



Precyzyjne elektrochemiczne rozwiercanie długich otworów

Precise electrochemical reaming of long holes

GRZEGORZ SKRABALAK
MARIA ZYBURA
JÓZEF DZIEDZIC
JAN CZEKAJ
ANDRZEJ STWORA*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.12.189>

English version available on: www.mechanik.media.pl

W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych, wykonanych w Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie, związanych z elektrochemicznym rozwiercaniem otworów. Na podstawie tych wyników zweryfikowano teoretyczne założenia dotyczące doboru warunków oraz parametrów procesu obróbki, które wyliczono na podstawie matematyczno-fizycznego modelu procesu rozwiercania elektrochemicznego. Przeprowadzono optymalizację parametrów technologicznych procesu obróbki pod kątem uzyskiwania otworów o odpowiedniej jakości powierzchni wewnętrznej oraz założonej dokładności wymiarowo-kształtowej.

SŁOWA KLUCZOWE: obróbka elektrochemiczna, długie otwory, rozwiercanie elektrochemiczne, wydajność procesu

The paper presents results of experiments of electrochemical reaming of long holes. During performed experiments, there was verified the physico-mathematical model of the machining process used for initial selection of the range of technological parameters applied for the machining tests. There were also conducted experiments focusing on the optimization of the machining parameters of electrochemical reaming process in order to achieve holes with desired geometry and proper inner surface quality.

KEYWORDS: electrochemical machining, long holes shaping, machining efficiency, electrochemical reaming

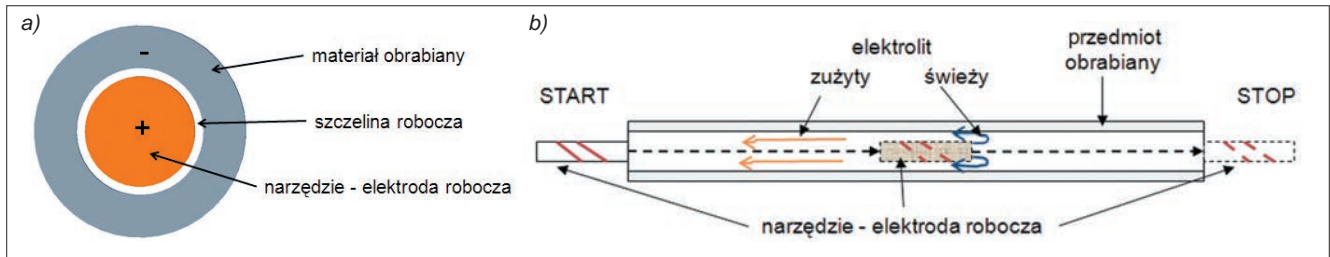
Precyzyjne kształtowanie długich otworów, m.in. w wymiennikach ciepła reaktorów jądrowych, czy przewodów lufowych jest procesem wielozbiegowym. Wstępnie wywiercony otwór jest poddawany operacjom rozwiercania, które mają zwiększyć jego dokładność wymiarowo-kształtową oraz poprawić jakość powierzchni. Zazwyczaj w celu

osiągnięcia pożądanej średnicy rozwiercanie prowadzi się metodą obróbki mechanicznej – skrawania. Z uwagi na niewielkie naddatki usuwane podczas jednej operacji (rzędu 0,05÷0,15 mm) otrzymanie zadanej średnicy wymaga wykonania co najmniej kilku operacji rozwiercania (zgrubnego, półwykończeniowego oraz wykończeniowego). W efekcie obróbki mechanicznej, po rozwiercaniu wykończeniowym, na wewnętrznej powierzchni kształtowanego otworu mogą występować rysy poprzeczne oraz umocniona warstwa wierzchnia. Te zjawiska są niepożądane, dlatego wyrób musi zostać poddany kolejnym zabiegom [1]. Jednym ze skutecznych sposobów eliminacji tych niekorzystnych efektów obróbki mechanicznej, który jednocześnie poprawia wydajność produkcji, jest zastosowanie rozwiercania elektrochemicznego zamiast zabiegów mechanicznego rozwiercania wykończeniowego. Obróbka elektrochemiczna pozwala na jednorazowe powiększenie średnicy o ok. 0,5÷1 mm z dokładnością 0,01 mm i z zachowaniem wysokiej jakości powierzchni. Proces usuwania naddatku zachodzi w wyniku roztwarzania elektrochemicznego, przebiegającego bez zmian w warstwie wierzchniej materiału obrabianego. Podczas procesu obróbki ECM w materiale nie powstają zatem dodatkowe naprężenia. Ponieważ w przypadku obróbki ECM katoda (elektroda robocza) nie ulega zużyciu, możliwe jest jej wielokrotne stosowanie do kształtowania przedmiotu obrabianego.

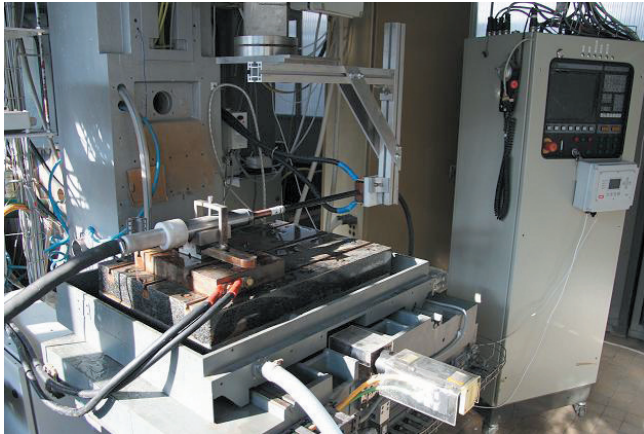
Stanowisko badawcze

W ramach badań przeprowadzono serię doświadczeń związanych z rozwiercaniem elektrochemicznym otworów. Uproszczony schemat obróbki przedstawiono na rys. 1. Badania wykonano na stanowisku badawczym wyposażonym w elektrochemiczną obrabiarkę CNC (rys. 2) oraz zasilacz prądu stałego o maksymalnym napięciu 24 VDC i prądzie maksymalnym 2000 A. Zasilacz umożliwił pracę w trybie stałoprądowym lub stałonapięciowym.

* Dr inż. Grzegorz Skrabalak (grzegorz.skrabalak@ios.krakow.pl), dr Maria Zybura (maria.zybura@ios.krakow.pl), mgr inż. Józef Dziedzic (jozef.dziedzic@ios.krakow.pl), mgr inż. Jan Czekaj (jan.czekaj@ios.krakow.pl), mgr inż. Andrzej Stwora (andrzej.stwora@ios.krakow.pl) – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków



Rys. 1. Uproszczony schemat procesu rozwiercania elektrochemicznego: a) przekrój poprzeczny, b) kinematyka procesu obróbki [2]

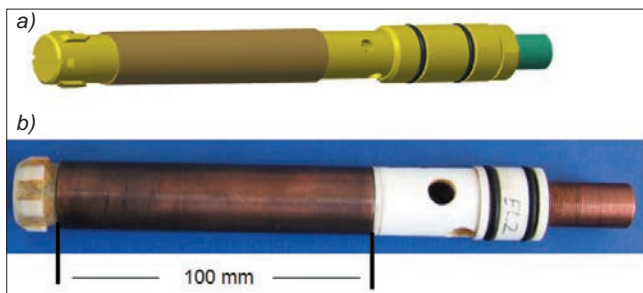


Rys. 2. Stanowisko do badań rozwiercania elektrochemicznego otworów

Obrabianymi przedmiotami były dwa rodzaje próbek, tj. rury wykonane ze stali 30HN2MF o wymiarach:

- średnicy wewnętrznej 22,8 mm i długości 300 mm,
- średnicy wewnętrznej 12,6 mm i długości 300 mm.

Jako elektrolit zastosowano wodny roztwór NaCl o stężeniu ok. 12%. Temperaturę elektrolitu stabilizowano w zakresie 25÷30°C. Elektrody robocze (rys. 3) były wykonane z miedzi.



Rys. 3. Elektroda do elektrochemicznego rozwiercania otworów o średnicach > 20 mm: a) projekt, b) elektroda używana podczas doświadczeń

Eksperymenty miały na celu określenie optymalnych (z punktu widzenia geometrii uzyskiwanych otworów oraz czasu ich obróbki) warunków procesu rozwiercania elektrochemicznego. Parametrami zmiennymi były prędkość przesuwu elektrody roboczej oraz nastawa prądu roboczego (praca w trybie stałoprądowym, przy napięciu roboczym ograniczonym do ok. 18 VDC). Zakresy zmienności, oszacowane na podstawie modelu procesu, przedstawiono w tabl. I.

TABLICA I. Zakres zmienności parametrów dla poszczególnych otworów/średnic początkowych

Średnica początkowa otworu, mm	Prędkość przesuwu v_f , mm/min	Prąd roboczy I , A
22,8	100÷150	1200÷1500
12,6	100÷150	480÷580

Analitycznie wyznaczone parametry rozwiercania elektrochemicznego elektrodą ruchomą

Podstawowym celem modelowania i symulacji procesu rozwiercania elektrochemicznego było wyznaczenie grubości szczeliny końcowej S_k (po obróbce) i tym samym ostatecznej średnicy obrabianego otworu. Szczegółowy model został zaprezentowany przez Kozaka i in. w 2015 r. [2]. Na potrzeby prowadzonych badań wykorzystano równania opisujące:

- średnicę otworu po rozwiercaniu elektrochemicznym (D_k):

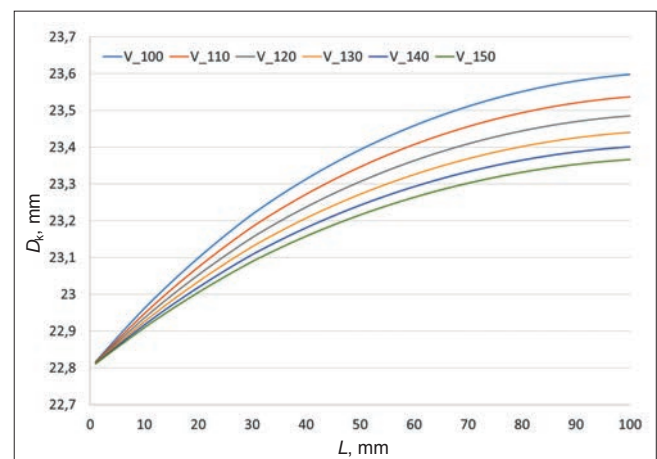
$$D_k = d_e + 2 \sqrt{S_0^2 + 2\kappa \cdot K_v \frac{U-E}{v_f} L} \quad (1)$$

- natężenie prądu w stanie ustalonym rozwiercania elektrochemicznego (I_f):

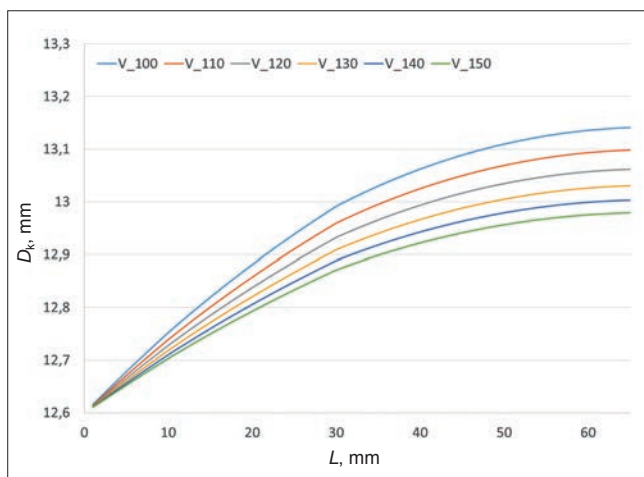
$$I_f = 0,25\pi(D_k^2 - D_0^2) \frac{v_f}{K_v} \quad (2)$$

gdzie: d_e – średnica katody (elektrody roboczej), D_0 – początkowa średnica otworu, $S_0 = (D_0 - d_e)/2$ – szczelina początkowa, κ – elektryczna konduktywność elektrolitu, K_v – współczynnik obrabialności elektrochemicznej, U – napięcie międzyelektrodowe, E – spadek potencjału w warstwach przyelektrodowych, v_f – prędkość posuwu elektrody roboczej, L – długość części czynnej elektrody roboczej.

W symulacji przyjęto stałe wartości parametrów, wynikające z wymiarów używanych materiałów i próbek



Rys. 4. Średnica otworu (D_k) po rozwiercaniu elektrochemicznym otworu o $D_0 = 22,8$ mm w zależności od pozycji wzdłuż elektrody roboczej i dla różnych prędkości posuwu elektrody: $v_f = 100, 110, 120, 130, 140$ i 150 mm/min (przy stałych wartościach $U = 15$ V i $E = 0,3$ V)



Rys. 5. Średnica otworu (D_k) po rozwiercaniu elektrochemicznym otworu o $D_0 = 12,6$ mm, w zależności od pozycji wzdłuż elektrody roboczej, dla różnych prędkości posuwu elektrody: $v_f = 100, 110, 120, 130, 140$ i 150 mm/min (przy stałych wartościach $U = 15$ V i $E = 0,5$ V)

oraz z danych literaturowych [1, 4]: $\kappa = 0,02$ 1/ Ω ·mm, $K_v = 2,17$ mm³/A·min. Z przeprowadzonej symulacji wynika, że w przypadku otworów o średnicy początkowej $D_0 > 20$ mm średnica końcowa będzie się kształtować wzdłuż elektrody, w zależności od prędkości jej posuwu, w sposób zaprezentowany na rys. 4: $d_e = 21,3$ mm, $D_0 = 22,8$ mm, $L = 100$ mm. Z kolei w przypadku otworów o średnicy początkowej $D_0 \approx 12,5$ mm średnica końcowa będzie się kształtować wzdłuż elektrody, w zależności od prędkości jej posuwu, w sposób pokazany na rys. 5: $d_e = 11,2$ mm, $D_0 = 12,6$ mm, $L = 65$ mm.

Dla warunków zaprezentowanych na rys. 4 i 5 wyliczona wartość natężenia prądu zmieniała się w zależności od prędkości posuwu w sposób zaprezentowany w tabl. II.

TABLICA II. Wyznaczone natężenie prądu (I_f) w stanie ustalonym kalibrowania elektrochemicznego

v_f , mm/min	I_f , A	
	$D_0 = 22,8$ mm	$D_0 = 12,6$ mm
100	1340	530
110	1360	536
120	1378	542
130	1393	547
140	1407	551
150	1420	555

Badania doświadczalne

Wyznaczone teoretycznie nastawy prądu oraz prędkości przesuwu elektrody roboczej zostały sprawdzone w toku doświadczeń. Stosowano następujące wydatki elektrolitu:

- 45 l/min dla $D_0 = 22,8$ mm,
- 30 l/min dla $D_0 = 12,6$ mm.

Średnice otworów po rozwiercaniu elektrochemicznym zmierzono za pomocą ręcznego przyrządu trzypunktowego (średnicówki) wyposażonego w śrubę mikrometryczną, o nominalnej dokładności ± 5 μ m.

W związku z rozbiciem otworu na wyjściu oraz wejściu próbki do dalszych analiz wykorzystano pomiary wykonane w centralnej części próbek, gdzie proces rozwiercania

TABLICA III. Wyniki doświadczeń rozwiercania elektrochemicznego otworów o średnicy początkowej 22,8 mm

Nastawy		Średnica końcowa otworu, mm				
v_f , mm/min	I_f , A	po obróbce	wynikająca z symulacji dla:			
			$E = 0$ V	$E = 0,5$ V	$E = 1$ V	$E = 2$ V
100	1340	23,61	23,62	23,58	23,54	23,47
110	1360	23,55	23,56	23,52	23,49	23,41
120	1378	23,48	23,50	23,47	23,44	23,37
130	1393	23,44	23,46	23,43	23,40	23,33
140	1407	23,41	23,42	23,39	23,36	23,30
150	1420	23,37	23,38	23,35	23,33	23,27

TABLICA IV. Wyniki doświadczeń rozwiercania elektrochemicznego otworów o średnicy początkowej 12,6 mm

Nastawy		Średnica końcowa otworu, mm				
v_f , mm/min	I_f , A	po obróbce	wynikająca z symulacji dla:			
			$E = 0$ V	$E = 0,5$ V	$E = 1$ V	$E = 2$ V
100	530	13,24	13,25	13,22	13,20	13,14
110	536	13,19	13,20	13,18	13,15	13,10
120	542	13,15	13,16	13,14	13,11	13,06
130	547	13,11	13,12	13,10	13,07	13,03
140	551	13,08	13,09	13,07	13,04	13,00
150	555	13,05	13,06	13,04	13,02	12,97

elektrochemicznego przebiega stabilnie, w stanie ustalonym. Porównanie wyników obróbki z wartościami wyznaczonymi analitycznie zaprezentowano w tabl. III i IV.

Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych doświadczeń oraz ich porównanie z wynikami symulacji umożliwiły oszacowanie wartości parametrów na potrzeby dalszych symulacji obróbki elektrochemicznej otworów wykonanych w stali 30H2M2F. Można stwierdzić, że zarówno w przypadku otworów o dużej średnicy początkowej (>20 mm), jak i mniejszej (ok. 12,6 mm) spadek potencjału w warstwach przyelektrodowych jest pomijalny podczas analitycznego wyznaczania parametrów technologicznych procesu obróbki elektrochemicznej. Wyniki badań stanowią podstawę do opracowania procesu technologicznego i doboru parametrów obróbki rozwiercania elektrochemicznego w praktyce przemysłowej.

Badania zrealizowano w ramach projektu nr INNO-TECH-K3/IN3/30/227780/NCBR/14 (programu INNO-TECH-3), finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

LITERATURA

- Górski E. „Podstawy technologii uzbrojenia”. Warszawa: Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, 1990.
- Kozak J., Skrabalak G., Stwora A. „Kalibrowanie i bruzdowanie elektrochemiczne długich otworów”. XII Międzynarodowa Konferencja Electromachining EM'15, Bydgoszcz-Rydzyna, 13–15 maja 2015 r. *Mechanik*. 88, 4 (2015) CD: s. 328/142–145 (DOI: <http://dx.doi.org/10.17814/mechanik.2015.4.188>).
- Skrabalak G., Zybura M., Dziedzic J., Czekaj J., Świętek T. „Elektrochemiczne kształtowanie długich otworów”. 5. Międzynarodowa Konferencja Innovative Manufacturing Technology IMT 2016, Krynica-Zdrój, 13–15 kwietnia 2016 r. *Mechanik*. 89, 5–6 (2016): s. 548–549 (DOI: [10.17814/mechanik.2016.5-6.80](http://dx.doi.org/10.17814/mechanik.2016.5-6.80)).
- McGeough J.A. „Principles of electrochemical machining”. London: Chapman and Hall, 1974.