



## Elektrody pakietowe do jednoczesnego drążenia wielu otworów metodami elektroerozyjną oraz hybrydową elektrochemiczno-elektroerozyjną

Batch electrodes for electrodischarge and hybrid electrochemical-discharge simultaneous machining of multiple holes in difficult to cut materials

GRZEGORZ SKRABALAK  
ANDRZEJ STWORA  
STANISŁAW KARCZ\*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.11.523

Zaprezentowano wyniki badań porównawczych dotyczących wykonywania – z użyciem elektrod pakietowych wytworzonych metodami tradycyjnymi oraz w technologii selektywnego spiekania/topienia laserowego – otworów przelotowych o przekroju kwadratowym (o boku 2 mm) w elementach z ulepszonej cieplnie stali 4H13. Porównano procesy drążenia elektroerozyjnego (EDM) oraz hybrydowego elektrochemiczno-elektroerozyjnego (ECDM).

**SŁOWA KLUCZOWE:** obróbka hybrydowa elektrochemiczno-elektroerozyjna (ECDM), drążenie otworów, wytwarzanie przyrostowe, SLS/SLM, elektrody pakietowe

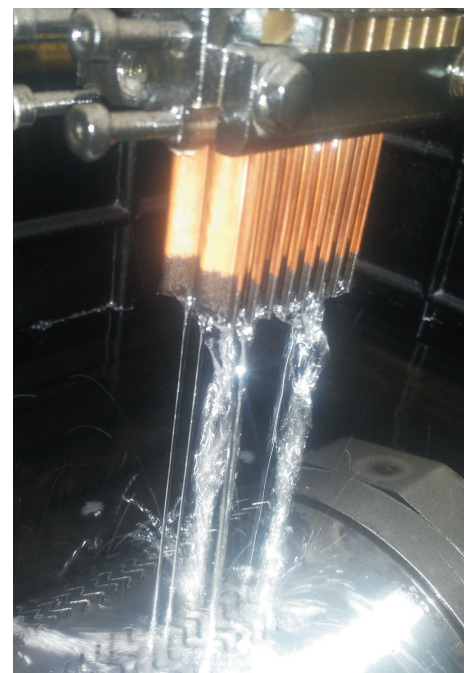
*The paper presents results of experiments in the field of machining of rectangular (side length 2 mm) passing through holes in samples made of hardened 4H13 steel with batch electrodes. Machining of holes was performed using electrodischarge machining (EDM) and hybrid process of electrochemical-discharge (ECDM) drilling with electrodes manufactured in traditional way and using additive manufacturing process of selective laser sintering/melting (SLS/SLM).*

**KEYWORDS:** hybrid electrochemical-discharge machining (ECDM), hole drilling, additive manufacturing, SLS/SLM, batch electrodes

W ostatnich latach wymagania dotyczące wytrzymałości i dokładności wymiarowej wytwarzanych części stale rosną, dlatego konieczne jest wprowadzanie nowych materiałów i narzędzi oraz metod kształtowania i obróbki. Istotnym zagadnieniem związanym z kształtowaniem materiałów konstrukcyjnych jest jednoczesne zapewnienie wysokiej dokładności i efektywności/wydajności procesu obróbki. Współczesne narzędzia skrawające oraz techniki obróbki skrawaniem umożliwiają realizację większości zadań obróbkowych, które kiedyś były zarezerwowane wyłącznie dla metod obróbki bezstykowej. Jednakże w przypadku wykonywania otworów o przekroju innym niż okrągły lub o niewielkich rozmiarach obróbka skrawaniem nie jest alternatywą dla niekonwencjonalnych, bezstykowych metod usuwania materiału.

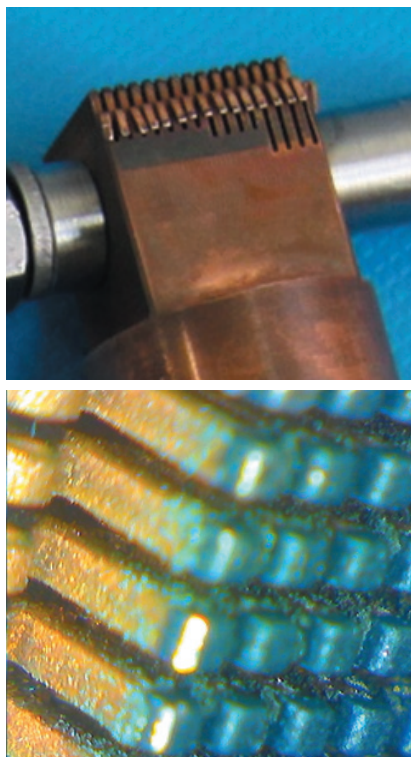
Jednym z kierunków prac badawczych i rozwojowych nad zwiększaniem efektywności obróbki bezstykowej (w tym drążenia elektroerozyjnego) jest zastosowanie wielu elektrod roboczych jednocześnie [1]. Takie rozwiązanie – mimo że znacząco podnosi wydajność procesu obróbki elektroerozyjnej – jest drogie i trudne do wdrożenia w praktyce przemysłowej, zwłaszcza że wymaga użycia generatora wielokanałowego oraz izolowanych elektrod. Innym rozwiązaniem pozwalającym na znaczącą poprawę efektywności drążenia elektroerozyjnego jest wykorzystanie elektrod pakietowych – zarówno w skali mikro [2], tj. do drążenia mikrosit, jak i w skali makro, np. do drążenia szczelin w tulejach wykonanych na potrzeby przemysłu spożywczego (rys. 1).

Pakiety elektrod stosuje się również w obróbce elektrochemicznej (ECM), m.in. w drążeniu otworów chłodzących w łopatkach turbin z użyciem elektrod odizolowanych od siebie oraz w obróbce strumieniem elektrolitu (Jet-ECM) [3–5].



Rys. 1. Elektroda pakietowa wykorzystywana do elektroerozyjnego drążenia szczelin

\* Dr inż. Grzegorz Skrabalak (grzegorz.skrabalak@ios.krakow.pl), mgr inż. Andrzej Stwora (andrzej.stwora@ios.krakow.pl), mgr inż. Stanisław Karcz (stanislaw.karcz@ios.krakow.pl) – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania



Rys. 2. Elektroda wykonana metodą wycinania elektroerozyjnego (poszczególne końcówki o przekroju kwadratu o boku 2 mm i odległości między nimi 1 mm)

Istotnym problemem jest technologia wytwarzania elektrod pakietowych, w tym związane z nią ograniczenia dotyczące kształtu poszczególnych segmentów i końcówek elektrody roboczej. Jedną z najczęściej stosowanych metod jest wycinanie elektroerozyjne (rys. 2), które gwarantuje dużą dokładność, jednak uniemożliwia wytworzenie segmentów innych niż wielokąty wypukłe. W tym przypadku nie ma też możliwości wykonania kanałów zapewniających bezpośrednie doprowadzenie cieczy roboczej do strefy obróbki (do poszczególnych końcówek elektrody), co negatywnie wpływa na zdolność do oczyszczania (przepłukiwania) szczeliny roboczej i tym samym powoduje spowolnienie procesu obróbki oraz istotnie ogranicza maksymalną głębokość otworów drążonych w ten sposób.

Zastosowanie metod wytwarzania przyrostowego, w tym technologii selektywnego spiekania/topienia laserowego (SLS/SLM), pozwoli pokonać ograniczenia związane z kształtem elektrody i jej poszczególnych końcówek oraz wykonaniem kanałów doprowadzających ciecz roboczą (dielektryk lub elektrolit) bezpośrednio do strefy obróbki przez końcówki elektrody.

### Metodyka eksperymentu

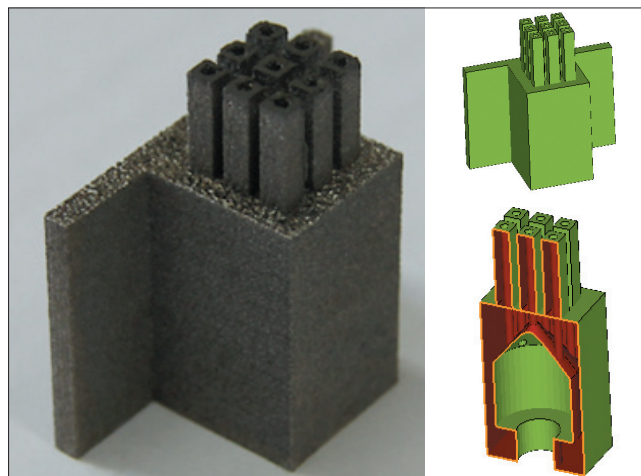
Doświadczenia dotyczące drążenia elektroerozyjnego otworów oraz hybrydowej metody elektrochemiczno-elektroerozyjnej (ECDM) z wykorzystaniem elektrod pakietowych polegały na wydrążeniu przelotowych otworów w próbkach ze stali 4H13/1.4034 (0,45% C; 0,6% Si; 0,5% Mn; 13,5% Cr; 0,015% S; 0,04% P; 0,5% Mo; 0,2% V) o grubości 5 mm, które ulepszono, aby uzyskać twardość ok. 55 HRC.

■ **Stanowisko badawcze.** Doświadczenia związane z drążeniem elektroerozyjnym przeprowadzono z użyciem drążarki elektroerozyjnej MESO 30 CNC i nafty kosmetycznej w roli dielektryka, natomiast doświadczenia związane z obróbką elektrochemiczno-elektroerozyjną (ECDM) wykonano na 3-osiowej obrabiarkie

CNC elektrochemicznej (obie maszyny wyprodukowano w Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie). Na potrzeby badania procesu ECDM stanowisko wyposażono w generator impulsów roboczych, opracowany i wykonany przez Otto von Guericke University w Magdeburgu [6]. Ponadto stanowisko zostało wyposażone w układ sterowania odpowiedzialny za utrzymywanie szczeliny roboczej (w tym celu wykorzystano komputer PC oraz oprogramowanie LabVIEW) – system wyposażony w kartę oscyloskopową (zbiera sygnały dotyczące napięcia na szczeliny roboczej i prądu roboczego podczas procesu drążenia) oraz kartę sterowania napędami (generator trajektorii). Jako elektrolit zastosowano wodny roztwór  $\text{NaNO}_3$  o stężeniu 1% (o gęstości ok.  $1,005 \text{ g/cm}^3$ ) [7].

■ **Elektrody robocze.** Zastosowane elektrody robocze zostały wykonane w dwojaki sposób: metodą tradycyjną, tj. za pomocą wycinania elektroerozyjnego (materiał: stal 316L, miedz – elektroda pakietowa z dziewięcioma końcówkami,  $3 \times 3$ , o przekroju kwadratu o boku 2 mm) oraz z wykorzystaniem technologii SLS/SLM (materiał: stal 316L – elektroda pakietowa z dziewięcioma końcówkami,  $3 \times 3$ , o przekroju kwadratu o boku 2 mm i z otworem o średnicy 1 mm, doprowadzającym ciecz roboczą do szczeliny międzyelektrodowej) – rys. 3.

Elektrody wykonane w technologii SLS/SLM (wykorzystano proszek o ziarnistości  $50 \mu\text{m}$ ) charakteryzowały się gęstością na poziomie ok. 97–98% gęstości prętów 316L, z których wycinano elektrody odniesienia. Elektrody wykonane metodą przyrostową, po ich usunięciu z płyty bazowej, poddano piaskowaniu. Dodatkowo końcówki wyrównano na wycinarce drutowej.



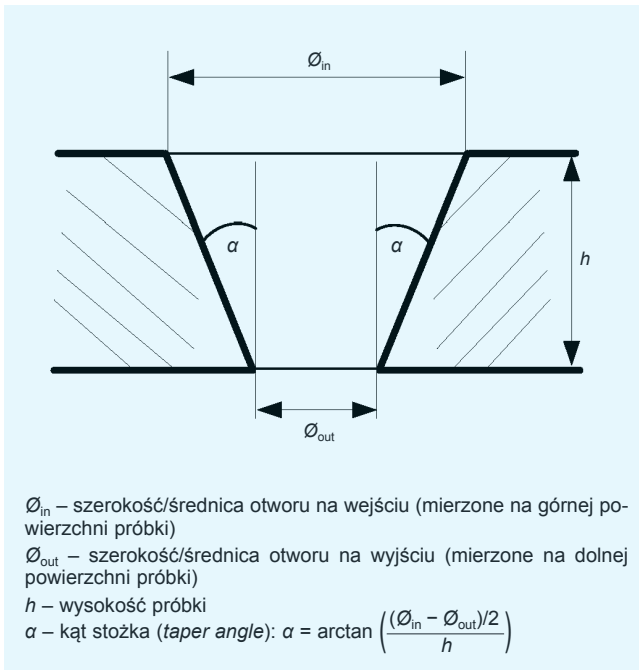
Rys. 3. Elektroda wykonana metodą SLS/SLM

### Wyniki badań

W trakcie badań określono efektywność poszczególnych procesów oraz ich dokładność w odniesieniu do drążenia otworów przelotowych. Dokładność drążenia określono na podstawie porównania wymiarów otworu na wejściu w materiał i na wyjściu z materiału oraz wyznaczonego kąta stożka (*taper angle*) – według schematu zaprezentowanego na rys. 4. Na tym etapie nie szacowano wpływu parametrów technologicznych poszczególnych procesów obróbki na uzyskaną jakość powierzchni.

Ekspertyzy pozwoliły określić również zużycie elektrody roboczej na podstawie dojazdu do styku w punkcie referencyjnym przed obróbką i po obróbce.





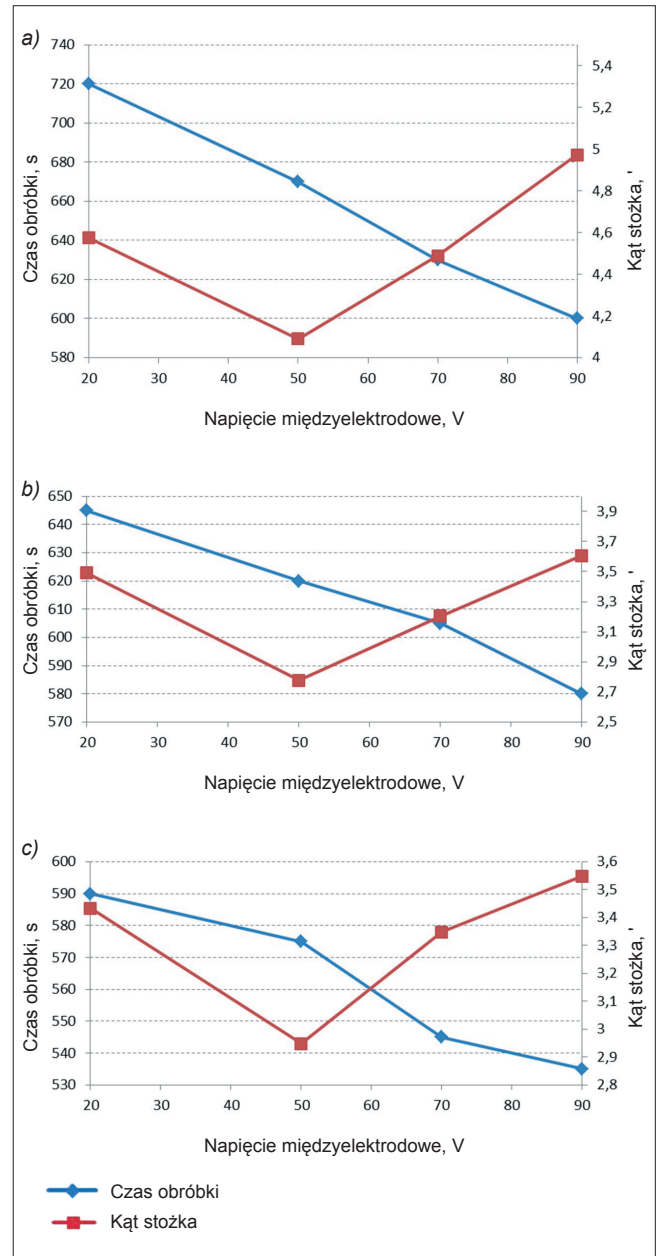
Rys. 4. Schemat pomiaru dokładności obróbki podczas drążenia otworów przelotowych [8]

■ **Obróbka hybrydowa elektrochemiczno-elektroerozyjna (ECDM).** Z uwagi na obecność elektrolitu proces obróbki nie był prowadzony w zanurzeniu. W przypadku stosowania elektrod wycinanych elektroerozyjnie elektrolit był podawany dyszą z jednej strony elektrody, a w przypadku elektrod wykonanych metodą przyrostową – przez otwory w elektrodzie, pod ciśnieniem 15 bar.

Na podstawie wyników badań wstępnych dobrano parametry energetyczne procesu, wykorzystując następujące nastawy: czas impulsu/przerwy 40/60  $\mu$ s, maksymalne natężenie prądu 30 A, maksymalne napięcie międzyelektrodowe 70 V. Na rys. 5 przedstawiono wyniki dotyczące obróbki ECDM z użyciem różnych elektrod pakietowych i przy różnych nastawianych poziomach napięcia międzyelektrodowego.

Podczas doświadczeń związanych z obróbką ECDM nie zaobserwowano zużycia (na długości) elektrod wykonanych z litych materiałów. W przypadku elektrod wykonanych metodą SLS/SLM zużycie nie przekroczyło 0,2 mm. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że wraz ze wzrostem napięcia międzyelektrodowego rośnie kąt stożka (obróbka obciążona jest większym błędem). Jest to związane z większym udziałem roztwarzania elektrochemicznego wzdłuż ścianek drążonego otworu. Zaprezentowane wyniki wskazują również na wyższą wydajność i dokładność obróbki w przypadku zastosowania elektrod wykonanych metodą przyrostową, co jest efektem lepszego płukania szczeliny roboczej w porównaniu z elektrodami wycinanymi z litego materiału. Z kolei krótszy czas obróbki za pomocą elektrody miedzianej to rezultat lepszej przewodności elektrycznej miedzi w porównaniu ze stalą 316L (opór właściwy miedzi jest ok. 44× mniejszy niż opór właściwy stali) i tym samym większej wydajności energetycznej procesu.

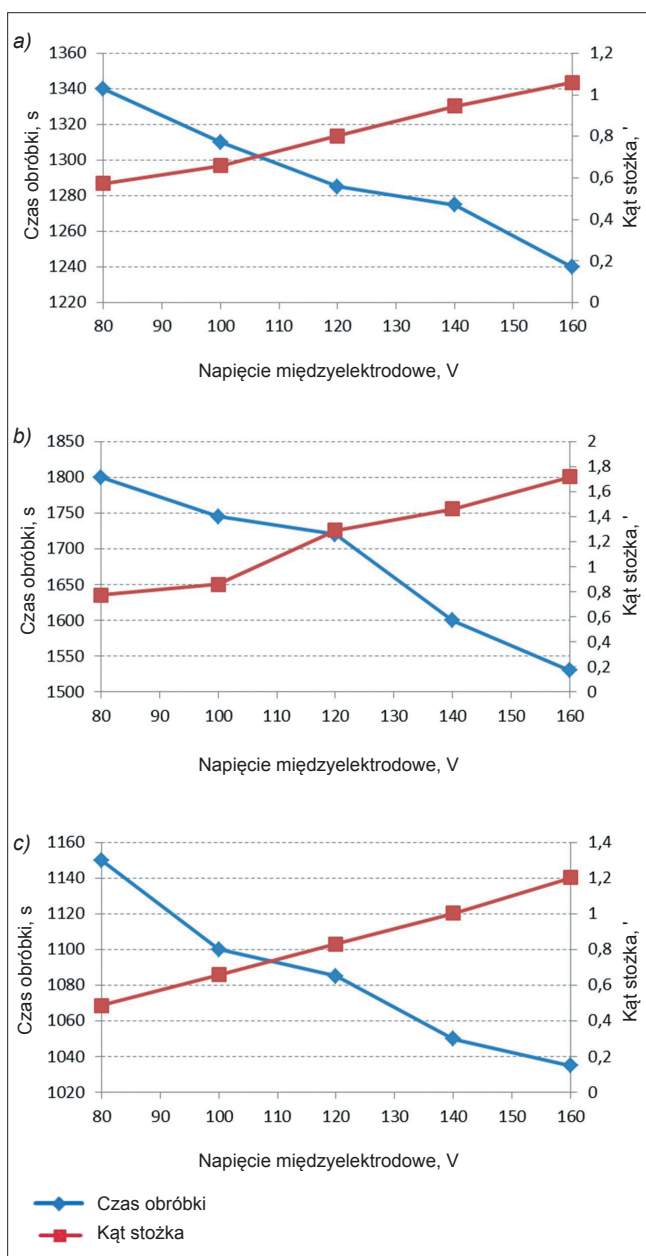
■ **Obróbka elektroerozyjna (EDM).** Podobnie jak poprzednio doświadczenia związane z drążeniem EDM przeprowadzono przy różnych poziomach napięcia międzyelektrodowego. Wyniki zaprezentowano na rys. 6–7.



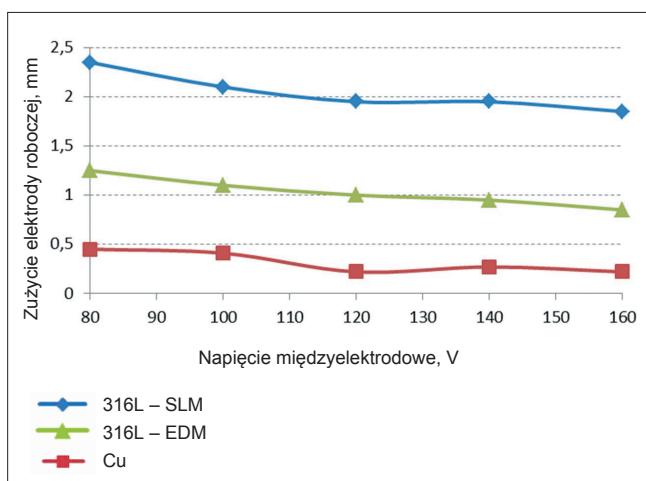
Rys. 5. Zależności kąta stożka oraz czasu obróbki od napięcia międzyelektrodowego podczas procesu obróbki ECDM elektrodami pakietowymi: a) stal 316L – wycinanie drutem, b) stal 316L – SLS/SLM, c) Cu – wycinanie drutem

Na podstawie tych wyników można stwierdzić, że w przypadku drążenia płytkich otworów (o niskiej wartości współczynnika głębokość/średnica) elektrody z litego materiału umożliwiają osiągnięcie lepszych rezultatów niż elektrody wykonane metodami przyrostowymi z proszków metali. Nawet lepsze płukanie szczeliny roboczej nie pozwala na osiągnięcie wydajności obróbki porównywalnej z obróbką elektrodami z litego materiału. Jest to związane z tym, że elektroda robocza wykonana z proszku metalu zdecydowanie bardziej się zużywa (rys. 7).

Istotnym aspektem wydłużającym czas obróbki elektrodami wykonanymi techniką SLS/SLM jest większa chropowatość powierzchni bocznych końcówek roboczych ( $Ra \approx 20\text{--}50 \mu\text{m}$ ) niż w przypadku elektrod wykonanych przez wycinanie drutem ( $Ra \approx 2\text{--}4 \mu\text{m}$ ). Z kolei zastosowanie elektrod miedzianych – o zdecydowanie lepszej przewodności elektrycznej i cieplnej – pozwala na znaczące skrócenie czasu obróbki w porównaniu z elektrodami ze stali 316L.



Rys. 6. Zależności kąta stożka oraz czasu obróbki od napięcia międzyelektrodowego podczas procesu obróbki elektroerozyjnej elektrodami pakietowymi: a) stal 316L – wycinanie drutem, b) stal 316L – SLS/SLM, c) Cu – wycinanie drutem



Rys. 7. Zużycie elektrody roboczej podczas drążenia EDM elektrodami pakietowymi

## Podsumowanie

Na podstawie wyników przeprowadzonych doświadczeń można stwierdzić, że technologia SLS/SLM może być z powodzeniem zastosowana do wytwarzania elektrod pakietowych, zwłaszcza na potrzeby procesów drążenia otworów metodami wykorzystującymi elektrolit w roli medium roboczego, a więc metodami elektrochemiczną oraz elektrochemiczno-elektroerozyjną. Zauważalne niedokładności procesu obróbki mają związek z doborem parametrów technologicznych oraz jakością wykonania elektrod metodą SLS/SLM.

Niewątpliwą zaletą płynącą z zastosowania technologii przyrostowych do wytwarzania elektrod pakietowych jest krótszy czas i tym samym niższy koszt ich wykonania w porównaniu z metodami tradycyjnymi (np. wycinaniem elektroerozyjnym). Wytworzenie 45 elektrod o różnej geometrii końcówek roboczych zajęło ok. 6 h, przy czym ten czas obejmował:

- przygotowanie procesu SLS/SLM – ok. 40 min,
- wytwarzanie/budowanie elektrod – ok. 3 h,
- obróbkę wykończeniową (piaskowanie, wyrównywanie końcówek – wszystkie elektrody wykańczano jednocześnie na płycie bazowej) – ok. 2 h.

Wykonanie pojedynczej elektrody metodą wycinania elektroerozyjnego, wraz z operacjami przygotowawczymi, zajęło ok. 1,5 h, w tym:

- obróbka przygotowawcza (frezowanie/toczenie) wałka miedzianego/316L – ok. 30 min,
- wycinanie elektrody pakietowej (9 końcówek: 3×3) – ok. 1 h.

Z uwagi na możliwość jednoczesnego wykonania metodą przyrostową kilkudziesięciu elektrod czas wykonania pojedynczej elektrody może wynieść 10 min, podczas gdy w przypadku metod tradycyjnych wynosi ok. 90 min. Ta różnica będzie rosła wraz ze wzrostem liczby końcówek roboczych elektrod.

**Badania zrealizowano w ramach projektu nr LIDER/038/683/L-4/12/NCBR/2013 (programu LIDER-4), finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.**

## LITERATURA

- Han F., Kunieda M. "Development of parallel spark electrical discharge machining". *Precision Engineering*. 28 (2004): pp. 65–72.
- Chen S.T., Liao Y.S. "A novel approach for batch production of micro holes by micro EDM". *Proceeding of the 3rd International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*. Borovets, Bulgaria, 2007: pp. 123–126.
- Wang M.H., Zhu D. "Fabrication of multiple electrodes and their application for micro-holes array in ECM". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 41, Iss. 1 (2009): pp. 42–47.
- Kozak J., Łubkowski K., Rozenek M. „Elektrochemiczne drążenie otworów chłodzących w łopatkach turbinowych”. *Zbiór prac VI Konferencji „Technologia przepływowych maszyn wirnikowych”*. Rzeszów, 1988: s. 319–326.
- Kozak J., Rajurkar K.P., Balkrishna R. "Study of electrochemical jet machining process". *Transactions of the ASME – Journal of Manufacturing Sciences and Engineering*. Vol. 118, No. 4 (1996): pp. 490–498.
- De Silva A.K.M., Schulze H.P., McGeough J.A., Zybur M. "Process control and power systems for electrochemical-erosion sinking (ELESIN)". *Proceedings of the 16th International Symposium on Electromachining – ISEM16*, 19–23 April 2010, Shanghai, pp. 389–392.
- Skrabalak G., Kozak J., Zybur M. "Optimization of electrochemical discharge machining process". *Proceedings of ISEM XVI*. Shanghai, China, 2010, pp. 491–496.
- Skrabalak G., Stwora A. "Elektrochemiczne oraz elektrochemiczno-elektroerozyjne drążenie małych otworów w materiałach trudno skrawalnych". *Mechanik*. R. 79, nr 5–6 (2016): s. 546–547.