabianego [15].



Rys. 10. Schemat kriogenicznego chłodzenia drążonego przedmiotu [15]

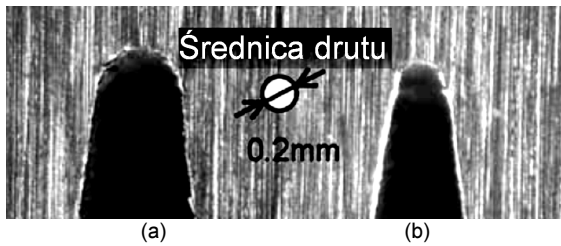


Rys. 11. Topografia powierzchni po drążeniu konwencjonalnym (a) i kriogenicznym (b) [15]

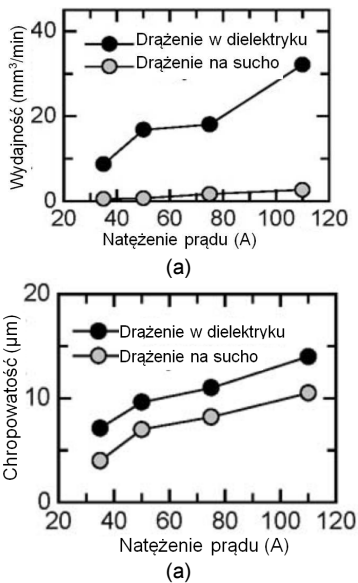


Rys. 12. Wydajność i chropowatość powierzchni po drążeniu schłodzonym kriogenicznie i nieschłodzonym materiałem obrabianym [15]

Wyeliminowanie cieczy dielektrycznej z procesu cięcia elektroerozyjnego struną przyczyniło się do zwiększenia dokładności cięcia i zmniejszenia chropowatości obrabianej powierzchni [1, 11, 14, 22]. W procesie cięcia na sucho (dry WEDM) siły działające na strunę oraz drgania elektrody strunowej są mniejsze niż podczas cięcia z udziałem dielektryku (wody), co wpływa na zmniejszenie szerokości i zwiększenia prostoliniowości szczeliny, a tym samym przyczynia się do zwiększenia jakości cięcia, istotnej szczególnie w wytwarzaniu precyzyjnych form i matryc (rys. 13). Tym niemniej, podobnie jak w przypadku drążenia na sucho, ubytek materiału jest mniejszy w porównaniu do konwencjonalnego cięcia struną. Skierowanie strumienia powietrza pod wysokim ciśnieniem, zamiast strugi dielektryka, umożliwia zwiększenie gładkości powierzchni i wydajności obróbki (rys. 14), która rośnie ze wzrostem ciśnienia powietrza, prędkości przewijania/ruchu struny i głębokości cięcia [11].



Rys. 13. Szczelina po cięciu z dielektrykiem (a) i na sucho (b) [11]



Rys. 14. Wydajność (a) i chropowatość powierzchni (b) po cięciu konwencjonalnym i na sucho [11]

W celu zniwelowania wad procesu drążenia na sucho, głównie zmniejszonej wydajności procesu i jakości powierzchni, prowadzone są badania drążenia z minimalnym udziałem medium w postaci mieszanki cieczy dielektryka

z powietrzem w zastosowaniu zarówno do drążenia wgłębnego i cięcia drutem (rys. 15). W porównaniu do konwencjonalnego drążenia stosownie w minimalnej ilości mieszanki dielektryka z gazem przyczynia się do zwiększenia wydajności obróbki przy małej energii wyładowań i zmniejszenia szczeliny międzylektrodowej. Jednak powoduje wzrost obciążenia cieplnego elektrody, które w przypadku drążenia struną może być przyczyną zerwania elektrody strunowej [9].



Rys. 15. Cięcie struną z minimalnym wydatkiem mieszanki wody z powietrzem [13]

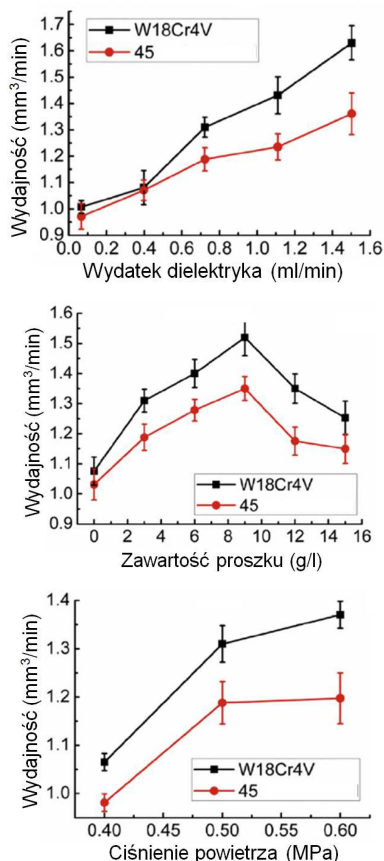
Badania porównawcze wiercenia elektroerozyjnego potwierdziły korzystny wpływ mieszanki wody i powietrza na jakość krawędzi otworu i obrabianej powierzchni. Doprowadzenie dielektryka w minimalnej ilości (5-35 ml/min) zlikwidowało osadzanie się cząstek materiału obrabianego na obrabianej powierzchni oraz zmniejszyło ilość generowanego i przedostającego się do otoczenia aerozolu (rys. 16) [9].

	Z dielektrykiem	Na sucho	Z minimalną ilością dielektryka
Widok z góry			
Widok przekroju			
Czas wiercenia	11	428	13
	a	b	c

Rys. 16. Zdjęcia drążonego otworu na mokro, sucho i z minimalną ilością dielektryka [9]

Odmianą drążenia z minimalnym dopływem dielektryka umożliwiającą zwiększenie stabilności procesu, wydajności i gładkości powierzchni po drążeniu na sucho jest drążenie z zastosowaniem medium w postaci mieszanki cieczy dielektryka, gazu i nanoproszków (powder mixed near dry electrical discharge machining PMND-EDM) [2, 10, 24]. W dotychczas przeprowadzonych badaniach stosowano sproszkowany grafit, aluminium, krzem, węgiel krzemowy i siarczek molibdenu o wielkości ziarna od 70-80 nm. Dodanie do mieszanki dielektryka z powietrzem sproszkowanego aluminium i dwusiarczku molibdenu umożliwiło uzyskanie wysokiej gładkości powierzchni [1]. Badania [2] drążenia otworów z obracającą się elektrodą z dopływem mieszanki dielektryka z powietrzem i sproszkowanym krzemem w ilości 0,07-1,5 ml/min potwierdziły korzystne oddziaływanie stosowanego medium na wydajność drążenia. Przy czym istotne znaczenie ma rodzaj materiału obrabianego i elek-

trody a także natężenie, ciśnienie przepływu oraz zawartość proszku w mieszaninie (rys. 17).



Rys. 17. Wpływ parametrów strumienia dielektryka na wydajność drążenia [9]

W celu ograniczenia szkodliwego oddziaływania produktów drążenia na zdrowie i środowisko naturalne, stosowane są różnego rodzaju systemy wentylacyjne i filtrujące, mające na celu ograniczenie lub wyeliminowanie przedostawania się lotnych i stałych produktów drążenia do otoczenia. Największą efektywność odprowadzenia emisji z obszaru drążenia wykazują zamknięte systemy wentylacyjne. Ich wadą jest zwiększone niebezpieczeństwo wybuchu dielektryka, którego właściwości zapłonu powinny być uwzględnione w procesie konstruowania systemu. Zalecana temperatura zapłonu elektrolitu powinna być wyższa niż 100°C, a nie niższa niż 65°C [21]. Wadą otwartych i półotwartych systemów wentylacyjnych jest ich mniejsza efektywność w stosunku do systemów zamkniętych. Istotną rolę w systemach wentylacyjnych spełniają urządzenia filtrujące mające za zadanie wytrącenie zawierających się w aerozolu mikroskopijnych części stałych. Rodzaj stosowanych filtrów zależy od intensywności gromadzenia się zanieczyszczeń oraz sposobu obróbki elektroerozyjnej. Do uzdatniania dielektryków na bazie wodnej stosowane są filtry kwarcowe uzupełnione, w celu zwiększenia dokładności filtracji, filtrami papierowymi o porowatości 1 μm oraz filtry membranowe o konstrukcji rurowej lub spiralnej i porowatości 0,45 μm [3].

Podsumowanie

Zainteresowanie procesami wytwarzania, z punktu widzenia ich szkodliwości dla środowiska naturalnego, znajduje odzwierciedlenie w coraz liczniejszych badaniach ich potencjalnych negatywnych oddziaływań, a ich wyniki stanowią podstawę do opracowania regulacji prawnych i przepisów dotyczących ochrony warunków pracy i środowiska. Ze względu na rosnący udział procesów drążenia elektro-

erozyjnego oraz związane z nim zagrożenia dla obsługi drążarki i otoczenia, podejmowane są działania zmierzające do zmniejszenia szkodliwości obecnie stosowanych w przemyśle maszynowym technologii drążenia jak również opracowywane są sposoby ograniczenia czynników procesu drążenia o największym znaczeniu ekologicznym. Badania ukierunkowane są na wyeliminowanie dielektryków węglowodorowych (drążenie na sucho) lub zmniejszenie ich szkodliwości poprzez zastąpienie płynami przyjaznymi dla środowiska (woda, gaz) a także ograniczenie ilości cieczy dostarczanej do strefy drążenia (drążenie z minimalną ilością dielektryka). W celu zwiększenia wydajności tych procesów oraz poprawy jakości obrabianej powierzchni stosowane są rozwiązania hybrydowe z udziałem dodatkowego czynnika w postaci drgań o wysokiej częstotliwości, pola magnetycznego lub proszku o bardzo drobnym ziarnie.

Literatura

1. Abbas N.M., Solomon D.G., Bahari M.F., A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, 1214–1228, 2007.
2. Baib X., Zhang Q., Zhang J., Kong D., Yang T., Machining efficiency of powder mixed near dry electrical discharge machining based on different material combinations of tool electrode and workpiece electrode. *Journal of Manufacturing Processes*, 15, 474–482, 2013.
3. Dauw D.F., Albert L., About the evolution of wire tool performance in wire EDM. *Annals of CIRP*, 41/1, 221–225 1992.
4. Diane D., Quality water for wire EDM. *SME Technical Paper (Series)*, MR94-249, 1-8, 1994.
5. Evertz S., Dott W., Eisentraeger A., Electrical discharge machining: Occupational hygienic characterization using emission-based monitoring. *Int. J. Hyg. Environ.-Health*, 209, 423–434, 2006.
6. Frei C., Hirt C., A new approach for contamination measurements for EDM dielectrics. *Annals of CIRP*, 36/1, 111–113, 1987.
7. J.Tao, A.J. Shih, J. Ni, Experimental study of the dry and near-dry electrical discharge milling processes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 130/1, DOI: 10.1115/1.2784276, 2008.
8. Joshi S., Govindan P., Malshe A., Rajurkar K., Experimental characterization of dry EDM performed in a pulsating magnetic field. *Annals of CIRP*, 60/1, 239–242, 2011.
9. Kao C.C., Tao J., Shih A.J., Near dry electrical discharge machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, 2273–2281, 2007.
10. Kozak J., Rozenek M., Dabrowski L., Study of electrical discharge machining using powder-suspended working media, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 217, 1597–1602, 2003.
11. Kunieda M., Furudate Ch., High Precision Finish Cutting by Dry WEDM. *Annals of CIRP*, 50/1, 121–124, 2001.
12. Kunieda M., Takaya T., Nakano S., Improvement of Dry EDM Characteristics Using Piezoelectric Actuator. *Annals of CIRP*, 53/1, 183–186, 2004.
13. Kunieda M., Miyoshi Y., Takaya T., Nakajima N., ZhanBo Y., Yoshida M., High Speed 3D Milling by Dry EDM. *Annals of CIRP*, 52/1, 147–150, 2003.
14. Levy G.N., Environmentally friendly and high - capacity dielectric regeneration for wire EDM. *Annals of CIRP*, 42/1, 227–230, 1993.
15. Liqing L., Yingjie S., Study of dry EDM with oxygen-mixed and cryogenic cooling approaches. *The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM)*, *Procedia CIRP*, 6, 344 – 350, 2013.
16. Oczko K.E., Obróbka użytkowa ceramiki technicznej. *Mechanik*, 4, 5-6, 1994.
17. Q.H. Zhang, J.H. Zhang, S.F. Ren, J.X. Deng, X.Ai, Study on technology of ultrasonic vibration aided electrical discharge machining in gas, in: *14th International Symposium on Electromachining (ISEM XIV)*, *Journal of Materials Processing Technology*, 149(1–3), 640–644, 2004.
18. Roth R., Kuster F., Wegener K., Influence of oxidizing gas on the stability of dry electrical discharge machining process. *The Seven-*

- teenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM), Procedia CIRP, 6, 338 – 343, 2013.
19. Saha S. K., Choudhury S.K., Experimental investigation and empirical modeling of the dry electric discharge machining process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49, 297–308, 2009.
 20. Sivapirakasama S.P., Mathew J, Surianarayanan M., Constituent analysis of aerosol generated from die sinking electrical discharge machining process. *Process Safety and Environmental Protection*, 8, 9, 141–150, 2011.
 21. Tonshoff H.K., Egger R., Klocke F., Environmental and safety aspects of electrophysical and electrochemical processes. *Annals of CIRP*, 45/2, 553–568, 1996.
 22. Wang T., Chen Y., Kunieda M., Study on wire-cut electrical discharge machining in gas. *Journal of Mechanical Engineering*, 39, 76–80, 2003.
 23. Xu M.G., Zhang J.H., Li Y., Zhang Q.H., Material removal mechanisms of cemented carbides machined by ultrasonic vibration assisted EDM in gas medium. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 1742–1746, 2009.
 24. Ming Y.Q., He L. Y., Powder-suspension dielectric fluid for EDM. *Journal of Materials Processing Technology*, 52, 44–54, 1995.
 25. Yu Z.B., Jun T., Masanori K., Dry electrical discharge machining of cemented carbide. *Journal of Materials Processing Technology*, 149, 353–357, 2004.
 26. Zhanbo Y., Takahashi J., Nakajima N., Sano S., Karato K., Kunieda M., Feasibility of 3-D surface machining by dry EDM. *International Journal of Electrical Machining*, 10, 15–20, 2005.
 27. Zhang Q.H., Du R., Zhang J.H., Zhang Q.B., An investigation of ultrasonic-assisted electrical discharge machining in gas. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 1582–1588, 2006.