

Środowiskowe aspekty obróbki elektroerozyjnej

TADEUSZ LEPPERT*

Obróbka elektroerozyjna (*Electro-Discharge Machining – EDM*) jest jednym z najbardziej rozpowszechnionych sposobów niekonwencjonalnego kształtowania przedmiotów, stosowanym do obróbki powierzchni o złożonych kształtach, zwłaszcza materiałów o dużej twardości i trudno skrawalnych. Z tego powodu zrozumiałe jest dążenie do zwiększania efektywności tej obróbki. Z drugiej strony, rosnące zainteresowanie wpływem ogółu procesów produkcyjnych na środowisko naturalne i zdrowie pracowników, spowodowało zintensyfikowanie badań zmierzających do opracowania nowych lub zmodyfikowanych sposobów obróbki EDM zmniejszających lub eliminujących ich negatywne oddziaływania środowiskowe.

W artykule przedstawiono analizę czynników procesu drążenia elektroerozyjnego będących źródłem zagrożeń środowiskowych. Scharakteryzowano także podejmowane próby ich ograniczenia z zastosowaniem innowacyjnych rozwiązań technologicznych obróbki elektroerozyjnej.

Wstęp

Obróbka elektroerozyjna (*Electro-Discharge Machining – EDM*) jest jednym z najbardziej rozpowszechnionych sposobów obróbki, spośród niekonwencjonalnych metod kształtowania przedmiotów. Wykorzystywana jest do obróbki powierzchni o złożonych kształtach, w tym szczególnie do produkcji form i matryc w przetwórstwie tworzyw sztucznych, a także w 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. Materiały obrabiane tą metodą powinny charak-

teryzować się dobrą przewodnością elektryczną, warunkującą przebieg procesów elektrotermicznych zachodzących podczas impulsowych wyładowań elektrycznych pomiędzy elektrodą roboczą (narzędziem) a przedmiotem obrabianym, oddzieloną warstwą dielektryka.

W praktyce najczęściej wykorzystywane są dwie odmiany obróbki elektroerozyjnej różniące się głównie kształtem narzędzia i jego kinematyką: drążenie 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 przy-

czyniły się przede wszystkim postępy w rozwoju generatorów impulsów, materiałów stosowanych na elektrody i układów konstrukcyjnych obrabiarek, co wpłynęło na poprawę wydajności procesu i dokładności wymiarowo-kształtowej obrabianych powierzchni oraz zmniejszenie zużycia narzędzia. Rozwój i towarzyszące temu upowszechnienie układów sterowania komputerowego spowodował zwiększenie zdolności ruchowych narzędzia względem przedmiotu obrabianego, pozwalając na optymalizację procesu kształtowania powierzchni i erozji [1, 3, 11, 16, 24, 25].

EKOLOGICZNE ZAGROŻENIA POWODOWANE OBRÓBKĄ ELEKTROEROZYJNĄ

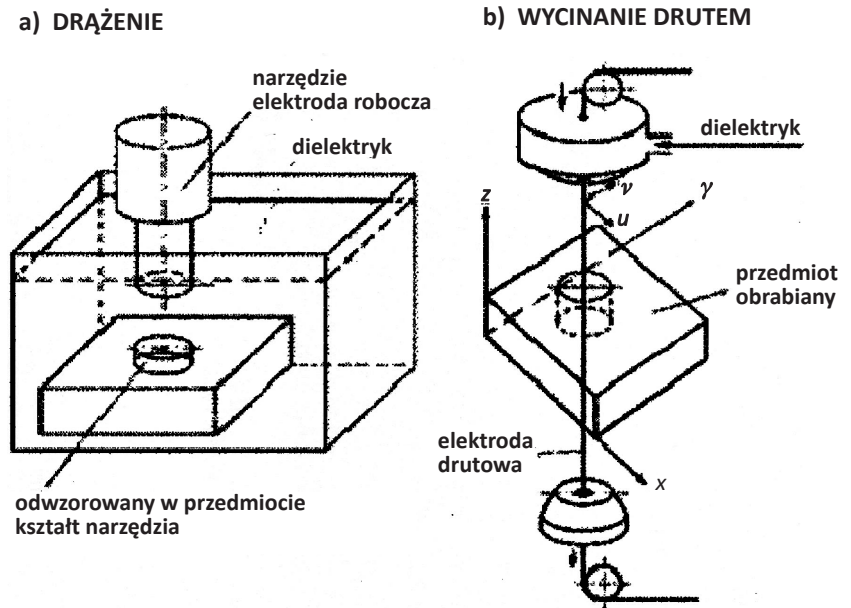
Obróbka elektroerozyjna, pomimo wielu różnorodnych zalet w kształtowaniu złożonych powierzchni elementów wykonanych z materiałów twardych lub utwardzonych, generuje szereg potencjalnych zagrożeń, zarówno dla obsługi i bezpośredniego otoczenia stanowiska pracy, jak również dla środowiska na-

* Dr hab. inż. Tadeusz Leppert, prof. PBS Politechnika Bydgoska Wydział Inżynierii Mechanicznej, ul. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz.

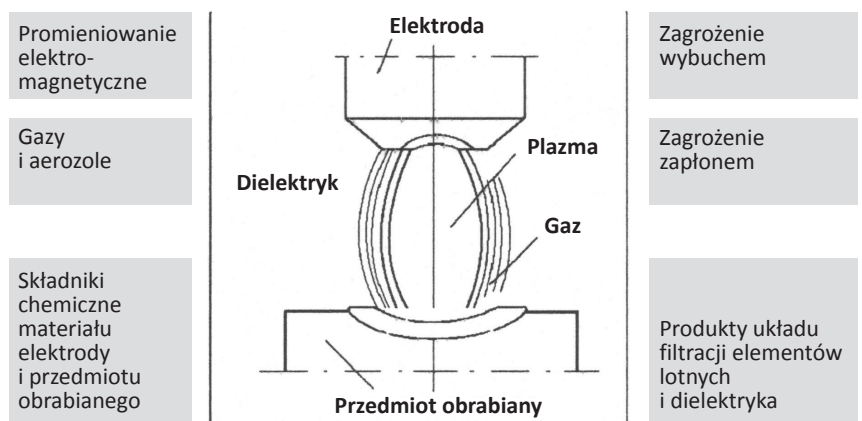
turalnego. Zagrożenia te wynikają z charakteru zachodzących w niej zjawisk elektrotermicznych, wywołanych wyładowaniami elektrycznymi. Zależą one od rodzaju i składu chemicznego materiału narzędzia i obrabianego przedmiotu oraz stosowanego dielektryka. Powstające w wyniku realizacji procesu obróbki erozyjnej produkty uboczne są w dużej części 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 dielektryka oraz poerozyjny szlam, w skład których mogą wchodzić metale ciężkie i inne niebezpieczne dla obsługi i środowiska produkty erozji. Dodatkowym źródłem zagrożenia są łatwopalne i wybuchowe właściwości dielektryka oraz potencjalnie szkodliwe działanie promieniowania elektromagnetycznego – rys. 2.

Wśród wymienionych negatywnych oddziaływań obróbki elektroerozyjnej największe znaczenie dla zdrowia obsługi i otoczenia drążarki mają generowane 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 impulsu drążenia [5, 6, 19]. 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 25÷29 nm i w większości mają kształt sferyczny – rys. 3 [19].

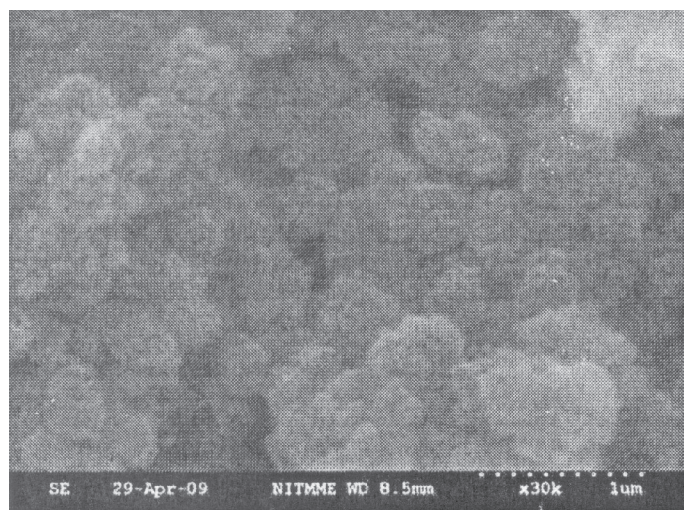
Badania wykazały, że koncentracja emisji lotnych produktów erozji w powietrzu, w zależności od warunków obróbki elektroerozyjnej, zawiera się w granicach 60÷155 mg/m³ przy dopuszczalnej zawartości nieprzekraczającej 20 mg/m³ [14]. Spełnienie tego warunku wymaga zastosowania środków technicznych ograniczających 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.



Rys. 1. Odmiany obróbki EDM: a) drążenie wgłębne, b) wycinanie elektrodą drutową



Rys. 2. Potencjalne zagrożenia występujące podczas obróbki elektroerozyjnej



Rys. 3. Zdjęcie SEM generowanego aerosolu podczas drążenia elektroerozyjnego [19]

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 formie 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 ilość, kształt i powierzchnia. Stwierdzono, że 69% składu aerosolu stanowią cząsteczki metalu [19]. Jego zawartość, poza składem chemicznym obrabianego materiału, zależy ponadto od rodzaju materiału stosowanego na elektrody robocze. W drążeniu elektroerozyjnym są to najczęściej miedź lub grafit, rzadziej stal, brąz lub mosiądz. Elektrody robocze dla elektroerozyjnego cięcia drutem wykonane są najczęściej z tych samych materiałów, co elektrody stosowane do drążenia (stal). 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 formie wysokorafinowanych frakcji oleju mineralnego, syntetycznych węglowodorów a także naftę. Stosowanie w drążeniu elektroerozyjnym dielektryków na bazie olejów mineralnych lub organicznych powoduje wydzielanie się takich szkodliwych produktów jak: wielopierścieniowe aromatyczne węglowodory, różnego rodzaju 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 wodną. W znacznym mniejszym stopniu występują natomiast alifatyczne węglowodory, aerozole i benzen [13]. Stosując roztwór gliceryny z wodą mogą wystąpić niewielkie ilości produktów

dekompozycji gliceryny, takich jak akroleina, 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 obecnie w elektroerozyjnym cięciu drutem.

W elektroerozyjnym cięciu drutem rolę dielektryka spełnia woda, dejonizowana za pomocą wielkocząsteczkowych polimerów, 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: tlenek węgla, tlenki 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 dielektryka. Ze zmniejszeniem lepkości maleje ilość wydzielanych dymów i oparów. Ważnym czynnikiem o podobnym oddziaływaniu jest poziom dielektryka nad powierzchnią erozji, którego wysokość powinna przekraczać 40 mm. Przyczynia się to 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 szlamu gromadzącego się w wyniku separacji w układzie filtrującym obrabiarki. Główne jego składniki to produkty wyerodowanego obrabianego materiału i elektrody, dekompozycji dielektryka, a także produktów zużycia stosowanych filtrów – rys. 4. Ze względu na ich szkodliwość ekologiczną, czynniki te powinny być dokładnie monitorowane i dokumentowane [1, 5].

Ocenia się, że 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 for-

mie filtrów lub urządzeń wyciągowych odprowadzających powstające emisje lotne z otoczenia obróbki [6], przy czym prawidłowy 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 zdrowie obsługi obrabiarki i środowisko naturalne, koncentruje się przede wszystkim na:

- zmniejszeniu szkodliwości stosowanych cieczy dielektryków – drążenie w wodzie, w środowisku gazowym,
- zredukowaniu lub wyeliminowaniu cieczy dielektryków – obróbka elektroerozyjna na sucho lub z minimalnym wydatkiem cieczy,
- zmniejszeniu ilości gazów i aerozoli w powietrzu – optymalizacja warunków i 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 drążenia w nafcie i w wodzie z kranu lub w wodzie destylowanej a także ich mieszaniny w stosunku 25/75% [1] 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 obrabianej powierzchni – większa. Doprowadzenie do szczeliny elektrodowej dodatkowo tlenu zwiększyło wydajność objętościową drążenia w środowisku wodnym [18]. Podobne efekty uzyskano doprowadzając pod ciśnieniem do szczeliny elektrodowej azot w formie gazowej.



SKŁADNIKI SZLAMU EROZYJNEGO					
żelazo Fe	—	0,50 mg/dm ³	kadm Cd	—	0,3 mg/dm ³
ołów Pb	—	< 0,15 mg/dm ³	nikiel Ni	—	1,0 mg/dm ³
chrom Cr	—	< 0,50 mg/dm ³	kobalt Co	—	0,25 mg/dm ³
miedź Cu	—	480 mg/dm ³	molibden Mo		
cynk Zn	—	18 mg/dm ³	tytan Ti		
wanad V			wolfram W		

Dielektryki i składniki dekompozycji

Elementy środków filtrujących

Rys. 4. Możliwe składniki szlamu erozyjnego wg [16]

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 obrabianej powierzchni. W porównaniu z dielektrykiem węglowodorowym korzystne efekty drążenia uzyskano również stosując mocno skoncentrowany roztwór wodny gliceryny [1, 4]. Pomimo korzyści ekologicznych metody te nie znalazły dotąd szerszego zastosowania w przemyśle, lecz są przedmiotem licznych, w tym zakresie, badań.

Z szerokim zainteresowaniem spotkało się natomiast drążenie na sucho, w któ-

rym powszechnie stosowane ciecze 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 zadaniem gazu jest usuwanie drobin materiału obrabianego z elektrody oraz chłodzenie w obszarze szczeliny elektrodowej – rys. 5.

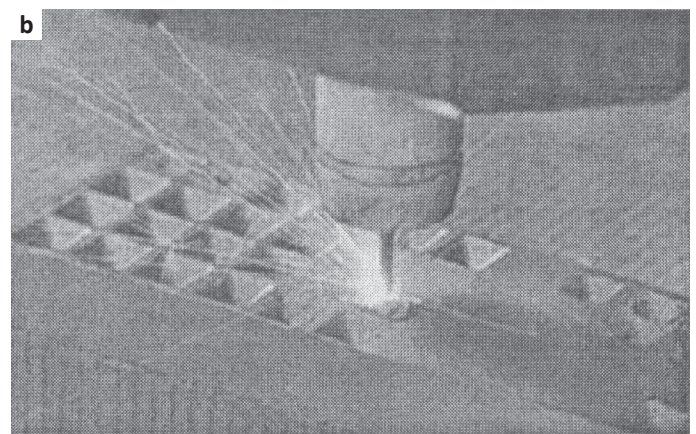
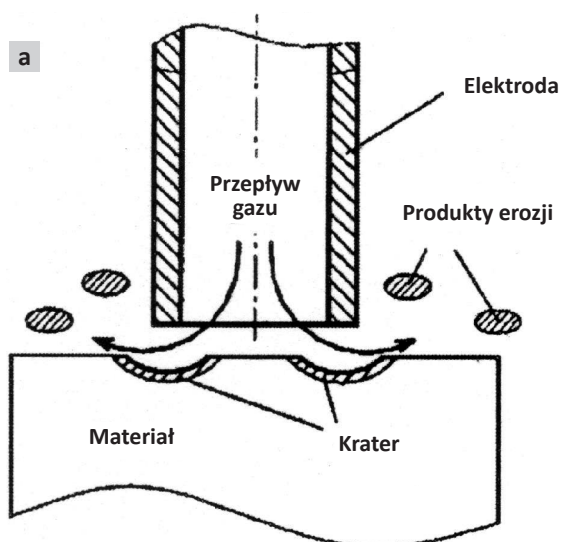
Badania porównawcze drążenia w oleju i na sucho węglików spiekanych wykazały, że wyeliminowanie cieczy wpływa na wydłużenie czasu drążenia i pogorszenie chropowatości powierzchni na skutek przywarcia produktów drążenia do elektrody. Uwzględniając jednak konieczność wytworzenia elektrody dla drążenia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

nego oraz wydłużenie czasu drążenia podczas drążenia na sucho sposób ten stanowi alternatywę, biorąc pod uwagę rosnące wymagania ekologiczne produkcji [1].

Korzystną cechą drążenia na sucho jest istotne zmniejszenie zużycia elektrody. Zwiększenie objętości wytwarzanych kraterów i częstotliwości wyładowań elektrycznych powoduje poprawę wydajności drążenia, dzięki możliwości doprowadzenia tlenu do szczeliny elektrodowej [14, 17]. Zastosowanie sterowania numerycznego do sterowania ruchem elektrody pozwala natomiast na dokładne sterowanie przepływem powietrza w szczeliny elektrodowej a tym samym zwiększenie wydajności drążenia dzięki wspomnianej zwiększonej koncentracji tlenu. Zapewnienie stabilności procesu drążenia na sucho i warunków generowania iskry wymaga utrzymywania określonego ciśnienia gazu w szczeliny elektrodowej. W celu zwiększenia wydajności procesu drążenia, poza tlenem, prowadzono badania z zastosowaniem takich gazów jak: azot, dwutlenek węgla i argon – rys. 6.

Cechy charakterystyczne drążenia na sucho są następujące [1]:

- zużycie elektrody jest minimalne/pomijalne bez względu na czas impulsu,
- występuje mniejsza szczelina między elektrodą a materiałem obrabianym,
- siły w trakcie realizacji procesu są mniejsze niż w konwencjonalnym drążeniu,



Rys. 5. Drążenie na sucho (a) oraz schemat drążenia z udziałem gazu (b) [11]

– w zależności od zastosowania istnieje możliwość dostosowania rodzaju i parametrów dopływu gazu,

– naprężenia własne w warstwie wierzchniej są małe ze względu na niewielką warstwę topionego materiału,

– grubość białej warstwy ulega zmniejszeniu łącznie z głębokością występowania oddziaływań cieplnych,

– szczelina między elektrodą a materiałem obrabianym jest mniejsza niż w klasycznym drążeniu,

– proces drążenia na sucho 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.

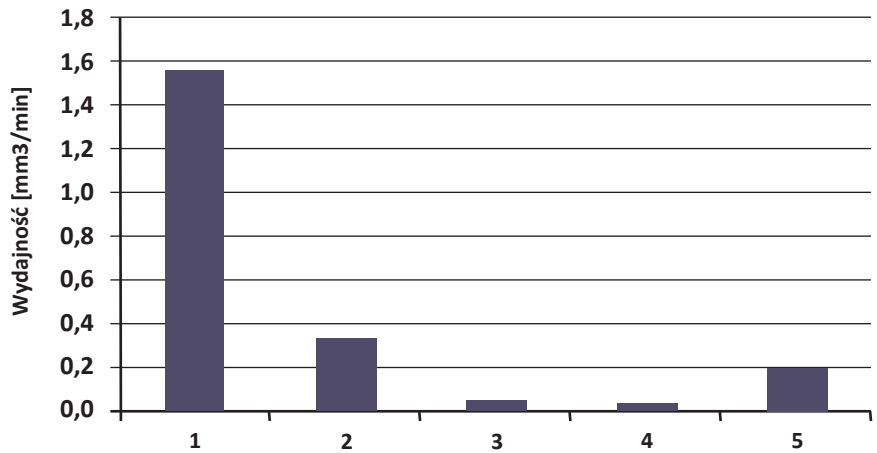
Prowadzone badania drążenia na sucho, zmniejszającego obciążenie środowiska i zagrożenia dla zdrowia, zmierzają do zwiększenia wydajności objętościowej procesu, porównywalnej do drążenia konwencjonalnego oraz opracowania warunków drążenia zapewniających wymagane właściwości obrabianej powierzchni. Modyfikacją drążenia na sucho z zastosowaniem gazu, opracowaną w celu zwiększenia wydajności drążenia, jest drążenie z drganiem o dużej częstotliwości (*Ultrasonic Vibration Electrical Discharge Dry Machining – UEDM*) [1, 23, 27]. Zastosowanie tej metody, łącznie ze zwiększeniem napięcia, czasu impulsu, amplitudy drgań, jak wykazały badania przyczynia się do istotnego zwiększenia wydajności procesu [27]. Zastosowanie tlenu umożliwia przy tym dwukrotne zwiększenie wydajności w porównaniu do powietrza przy zachowaniu tej samej chropowatości powierzchni. W porównaniu do drążenia konwencjonalnego wydajność drążenia jest jednak mniejsza. Drążenie (*UEDM*) z częstotliwością 17 do 25 kHz, na sucho z udziałem powietrza lub tlenu znalazło zastosowanie w drążeniu małych i głębokich otworów w twardych materiałach [1].

Odmianą drążenia na sucho z udziałem gazu zaproponowaną w badaniach [11] jest obróbka, w której gaz zamiast być tłoczony do szczeliny elektrodowej jest z niej zasysany (rys. 7). W ten sposób uzyskano zmniejszenie chropowatości powierzchni, jednak z upływem czasu drążenia przepływ gazu przez otwór lub

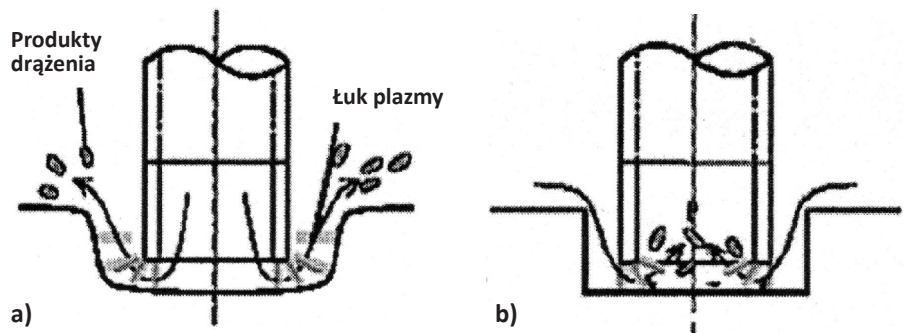
otwory wykonane w elektrodzie był blokowany przez produkty procesu drążenia.

W badaniach przedstawionych w [18] stwierdzono ponadto, że wprowadze-

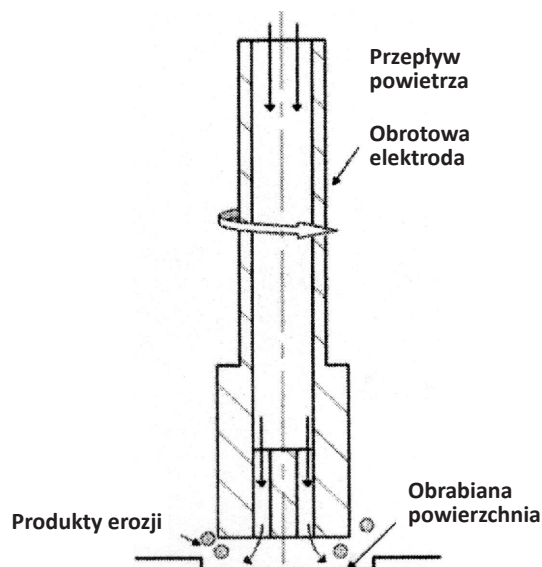
nie rurowej elektrody w ruch obrotowy względnie planetarny zwiększa stabilność procesu, zmniejsza powstawanie łuku między elektrodą i materiałem obrabianym oraz ułatwia odprowadzenie produktów drążenia – rys. 8.



Rys. 6. Wydajność objętościowa drążenia stali węglowej z zastosowaniem różnych gazów: 1 – tlen, 2 – powietrze, 3 – azot, 4 – argon, 5 – dwutlenek węgla [15]



Rys. 7. Istota drążenia z udziałem gazu: a) tłoczonego, b) zasysanego [11]



Rys. 8. Istota drążenia na sucho z przepływem gazu i obracającą się elektrodą [18]

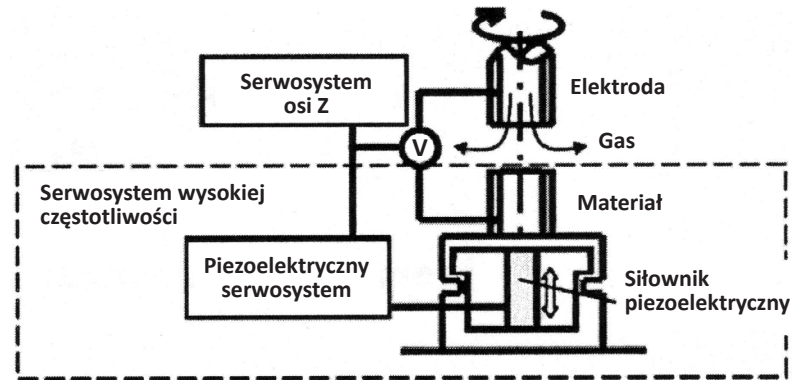
Rozwiązaniem mającym na celu stabilizowanie procesu drążenia na sucho, przede wszystkim likwidacji zwarć zmniejszających wydajność procesu, jest zastosowanie wysokoczęstotliwościowego piezoelektrycznego sterowania szczeliną [12, 23, 26, 27]. W rozwiązaniu przedstawionym na rys. 9, przedmiot obrabiany 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 impulsu, amplitudy drgań ultradźwiękowych oraz zmniejszenie grubości ścianki elektrody rurowej umożliwia zwiększenie wydajności drążenia na sucho – rys. 10.

Kolejnym sposobem umożliwiającym zredukowanie wad drążenia na sucho wspomaganego gazem jest zastosowanie w obszarze działania elektrody pulsującego pola magnetycznego umożliwiającego według autorów pracy [7] 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.

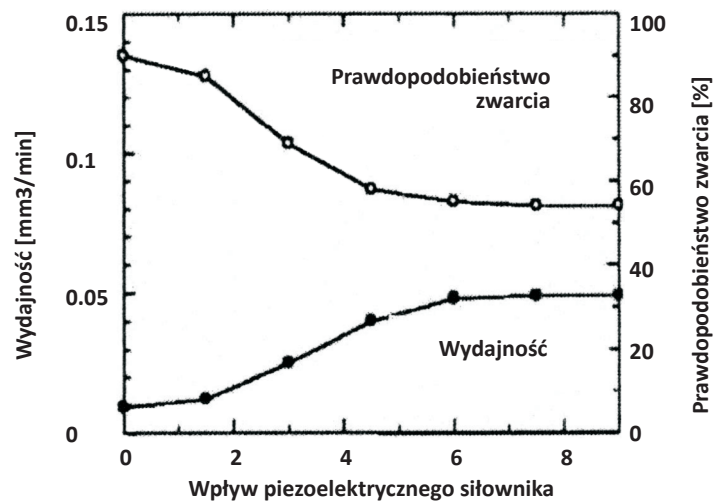
Odmianą drążenia na sucho zmierzającą do wyeliminowania cieczy dielektryka jest również drążenie z kriogenicznie schłodzonym (ciekłym azotem) materiałem obrabianym i/lub elektrodą. Zastosowanie tego sposobu do drążenia

stopu tytanowego Ti-6Al-4V spowodowało zmniejszenie zużycia elektrody o około 27% w porównaniu do konwencjonalnego drążenia, przy jednoczesnym zmniejszeniu chropowatości

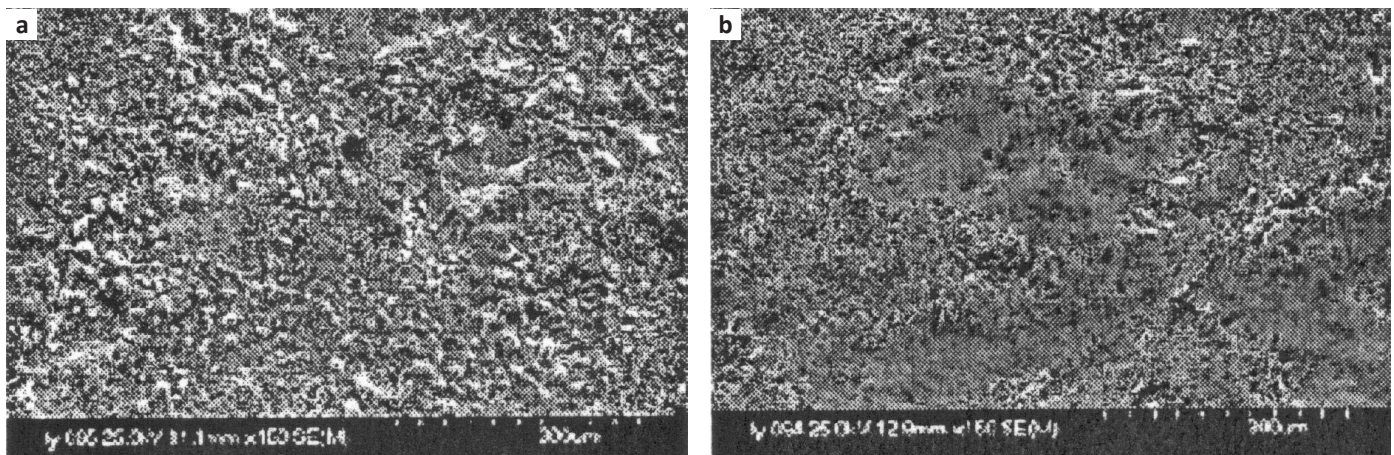
powierzchni i zwiększeniu wydajności drążenia – rys. 11 i 12. Stwierdzono przy tym, że istotny wpływ na wartość tych parametrów ma biegunowość elektrody i materiału obrabianego [14].



Rys. 9. Schemat ideowy układu do obróbki EDM na sucho z serwosystemem wysokiej częstotliwości w osi Z z siłownikiem piezoelektrycznym [12]



Rys. 10. Wpływ zastosowania siłownika z rys. 9 na wydajność objętościową i prawdopodobieństwo wystąpienia zwarcia w obróbce EDM na sucho [12]



Rys. 11. Topografia powierzchni po drążeniu konwencjonalnym (a) i kriogenicznym (b) [14]

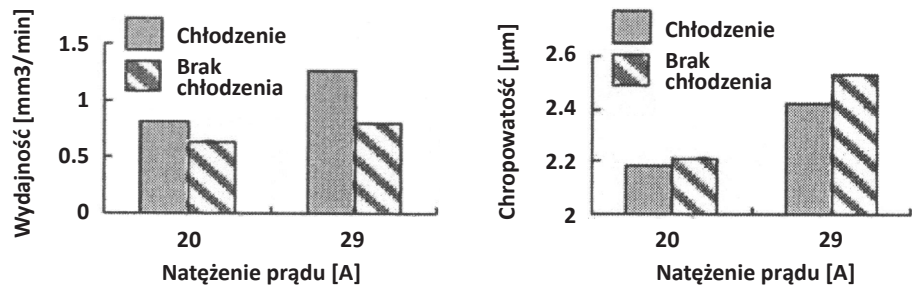
Wyeliminowanie cieczy dielektrycznej z procesu cięcia elektroerozyjnego struną przyczyniło się do zwiększenia dokładności cięcia i zmniejszenia chropowatości obrobionej powierzchni [1, 10, 13, 22]. W procesie cięcia elektrodą drutową na sucho (*dry WEDM*) siły działające na strunę oraz drgania elektrody strunowej są mniejsze niż podczas cięcia z udziałem dielektryka (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).

Zauważyć przy tym można, że 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 [13].

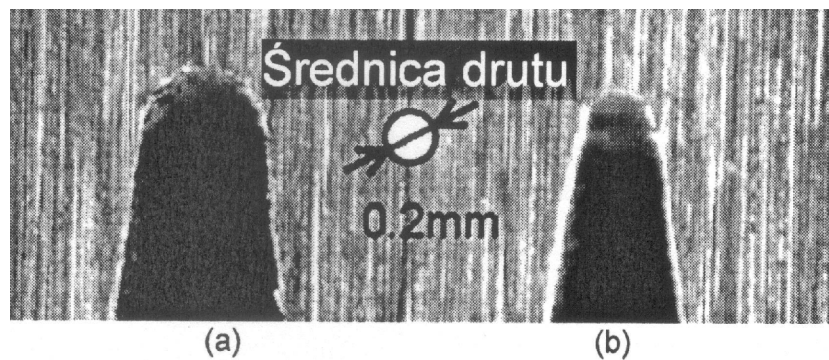
W celu zminimalizowania wad procesu drążenia na sucho, głównie zmniejszonej wydajności procesu i jakości powierzchni, prowadzone są badania drążenia z minimalnym udziałem medium w postaci mieszanki cieczy dielektryka z powietrzem w zastosowaniu zarówno do drążenia wgłębego i cięcia drutem – rys. 15.

W porównaniu do konwencjonalnego drążenia stosownie minimalnej ilości mieszanki dielektryka z gazem przyczynia się do zwiększenia wydajności obróbki przy małej energii wyładowań i zmniejszenia szczeliny międzyelektrodowej. Powoduje to jednak wzrost obciążenia cieplnego elektrody, które w przypadku drążenia struną może być przyczyną zerwania się elektrody [8].

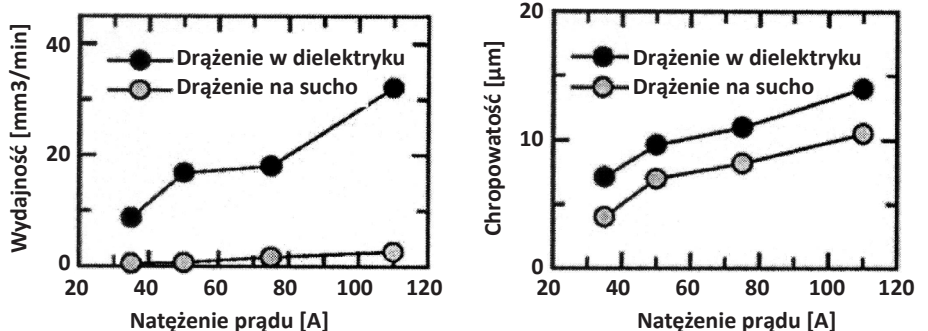
Badania porównawcze wiercenia elektroerozyjnego potwierdziły korzystny wpływ mieszanki wody i powietrza na jakość krawędzi otworu i obrobionej powierzchni. Doprowadzenie dielektryka w minimalnej ilości ($5 \div 35 \text{ cm}^3/\text{min}$) zlikwidowało osadzanie się cząstek materiału obrabianego na obrobionej powierzchni oraz zmniejszyło ilość generowanego i przedostającego się do otoczenia aerozolu – rys. 16.



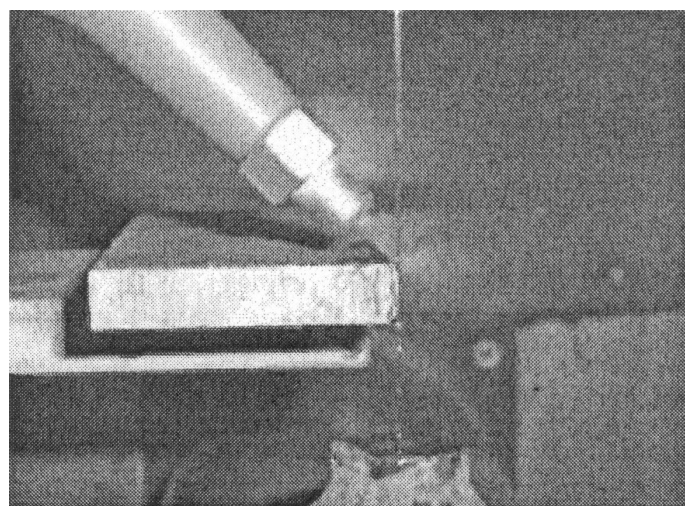
Rys. 12. Wydajność objętościowa i chropowatość powierzchni Ra w funkcji natężenia prądu w drążeniu schłodzonego kriogenicznie i nieschłodzonego materiału obrabianego [14]



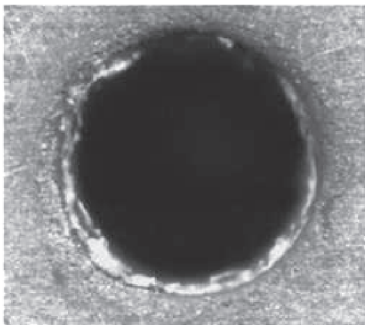
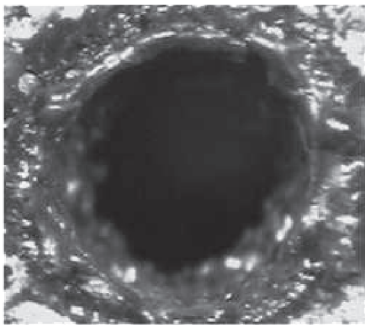
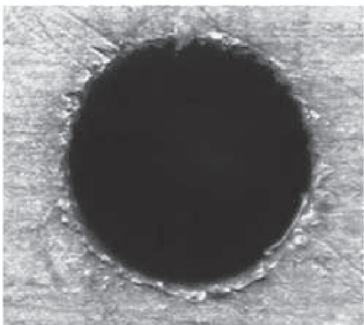
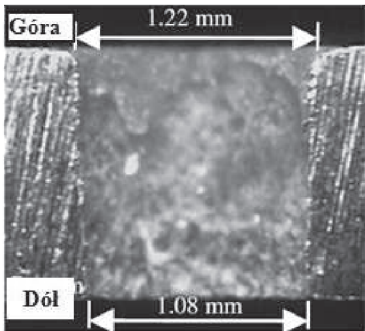
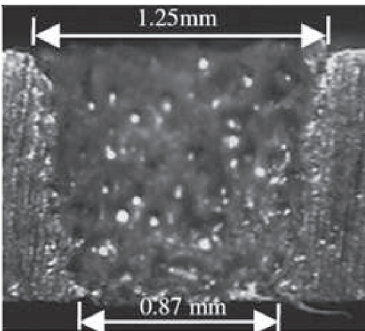
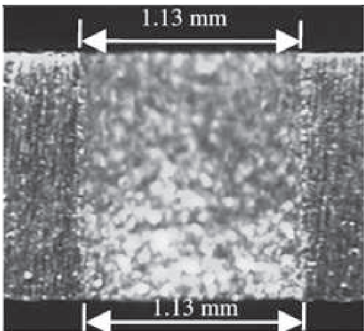
Rys. 13. Ślad przecięcia po cięciu z dielektrykiem (a) i bez – na sucho (b) [10]



Rys. 14. Wydajność objętościowa (a) i chropowatość Ra powierzchni (b) po cięciu konwencjonalnym i kriogenicznym [13]



Rys. 15. Cięcie elektrodą drutową z minimalnym wydatkiem mieszanki wody z powietrzem [11]

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

Rys. 16. Fotografie drążonego otworu: a) na mokro, b) na sucho, c) z minimalną ilością dielektryka [8]

Odmianą drążenia z minimalnym dopływem dielektryka umożliwiającą zwiększenie stabilności procesu, wydajności i gładkości powierzchni po drążeniu na sucho jest drążenie z zastosowaniem medium w formie mieszaniny cieczy dielektryka, gazu i nanoproszków (*Powder Mixed Near Dry Electrical Discharge Machining PMND-EDM*) [2, 9, 25]. W dotychczas przeprowadzonych badaniach stosowano sproszkowany grafit, aluminium, krzem, węgiel krzemu i siarczek molibdenu o wymiarach ziarna $70 \div 80$ nm. Dodanie do mieszaniny dielektryka z powietrzem sproszkowanego aluminium i dwusiarczku molibdenu umożliwiło uzyskanie dużej gładkości powierzchni [1]. Badania przedstawione w [2] dotyczące drążenia otworów z obracającą się elektrodą z dopływem mieszaniny dielektryka z powietrzem i sproszkowanym krzemem w ilości $0,07 \div 1,50$ cm³/min potwierdziły korzystne oddziaływanie stosowanego medium na wydajność drążenia. Istotne znaczenie ma przy tym rodzaj materiału obrabianego i elektrody, a także natężenie i ciśnienie prze-

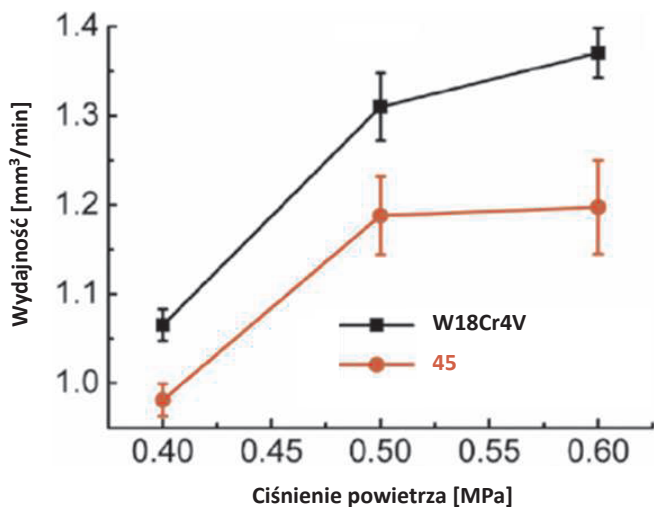
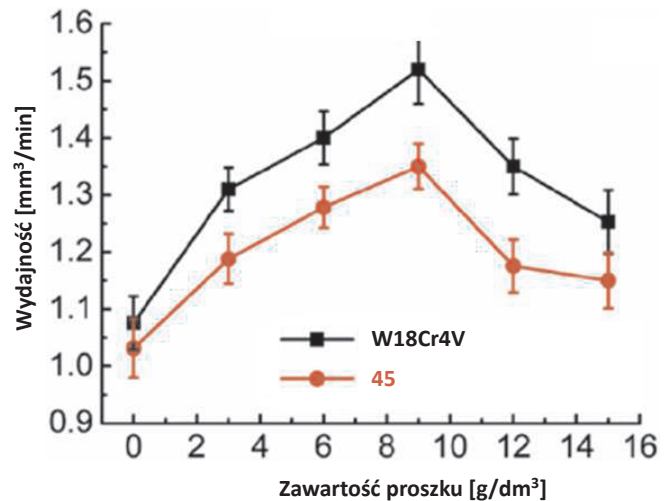
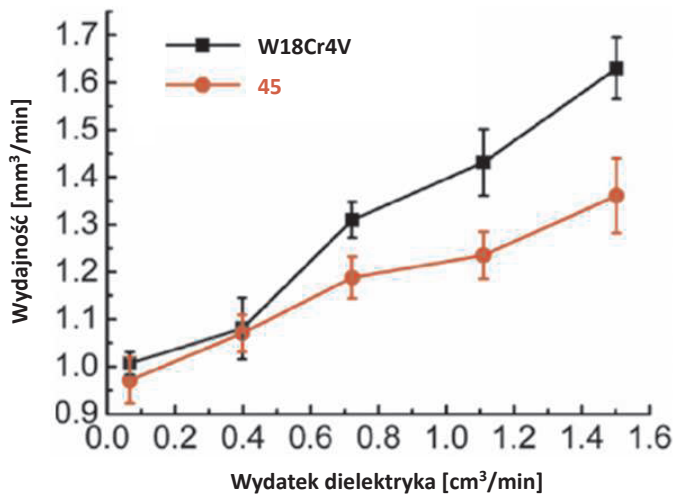
pływu oraz zawartość proszku w mieszaninie – rys. 17.

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 elektroerozyjnego oraz związane z nim zagrożenia dla obsługi drążarek i otoczenia, podejmowane są działania zmierzające do zmniejszenia



Rys. 17. Wpływ parametrów strumienia dielektryka na wydajność drążenia [8]

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 formie drgań o dużej 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. 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.

8. Kao C.C., Tao J., Shih A.J.: Near dry electrical discharge machining. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47, 2273–2281, 2007.

9. 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.

10. Kunieda M., Furudate Ch.: High Precision Finish Cutting by Dry WEDM. Annals of CIRP, 50/1, 121–124, 2001.

11. 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.

12. Kunieda M., Takaya T., Nakano S.: Improvement of Dry EDM Characteristics Using Piezoelectric Actuator. *Annals of CIRP*, 53/1, 183–186, 2004.
13. Levy G.N.: Environmentally friendly and high – capacity dielectric regeneration for wire EDM. *Annals of CIRP*, 42/1, 227–230, 1993.
14. 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.
15. Ming Y.Q., He L. Y.: Powder-suspension dielectric fluid for EDM. *Journal of Materials Processing Technology*, 52, 44–54, 1995.
16. Oczóś K.E.: Obróbka ubytkowa ceramiki technicznej. *Mechanik*, 4, 5-6, 1994.
17. Roth R., Kuster F., Wegener K.: Influence of oxidizing gas on the stability of dry electrical discharge machining process. The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM), *Procedia CIRP*, 6, 338–343, 2013.
18. 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.
19. 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.
20. Tao J., Shih A.J., Ni J.: 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.
21. Tonshoff H.K., Egger R., Klocke F.: Environmental and safety aspects of electro-physical 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. Yu Z.B., Jun T., Masanori K.: Dry electrical discharge machining of cemented carbide. *Journal of Materials Processing Technology*, 149, 353–357, 2004.
25. 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.
26. 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.
27. Zhang Q.H., Zhang J.H., Ren S.F., Deng J.X., Ai X.: Study on technology of ultrasonic vibration aided electrical discharge machining in gas, in: 14th International Symposium on Electromachining (ISEMXIV), *Journal of Materials Processing Technology*, 149(1–3), 640–644, 2004. ■