

Charakterystyka wybranych elektrochemicznych metod obróbki otworów o przekroju kołowym

Short description of some electrochemical drilling processes

SEBASTIAN SKOCZYPIEC
MAGDALENA MACHNO*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.10.517

W przypadku materiałów trudnoobrabialnych konwencjonalne metody wiercenia są nieefektywne (zwłaszcza przy wytwarzaniu smukłych otworów). Alternatywą jest zastosowanie niekonwencjonalnych metod obróbki. W artykule omówiono wybrane metody wykonywania otworów o przekroju kołowym, w których materiał usuwany jest w wyniku roztwarzania anodowego – wówczas obrabialność nie jest powiązana z właściwościami mechanicznymi, a zależy głównie od właściwości chemicznych materiału.
SŁOWA KLUCZOWE: wiercenie, elektrochemiczna obróbka otworów, smukłe otwory

With the materials showing very low machinability conventional methods of drilling are ineffective (especially in case of the very deep, or high ratio holes). The alternative is to apply unconventional manufacturing processes. Characterized in the paper are anodic dissolution-based methods characterized. In such case machinability of the material is not related with its mechanical but mainly with its chemical properties.

KEYWORDS: drilling, electrochemical drilling, high-ratio holes

W wielu gałęziach przemysłu istnieje zapotrzebowanie na efektywne techniki wykonywania otworów w skali makro i mikro. Przykłady można znaleźć w branży lotniczej (otwory chłodzące turbinę czy komorę spalania w nowoczesnych silnikach, kanały chłodzące w łopatkach turbin), medycznej (implanty chirurgiczne), elektronicznej (płytki z obwodami drukowanymi), motoryzacyjnej, optycznej czy w obszarach związanych z wytwarzaniem części mikrosystemów elektromechanicznych [1÷3]. Od technologów oczekuje się, by otwory charakteryzowały się dużą precyzją wymiarową i kształtową, wysoką jakością powierzchni i niejednokrotnie dużą smukłością. Dodatkowym utrudnieniem są stosowane w tych gałęziach przemysłu zaawansowane materiały inżynierskie (tj. stal nierdzewna, węgliki, stopy tytanu i niklu), które często są trudno obrabialne tradycyjnymi metodami. W takich przypadkach skutecznym rozwiązaniem jest zastosowanie niekonwencjonalnych technik wykonywania otworów, takich jak obróbka elektroerozyjna, elektrochemiczna, ultradźwiękowa czy laserowa.

W artykule omówiono wybrane metody wykonywania otworów o przekroju kołowym, w których materiał jest usuwany w wyniku roztwarzania anodowego zgodnie z prawami Faradaya i Ohma. Zjawiska te zachodzą pomiędzy dwoma elektrodami, tzn. podłączonym do dodatniego bieguna źródła prądu przedmiotem obrabianym a narzędziem (elektrodą roboczą, katodą), które jest podłączone do ujemnego bieguna źródła prądu. Obszar między elektrodami, czyli tzw.

szczelina międzyelektrodowa, jest wypełniony elektrolitem przepływającym pod odpowiednio wysokim ciśnieniem. Kiedy do elektrod zostanie przyłożone zewnętrzne napięcie, na ich powierzchniach zachodzą reakcje elektrochemiczne, a przez szczelinę międzyelektrodową przepływa prąd elektryczny. Jedną z reakcji elektrochemicznych prowadzących do usuwania materiału jest jonizacja atomów na powierzchni przedmiotu obrabianego.

W zależności od zastosowanego rozwiązania elektrochemiczne metody wiercenia można podzielić na dwie grupy [4]:

- **obróbkę z wykorzystaniem elektrod rurkowych**, do której zaliczamy m.in. procesy ECD (*electrochemical drilling*) i STEM (*shaped tube electrolytic machining*),
- **obróbkę strumieniową**, w której otwór kształtowany jest strumieniem elektrolitu pod wysokim ciśnieniem. W zależności od sposobu formowania strumienia elektrolitu i pola elektrycznego w literaturze angielskojęzycznej wyróżniane są w tej grupie procesy: CD (*capillary drilling*), ESD (*electro stream drilling*) oraz JED (*jet electrolytic drilling*).

TABLICA I. Porównanie możliwości technologicznych wybranych metod elektrochemicznego wykonywania otworów o przekroju kołowym [4]

Metoda		ECD	STEM	CD	ESD	JED
Średnica otworu, mm	min.	1	0,5	0,2	0,1	0,125
	maks.	7,5	6,5	0,5	1,0	–
Głębokość otworu, mm	typowa	125	125	–	18	–
	możliwa	300	900	–	25	–
Smukłość	typowa	8:1	16:1	16:1	16:1	16:1
	możliwa	20:1	300:1	100:1	40:1	30:1
Prędkość obróbki, mm/s		0,125	0,025	–	0,025	–
Tolerancja średnicy, mm		±0,025	±0,03	±0,03	±0,03	±0,5
Napięcie międzyelektrodowe, V		10÷30	5÷15	100÷200	150÷850	400÷800

Zastosowane w artykule akronimy zostały przyjęte w oparciu o angielskie nazwy omawianych metod zaproponowane w [4]. W literaturze dotyczącej tematu skróty te są powszechnie stosowane, natomiast brak jest ich polskojęzycznych odpowiedników. Warto jednak zwrócić uwagę na rozbieżność w znaczeniu terminu wiercenie w języku polskim i angielskim. W języku angielskim *drilling* oznacza raczej metodę wykonywania otworów kołowych, bez względu na sposób obróbki oraz wzajemną kinematykę narzędzia i przedmiotu obrabianego. Natomiast w języku polskim wiercenie rozumie się przede wszystkim jako jeden ze sposobów obróbki skrawaniem. Z tych względów autorzy postanowili posługiwać się stosowanymi na świecie akronimami, natomiast propozycje polskich nazw zostaną przedstawione w dalszej części tego artykułu.

Wymienione metody zostaną szczegółowo omówione w kolejnych paragrafach, a ich możliwości technologiczne oraz cechy charakterystyczne zestawiono w tabl. I i II.

* Dr hab. inż. Sebastian Skoczy piec (skoczy piec@mech.pk.edu.pl), Magdalena Machno (machno.magda@gmail.com) – Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji Politechniki Krakowskiej

TABLICA II. Charakterystyka wybranych metod elektrochemicznego wykonywania otworów o przekroju kołowym [4]

Metoda	ECD	STEM	CD	ESD	JED
Elektrolit	NaCl, NaNO ₃ , NaClO ₃ i ich mieszaniny	HNO ₃ , H ₂ SO ₄	HNO ₃ , H ₂ SO ₄ , HCl		HNO ₃ , H ₂ SO ₄
Ciśnienie elektrolitu, bar	–	3÷10	3÷20	3÷10	10÷60
Narzędzie	izolowana rurka tytanowa	szklana kapilara ze złotym/platynowym/tytanowym drutem	szklana dysza ze złotym/platynowym/tytanowym drutem	platynowy drut	
Prędkość wiercenia, mm/min	–	1÷3,5	1÷4	1÷3,5	–
Napięcie międzyelektrodowe, V	10÷30	5÷15	100÷200	150÷850	400÷800

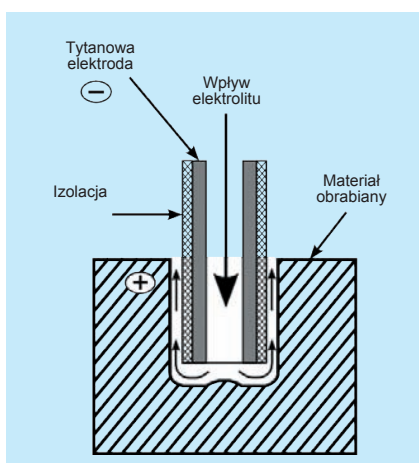
Elektrochemiczne metody wiercenia mają następujące – wynikające ze sposobu usuwania nadmiaru – zalety:

- możliwość uzyskania powierzchni o wysokiej jakości,
- brak zużycia narzędzia,
- brak deformacji i zadziorów na krawędziach otworu,
- możliwość równoczesnego wykonywania dużej liczby otworów na jednym stanowisku roboczym.

Istotnym ograniczeniem ich zastosowania jest natomiast możliwość obróbki jedynie materiałów przewodzących prąd elektryczny.

Elektrochemiczne wykonywanie otworów z zastosowaniem elektrod rurkowych

W tej grupie metod wiercenia elektrochemicznego stosowana jest elektroda w kształcie rurki, przez którą do obszaru obróbki pompowany jest elektrolit pod wysokim ciśnieniem. Elektroda wykonuje ruch w kierunku przedmiotu obrabianego ze stałą prędkością posuwu, dostosowaną do rozpuszczania materiału [4]. Aby ograniczyć obszar rozpuszczania, powierzchnia boczna elektrody roboczej jest pokryta warstwą izolacyjną, a rozpuszczanie elektrochemiczne zachodzi w bezpośrednim sąsiedztwie czoła elektrody (rys. 1). Pozwala to uniknąć nadmiernego rozpuszczania na



Rys. 1. Schemat obróbki elektrochemicznej otworów z zastosowaniem elektrod rurkowych (ECD)

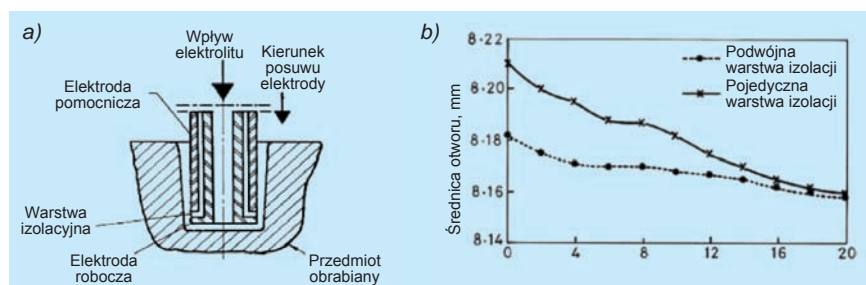
powierzchniach bocznych otworu, minimalizując stożkowość, poprawiając dokładność oraz smukłość otworów. Do izolacji stosuje się powłoki: szklane, węglowe o strukturze diamentu (DLC), teflonowe, z żywic epoksydowych, z węglikami krzemu oraz ceramiczne. Stosowanie izolacji powierzchni bocznej elektrody związane jest z takimi problemami, jak nierównomierna grubość powłoki wzdłuż powierzchni bocznej elektrody (zmiana średnicy elektrody na jej długości) i częste, wynikające zazwyczaj z przegrzania, uszkodzenia powłoki.

W ostatnich latach opracowano elektrody z podwójną powłoką izolacyjną (elektrody dwubiegunowe), która składa się z wewnętrznej warstwy dielektrycznej (np. z ceramiki TiO₂) oraz zewnętrznej – podłączonej do dodatkowego bieguna napięcia – warstwy przewodzącej (tzw. elektrody pomocniczej) [5]. Takie rozwiązanie znacznie ogranicza wpływ prądów błądzących i zmniejsza stożkowość otworu (rys. 2).

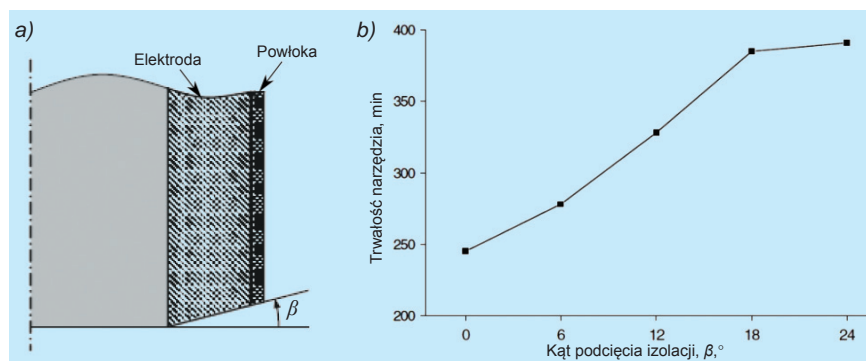
W celu poprawy warunków procesu oraz trwałości powłoki izolacyjnej stosuje się również elektrody ze sfazowaną – ściętą pod kątem β (rys. 3a) – krawędzią. Taki kształt czoła elektrody sprawia, że elektrolit przepływa przy zmniejszonym oporze hydraulicznym i na elektrodę oddziałują znacznie mniejsze siły. Zwiększa to również trwałość powłoki izolacyjnej oraz korzystnie wpływa na przepływ elektrolitu przez szczelinę międzyelektrodową. Jak wynika z przeprowadzonych w [6] badań, wraz ze wzrostem kąta β do ok. 20° wytrzymałość powłoki izolacyjnej rośnie.

Stożkowość powstałego otworu stanowi duży problem zwłaszcza przy średnicach $\ll 1$ mm. Wynika to z trudności w izolacji powierzchni bocznej elektrod o takich wymiarach lub z braku możliwości zastosowania elektrody rurkowej. Można temu zaradzić poprzez zwiększenie prędkości posuwu, zmniejszenie wartości napięcia, obniżenie stężenia elektrolitu lub wprowadzenie napięcia impulsowego (rys. 4) [7, 8]. Zmodyfikowany w ten sposób proces wiercenia elektrochemicznego otworów o średnicach $\ll 1$ mm określany jest w literaturze jako mikrowiercenie elektrochemiczne.

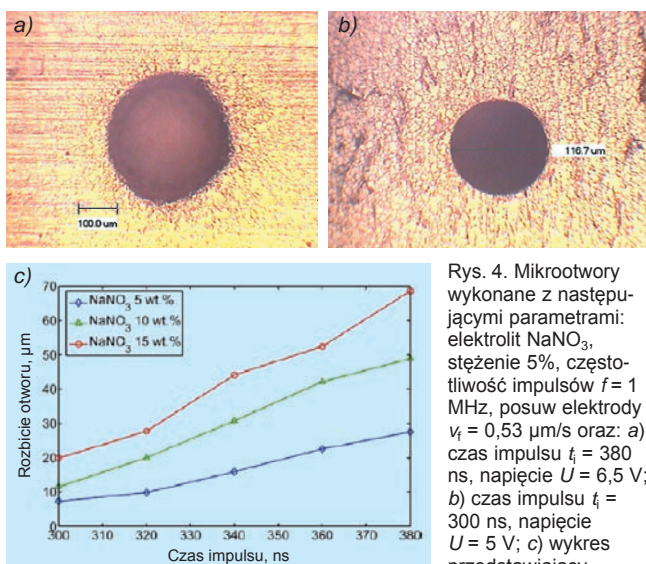
Ciekawym rozwiązaniem w tym obszarze jest zastosowanie elektrody z końcówką roboczą w kształcie dysku [9] (rys. 4) lub kulistą [10], co ułatwia wymianę elektrolitu



Rys. 2. Proces ECD z zastosowaniem elektrody dwubiegunowej: a) schemat; b) wykres przedstawiający profile obrabianych otworów [5]



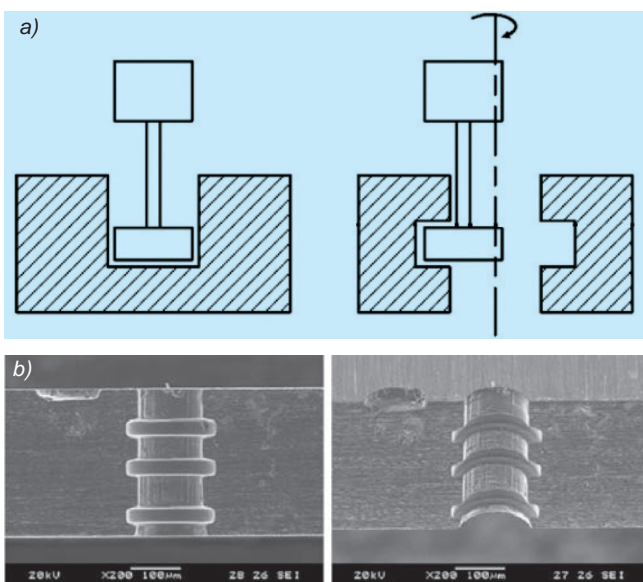
Rys. 3. Elektroda ze stożkowo ściętą końcówką pod kątem β (a), wykres przedstawiający trwałość powłoki w zależności od wartości kąta β (b) [6]



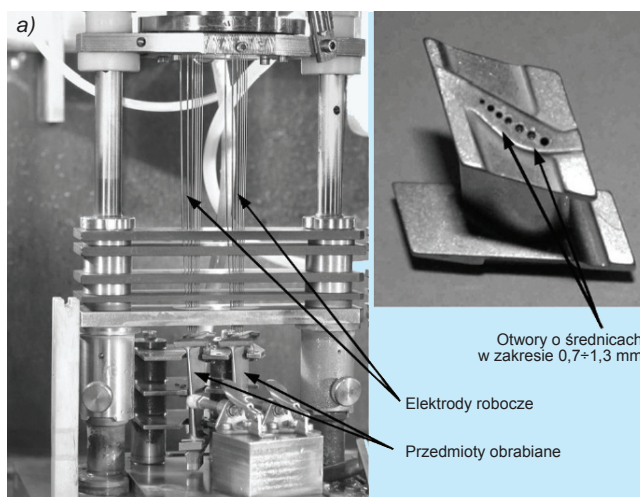
zależność między czasem impulsu a rozbiem otworu z uwzględnieniem stężenia elektrolitu [7]

w obszarze obróbki, zmniejsza stożkowatość otworu oraz dodatkowo umożliwia wykonywanie rowków wewnątrz otworu (w wybranych przekrojach otworu elektroda wykonuje dodatkowo ruch mimośrodowy).

W literaturze wyróżnia się dwie odmiany metod elektrochemicznej obróbki otworów z zastosowaniem elektrod rurkowych, w zależności od parametrów procesu i rodzaju elektrolitu. Proces określany w literaturze anglojęzycznej jako wiercenie elektrochemiczne ECD zachodzi w elektrolitach na bazie soli (roztworach wodnych NaCl , NaNO_3 , NaClO_3 lub ich mieszaninach). Natomiast znacznie szersze stosowany proces STEM zachodzi w elektrolitach kwasowych (wodnych roztworach HNO_3 lub H_2SO_4 o stężeniu $10\div 25\%$), gdzie produkty roztrawiania nie osadzają się w postaci szlamu, co znacznie ułatwia wykonywanie głębokich i smukłych otworów. Metodą STEM wykonuje się otwory o średnicy w zakresie $0,3\div 5$ mm i smukłości nawet $300:1$. Możliwe jest również równoczesne wykonywanie w jednej operacji wielu otworów (o takiej samej lub różnej średnicy – rys. 6a). W procesie STEM ze względu na wyższe stężenie elektrolitu stosuje się niższe niż w ECD napięcia ($6\div 15$ V) i prędkości obróbki rzędu $1,5$ mm/min. Na przykładzie wykorzystania STEM do wykonywania otworów chłodzących w łopatkach wirników można zaobserwować duże możliwości technologiczne tego



Rys. 5. Zasada zastosowania elektrody z końcówką roboczą w kształcie dysku (a) oraz wykonane w ten sposób podcięcia wewnątrz otworu (b) [10]



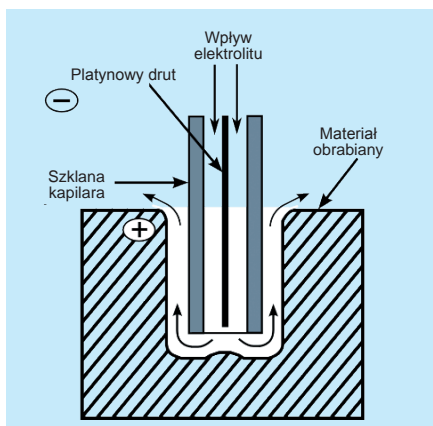
procesu. Okresowe obniżenie prędkości posuwu elektrody pozwala wykonać w ten sposób otwory chłodzące o różnej średnicy (rys. 6b), które umożliwiają skuteczniejsze chłodzenie łopatki [2].

Elektrochemiczna obróbka strumieniowa

Elektrochemiczna obróbka strumieniowa (ECJM) obejmuje wszystkie odmiany obróbki elektrochemicznej, które jako narzędzie wykorzystują strumień elektrolitu pod ciśnieniem. Wśród nich możemy również wskazać odmiany specjalnie opracowane do wykonywania otworów o przekroju kołowym [4], tj. obróbkę z zastosowaniem szklanej kapilary CD, obróbkę z zastosowaniem szklanej dyszy ESD czy obróbkę strumieniem elektrolitu JED. Cechą charakterystyczną tych metod jest to, że materiał jest usuwany w wyniku uderzania o powierzchnię przedmiotu ujemnie naładowanego strumienia elektrolitu.

■ Obróbka z zastosowaniem szklanej kapilary (CD).

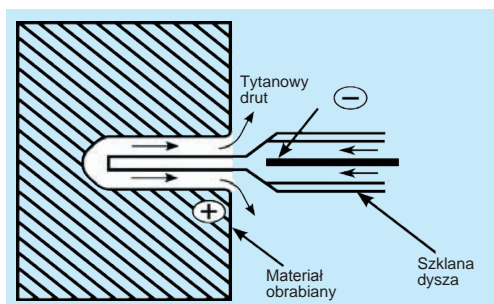
W procesie CD otwór wykonuje się za pomocą szklanej kapilary z osadzonym wewnątrz cienkim platynowym drutem, który stanowi katodę (rys. 7). Drut jest zamocowany w odległości ok. 2 mm od czoła kapilary, co nie zaburza przepływu elektrolitu w obszarze obróbki. Obróbkę kapilarami stosuje się do wykonywania głębokich otworów o średnicach $< 0,5$ mm (otwory te są zbyt głębokie, aby zastosować wiercenie elektroerozyjne, i mają zbyt małe średnice, aby użyć STEM). Ze względu na relatywnie duży dystans pomiędzy katodą i przedmiotem obrabianym (duże spadki napięcia) stosuje się zdecydowanie wyższe napięcie międzyelektrodo-we ($100\div 200$ V). Proces CD jest wykorzystywany m.in. do wykonywania otworów chłodzących na krawędziach spływu łopatek wysokociśnieniowych turbin gazowych (o średnicach w zakresie $0,2\div 0,5$ mm i głębokości $8\div 16$ mm). Uzyskane w ten sposób otwory charakteryzują się stosunkowo dużą tolerancją – na poziomie $\pm 0,05$ mm.



Rys. 7. Schemat procesu obróbki otworów z zastosowaniem szklanej kapilary (CD)

■ Obróbka z zastosowaniem szklanej dyszy (ESD).

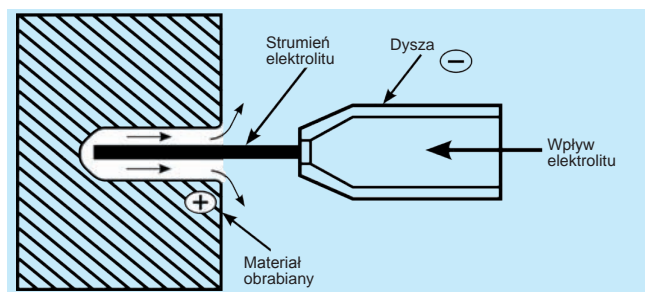
W procesie ESD elektroda robocza (tytanowy drut) jest zabudowana w szklanej kapilarze, której końcówka robocza ma kształt wąskiej dyszy (rys. 8). Podobnie jak w procesie CD medium kształtującym otwór jest ujemnie naładowany strumień elektrolitu kwasowego (o stężeniu $10 \pm 25\%$), który podawany jest do obszaru obróbki pod ciśnieniem 3 ± 10 bar. Ze względu na znaczną odległość elektrody od czoła kapilary oraz znacznie mniejszą niż w procesie CD średnicę strumienia elektrolitu, stosowane w ESD napięcie jest znacznie wyższe (150 ± 850 V). Powoduje to pewne trudności w konstrukcji układu doprowadzania elektrolitu, którego budowa musi minimalizować prawdopodobieństwo wystąpienia prądów błądzących. Proces ESD jest zalecany do wykonywania otworów o średnicy w zakresie $0,1 \pm 1$ mm i głębokości nawet do 18 mm.



Rys. 8. Schemat procesu obróbki otworów z zastosowaniem szklanej dyszy (ESD)

■ Obróbka strumieniem elektrolitu (JED).

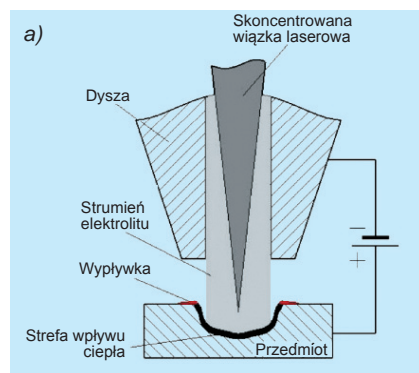
W procesie JED narzędziem jest uformowany strumień elektrolitu, który pod ciśnieniem 10 ± 60 bar oddziałuje na powierzchnię obrabianą i powoduje jej roztwarzanie anodowe (rys. 9). Dysza formująca strumień elektrolitu jest jednocześnie katodą; znajduje się w odległości 2 ± 4 mm od powierzchni przedmiotu obrabianego. W JED stosuje się wysokie napięcie międzyelektrodowe (400 ± 800 V) oraz elektrolity o wysokiej przewodności. Możliwości technologiczne procesu JED zależą od średnicy dyszy i ciśnienia elektrolitu. Warto zwrócić uwagę, że ze względu na brak przewodzenia strumienia elektrolitu (brak szklanej kapilary) proces ten ma istotne ograniczenia co do głębokości wykonywanych otworów.



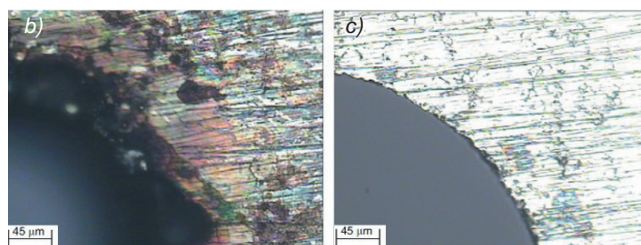
Rys. 9. Schemat procesu obróbki otworów strumieniem elektrolitu (JED)

■ Obróbka laserowa wspomagana elektrochemicznie.

W ostatnich latach nastąpił dynamiczny rozwój hybrydowych procesów wytwarzania, w których do usuwania materiału stosuje się jednocześnie oddziaływanie różnych lub w różny sposób wytworzonych form energii [11]. Ciekawym przykładem takiego rozwiązania jest obróbka laserowa wspomagana elektrochemicznie. Celem wprowadzenia oddziaływań elektrochemicznych w strefę laserowych oddziaływań termicznych jest poprawa właściwości warstwy wierzchniej poprzez zminimalizowanie – typowej dla obróbki laserowej – strefy wpływu ciepła. Proces przebiega w sposób analogiczny do wiercenia laserowego, jednak wiązka laserowa jest prowadzona w strumieniu elektrolitu (rys. 10a) [12]. Ze względu na absorpcję promieniowania laserowego przez elektrolit proces ten wymaga zastosowania lasera zielonego o długości fali w zakresie 470 ± 560 nm [13], a jego energia jest tak dobrana, aby przetopić materiał obrabiany. Dysza dostarczająca elektrolit jest podłączona do ujemnego bieguna źródła prądu (katody), natomiast przedmiot obrabiany – do dodatniego (anody). Napięcie międzyelektrodowe oscyluje w zakresie 30 ± 40 V, a jako elektrolit stosuje się wodny roztwór NaNO_3 lub NaCl . Badania laserowo-elektrochemicznego wiercenia otworów wskazują, że głównym mechanizmem usuwania nadatku są tu oddziaływania termiczne, natomiast wprowadzenie oddziaływań elektrochemicznych redukuje ilość materiału przetopionego na krawędziach otworu (rys. 10b).



Rys. 10. Obróbka laserowa wspomagana elektrochemicznie: a) schemat; b) krawędź otworu po wierceniu laserowym w powietrzu (energia wiązki 200 mJ, czas obróbki 10 s); c) krawędź otworu po wierceniu laserowym wspomaganiem elektrochemicznym (energia wiązki 200 mJ, napięcie międzyelektrodowe 40 V, czas obróbki 10 s) [12, 13]



Podsumowanie

Zaprezentowano możliwości wykonywania otworów o przekroju kołowym za pomocą najczęściej stosowanych odmian obróbki elektrochemicznej. W porównaniu z innymi niekonwencjonalnymi metodami wykonywania otworów, tj. obróbką laserową i elektroerozyjną, omówione metody umożliwiają uzyskanie otworów charakteryzujących się dobrą jakością powierzchni obrabianej, bez zmian cieplnych i pęknięć, oraz wysoką dokładnością wymiarowo-kształtową.

Omówione odmiany obróbki elektrochemicznej umożliwiają jednocześnie wykonywanie głębokich otworów o małych średnicach ($0,2 \pm 0,5$ mm) i wysokiej smukłości nawet $300 : 1$, co ma szczególne znaczenie np. przy wytwarzaniu otworów chłodzących w łopatkach turbin. Warto podkreślić, że istotnym ograniczeniem tych metod jest możliwość obróbki tylko materiałów przewodzących prąd elektryczny. Natomiast w przypadku obróbki trudnoobrabialnych materiałów dielektrycznych, takich jak materiały ceramiczne, kompozyty czy szkło, alternatywą jest zastosowanie obróbki laserowej, ultradźwiękowej lub zmodyfikowanego procesu obróbki elektroerozyjnej.

LITERATURA

1. Lu X., Leng Y. "Electrochemical micromachining of titanium surfaces for biomedical applications". *Journal of Materials Processing Technology*. 169 (2005): pp. 173÷178.
2. Klocke F., Klink A., Veselovac D., Aspinwall D.K., Sein Leung Soo S.L., Schmidt M., Schilp J., Levy G., Kruth J.-P. "Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electrophysical and photonic processes". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 63 (2014): pp. 703÷726.
3. Kudła L. „Specyfika procesu wiercenia mikrootworów”. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Seria Mechanika. Z. 228*, Wydawnictwo PW, 2009.
4. Mohan Sen M., Shan H.S. "A review of electrochemical macro- to micro-hole drilling processes". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 4 (2005): pp. 137÷152.
5. Zhu D., Xu H.Y. „Improvement of electrochemical machining accuracy by using dual pole tool”. *Journal of Materials Processing Technology*. 129 (2002): pp. 15÷18.
6. Fang X., Qu N., Li H., Zhu D. „Enhancement of insulation coating durability in electrochemical drilling”. *The International Journal Advanced Manufacturing Technology*. 68 (2013): pp. 2005÷2013.
7. Fan Z.-W., Hourng L.-W. "Electrochemical micro-drilling of deep holes by rotational cathode tools". *The International Journal Advanced Manufacturing Technology*. 52 (2011): pp. 555÷563.
8. Skoczypiec S. „Elektrochemiczne metody wytwarzania mikroelementów”. Monografia nr 426: *Mechanika*. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2013 (<http://suw.biblos.pk.edu.pl/resource/Details&rid=15815>).
9. Jo C.H., Kim B.H., Chu C.N. „Micro electrochemical machining for complex internal micro features”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 58 (2009): pp. 181÷184.
10. Yong Liu, Di Zhu, Yongbin Zeng, Hongbing Yu, "Development of microelectrodes for electrochemical micromachining". *The International Journal Advanced Manufacturing Technology*. 55 (2011): pp. 195÷203.
11. Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., Micintosh D. "Hybrid processes in Manufacturing", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 64 (2014): pp. 561÷583.
12. Hua Zhang, Jiawen Xu. "Modeling and experimental investigation of laser drilling with jet electrochemical machining". *Chinese Journal of Aeronautics*. 23 (2010): pp. 454÷460.
13. Hua Zhang, Jiawen Xu, Jiming Wang. "Investigation of a novel hybrid process of laser drilling assisted with jet electrochemical machining". *Optics and Lasers in Engineering*. 47 (2009): pp. 1242÷1249. ■