

# Wybrane zagadnienia obróbki elektrochemiczno-ściernej

## Selected problems met in abrasive electrochemical machining process

ADAM RUSZAJ  
SEBASTIAN SKOCZYPIEC \*

Obecnie obserwuje się dynamiczny rozwój hybrydowych procesów wytwarzania. Ich badania i wykorzystanie wynikają z konieczności stosowania nowych, trudno obrabialnych materiałów oraz poprawy wskaźników technologicznych dotychczasowych procesów wytwarzania. Dotyczy to również procesów obróbki ścierniej, które są wspomagane m.in. drganiami ultradźwiękowymi, roztwarzaniem elektrochemicznym czy wyładowaniami elektrycznymi. W artykule przedstawiono wyniki aktualnych badań oraz nowe zastosowania praktyczne procesu obróbki elektrochemiczno-ściernej (ECG).

**SŁOWA KLUCZOWE:** obróbka elektrochemiczno-ścierna, obróbka specjalnych materiałów, specjalne zastosowania obróbki ścierniej

*Dynamic development of hybrid manufacturing processes takes place nowadays. Research and application of hybrid processes follow the needs to apply almost unworkable materials and improvement of the process parameters specific to the current manufacturing processes. This also applies to abrasive machining processes which are often supported by ultrasonic vibrations, electrochemical dissolution or by electrical discharges. Results of recent investigations and new practical applications of Abrasive Electrochemical Machining are also presented.*

**KEYWORDS:** abrasive electrochemical machining, machining of special materials, specific application of abrasive machining

### Znaczenie hybrydowych procesów wytwarzania

Inżynieria materiałowa rozwija się bardzo dynamicznie i wciąż oferuje nowe materiały o specjalnych właściwościach. Ich racjonalne zastosowanie w praktyce przemysłowej jest możliwe dopiero po opracowaniu efektywnych metod kształtowania. Z kolei dynamiczny rozwój przemysłu lotniczego, kosmicznego, samochodowego, elektronicznego czy branży AGD stawia nowe wymagania dotyczące dokładności obróbki oraz jakości powierzchni. Z powyższych względów w procesach wytwarzania coraz większe zastosowanie znajdują hybrydowe procesy obróbkowe, polegające na równoczesnej i kontrolowanej interakcji różnych mechanizmów procesu oraz (lub) różnych źródeł energii, co wywiera istotny i korzystny wpływ na wskaźniki technologiczne procesu wytwarzania.

### Tendencje rozwojowe hybrydowych procesów obróbki ścierniej

Obróbka ścierna zajmuje bardzo ważne miejsce w procesach przemysłowych i dlatego dąży się do podniesienia efektywności jej stosowania przez zmniejszenie sił szlifowania, zwiększenie wydajności obróbki, obniżenie temperatury w obszarze obróbki, poprawę dokładności wymiarowej i mikrogeometrii powierzchni obrabianej (np. zmniejszenie  $R_a$ ) oraz jakości warstwy wierzchniej (np. wskutek redukcji liczby defektów cieplnych na powierzchni obrabianej). W ostatnim czasie prowadzone są intensywne badania różnych wariantów procesu szlifowania wspomagane drganiami

ultradźwiękowymi, zwłaszcza w obróbce specjalnych materiałów, specjalnych stopów i materiałów kompozytowych [1÷10]. W większości z podanych w literaturze przypadków przez zastosowanie drgań ultradźwiękowych (zwykle drgań o amplitudzie  $A = 1\div 15 \mu\text{m}$  i częstotliwości  $10\div 80 \text{kHz}$ , które wykonuje przedmiot lub narzędzie) uzyskano pożądane efekty. Jednak wpływ wibracji na wyniki szlifowania nie zawsze jest pozytywny. Z tego względu każdy przypadek należy rozpatrywać indywidualnie i optymalizować proces według przyjętych kryteriów.

Kolejnym ważnym kierunkiem rozwoju hybrydowych procesów obróbki ścierniej jest **szlifowanie z chłodzeniem kriogenicznym** ( $T < -150^\circ\text{C}$ ), które również jest zaliczane do procesów hybrydowych (*Media Assisted Machining*) [2, 3, 11÷13]. Nieefektywność konwencjonalnych chłodziw i ich niekorzystny wpływ na środowisko naturalne doprowadziły do zastosowania ciekłego azotu jako alternatywnego chłodziwa, które istotnie zmniejsza siły szlifowania i temperaturę w obszarze szlifowania oraz zapewnia lepszą jakość powierzchni obrabianej (zmniejszenie  $R_a$  i liczby defektów cieplnych), a w dodatku jest nieszkodliwe dla środowiska naturalnego.

Badane są również **procesy obróbki ścierniej wspomagane oddziaływaniem chemicznym, elektrochemicznym czy elektroerozyjnym**. Z uwagi jednak na szkodliwy wpływ stosowanych tutaj płynów roboczych (głównie elektrolitów) na środowisko pracy i środowisko naturalne zmniejszyła się ostatnio intensywność prac badawczych w tym zakresie. Natomiast pewne zalety wspomagania elektrochemicznego, chemicznego i elektroerozyjnego procesów obróbki ścierniej są ważne dla produkcji kosmicznej, lotniczej, zbrojeniowej oraz MEMS (mikro-elektro-mechanicznych-systemów), dlatego też pojawiają się informacje o ich nowych, praktycznych zastosowaniach [1, 2, 14÷20].

W artykule przedstawiono bardziej szczegółowo oryginalne zastosowania wspomagania obróbki ścierniej roztwarzaniem elektrochemicznym w operacjach wykończeniowych.

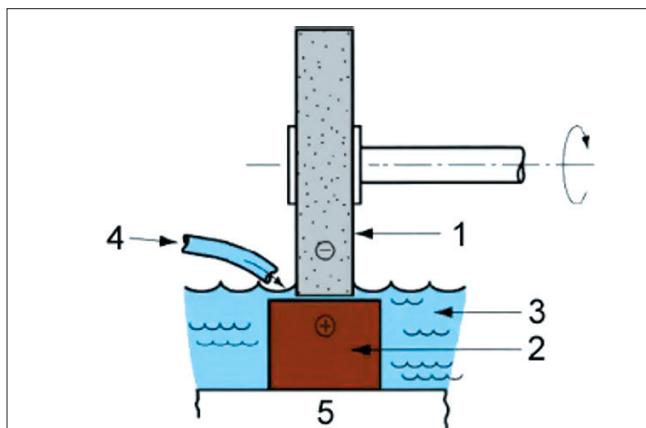
### Elektrochemiczne szlifowanie wykończeniowe po obróbce elektroerozyjnej

Z dotychczasowych badań wynika, że w porównaniu z klasycznym szlifowaniem w procesie szlifowania elektrochemicznego (AECG) [14, 16, 17] maleją: energochłonność, siły szlifowania i zużycie narzędzia, natomiast istotnie rośnie wydajność; właściwości warstwy wierzchniej poprawiają się zwłaszcza w przypadku obróbki elementów z węglików spiekanych, wysoko wytrzymałych stopów (Inconel, Nimonic), stopów tytanu, stopów niklu, *metal matrix composites* (PCD – Co, Al-SiC, Al- $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). W zależności od wariantu obróbki można nawet uzyskać powierzchnie o  $R_a \ll 0,1 \mu\text{m}$ .

Szlifowanie elektrochemiczne zastosowano do obróbki wykończeniowej powierzchni ze stopu **Ti-6Al-4V** po zgrubnej obróbce elektroerozyjnej (EDM) [15]. Dzięki bardzo dobrej odporności na korozję stopy tytanu znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle lotniczym, samochodowym i medycznym. Jednak ich obróbka jest trudna ze względu na niską przewodność cieplną, chemiczną aktywność i niski moduł plastyczności. Konwencjonalne procesy obróbkowe nie są w stanie zapewnić wystarczająco dobrej jakości powierzchni obrabianej.

\* Prof. dr hab. inż. Adam Ruszaj (ruszaj@mech.pk.edu.pl), dr hab. inż. Sebastian Skoczypiec (skoczypiec@mech.pk.edu.pl) – Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji Politechniki Krakowskiej

Często stosowaną metodą kształtowania jest obróbka EDM, po której na powierzchni wyrobu pozostaje warstwa biała i widoczne są kraterki (z wtopionymi produktami erozji) po wyładowaniach elektrycznych, a chropowatość powierzchni  $R_a$  wynosi od 2,69 (dla amplitudy natężenia prądu 3 A) do 5,79  $\mu\text{m}$  (dla amplitudy natężenia prądu 25 A). W warstwie białej występują również mikropęknięcia, które obniżają jakość warstwy wierzchniej. Powierzchnia o takich właściwościach nie spełnia wymagań produkcji lotniczej. Z tego względu zastosowano szlifowanie elektrochemiczne jako operację wykończeniową (rys. 1), a jako narzędzie – ściernicę ze spoiwem miedzianym EC BOND A100V4CD o średnicy 350 mm i szerokości 70 mm. Próby szlifowania elektrochemicznego przeprowadzono dla napięcia  $U=2\div 8\text{ V}$ , posuwu roboczego  $6\div 24\text{ mm/min}$ , elektrolitu  $\text{NaNO}_3$  o stężeniu 180 g/l, który dostarczano do obszaru obróbki w ilości  $500\div 2000\text{ l/h}$ . Głębokość szlifowania była większa od grubości warstwy białej i wynosiła 50  $\mu\text{m}$ . W wyniku operacji szlifowania elektrochemicznego warstwa biała została całkowicie usunięta, a wartość  $R_a$  zmniejszono nawet do 0,06  $\mu\text{m}$ . Taka powierzchnia spełnia wymagania produkcji lotniczej.



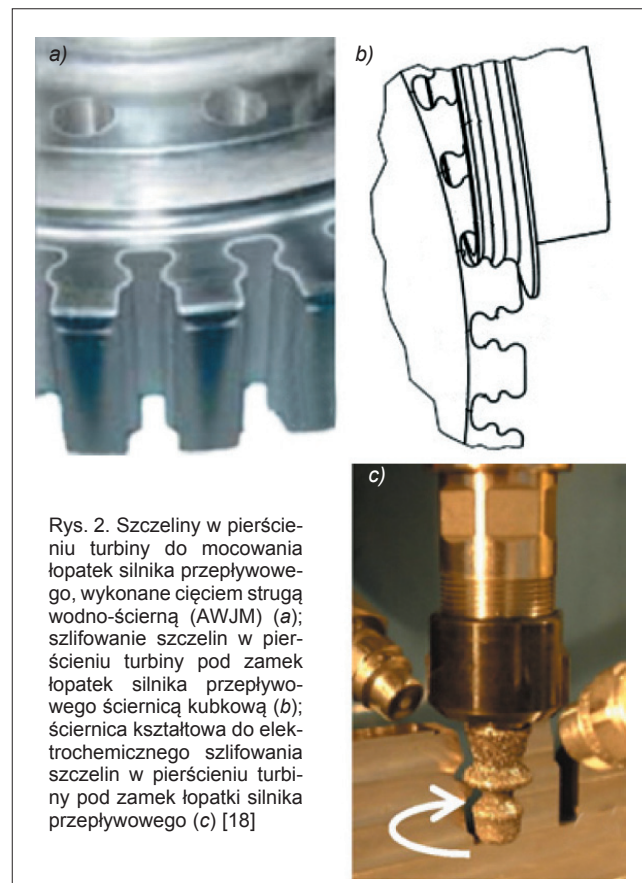
Rys. 1. Schemat szlifowania elektrochemicznego powierzchni po obróbce elektroerozyjnej: 1 – ściernica, 2 – przedmiot obrabiany, 3 – elektrolit, 4 – dopływ elektrolitu, 5 – stół roboczy [15]

### Szlifowanie kształtowe ściernicami walcowymi

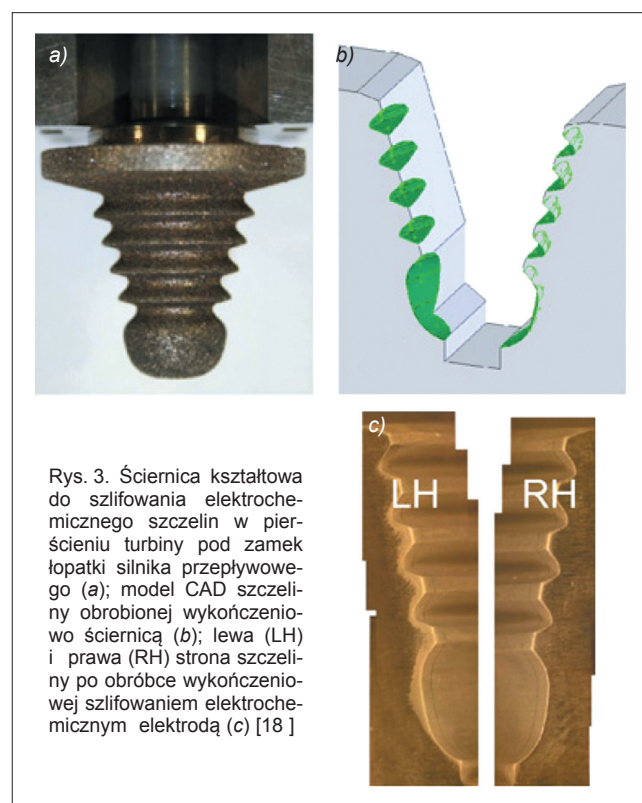
Istotnym ograniczeniem praktycznego zastosowania konwencjonalnego procesu szlifowania ściernicami o małych wymiarach jest ich szybkie zużywanie się. Efektywne zastosowanie ściernic o małych wymiarach jest możliwe w procesie szlifowania elektrochemicznego, w którym zużywanie się ściernicy jest wielokrotnie mniejsze niż w procesie konwencjonalnym – m.in. dzięki zmniejszeniu sił skrawania. Bardzo szerokie i wnikiwe badania wykazały możliwość praktycznego zastosowania szlifowania elektrochemicznego małymi ściernicami ze spoiwem metalowym z ziarnami diamentowymi i z cBN [16–17]. Koncepcję przedstawioną w [16, 17] zastosowano do obróbki stopów lotniczych na bazie niklu z wykorzystaniem kształtowych ściernic walcowych o zmiennej średnicy z przedziału 10÷15 mm [18]. Wykonywano nimi obróbkę wykończeniową kształtowych szczelin w pierścieniach turbin silników przepływowych do montowania łopatek turbin. Obróbka takich szczelin w pierścieniach turbin jest obecnie ważnym celem badań wykonywanych dla kilku czołowych światowych producentów silników lotniczych. Badania te są ukierunkowane na opracowanie procesu obróbki wykończeniowej alternatywnej dla przeciągania.

Najczęściej stosowane obecnie metody obróbki zgrubnej to: frezowanie konwencjonalne, wycinanie strugą wodno-ścierną (AWJM) oraz wycinanie elektroerozyjne (EDWM). W zależności od dokładności i kształtu wstępnie wykonanych szczelin następną operacją wykończeniową może być obróbka elektrochemiczna z zastosowaniem kształtowej ściernicy (rys. 2 i 3). W procesie obróbki wykończeniowej szlifowaniem elektrochemicznym ściernica była polewana z dwóch dysz.

Najlepsze wyniki uzyskano dla ściernic wykonanych osadzeniem elektrochemicznym (*electroplated*) z ziarnami cBN (B151) przy prędkości obrotowej wrzeciona 2000 obr/min, co dawało prędkość szlifowania  $11\div 15\text{ m/s}$ . Średnia głębokość szlifowania wynosiła 0,92 mm, a uzyskana chropowatość powierzchni  $R_a = 0,65\ \mu\text{m}$ .



Rys. 2. Szczeliny w pierścieniu turbiny do mocowania łopatek silnika przepływowego, wykonane cięciem strugą wodno-ścierną (AWJM) (a); szlifowanie szczelin w pierścieniu turbiny pod zamek łopatek silnika przepływowego ściernicą kubkową (b); ściernica kształtowa do elektrochemicznego szlifowania szczelin w pierścieniu turbiny pod zamek łopatek silnika przepływowego (c) [18]

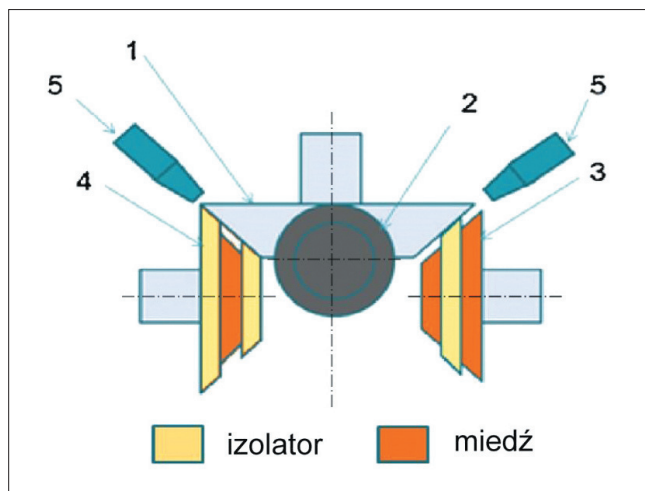


Rys. 3. Ściernica kształtowa do szlifowania elektrochemicznego szczelin w pierścieniu turbiny pod zamek łopatek silnika przepływowego (a); model CAD szczeliny obrabianej wykończeniowo ściernicą (b); lewa (LH) i prawa (RH) strona szczeliny po obróbce wykończeniowej szlifowaniem elektrochemicznym elektrodą (c) [18]

## Obróbka wykończeniowa kół zębatych

Aby zapewnić wysoką jakość pracy przekładni, należy zwrócić szczególną uwagę na dokładność wykonania kół zębatych, ich materiał, smarowanie oraz jakość powierzchni zębów, która zależy od rodzaju obróbki wykończeniowej. Błędy kształtu i chropowatość powierzchni mogą być istotnie zmniejszone w wyniku powszechnie stosowanych procesów, tj. szlifowania oraz docierania. Obie te metody mają jednak wady. Szlifowanie jest drogie, skomplikowane i może powodować przypalenia powierzchni zęba, co zdecydowanie obniża jakość przekładni. Docieranie zwykle zapewnia uzyskanie dobrej jakości powierzchni zęba, ale jest czasochłonne i często wprowadza dodatkowe błędy kształtu zęba. W celu wyeliminowania tych wad opracowano nowy proces hybrydowy, nazwany przez autorów „honorowaniem elektrochemicznym”, aczkolwiek z uwagi na to, że nie stosuje się tutaj ścierniwa, właściwsza wydaje się nazwa „wykończeniowa obróbka elektrochemiczno-mechaniczna” [20]. Zasadę procesu obróbki wykończeniowej przekładni stożkowych wyjaśnia rys. 4. Koło obrabiane 1, koła – katody 3, 4 oraz koło honujące 2 zostały wykonane metodą Gleasona. Koła katodowe 3 i 4 zazębiają się z przedmiotem obrabianym swoimi częściami wykonanymi z izolatorów. Pomiędzy wykonanymi z miedzi częściami kół stożkowych katodowych a kołem obrabianym jest szczelina ~1 mm, do której dyszami 5 podawany jest elektrolit. Po włączeniu zasilacza elektrycznego oraz napędu współpracujących kół powierzchnia koła obrabianego pokrywa się warstwą pasywną. Równocześnie koło obrabiane 1 współpracuje ciasno z kołem honującym 2, niepodłączonym do źródła prądu. Koło obrabiane 1 i koło – narzędzie 2 wykonano z utwardzonej stali stopowej 20MnCr5. Twardość koła obrabianego 1 wynosi 50÷54 HRC, a koła honującego 2 58÷62 HRC. Ta różnica twardości wystarcza, aby przy „ciasnym zazębieniu” z koła obrabianego usunięta została warstwa spasywowana. W badaniach jako elektrolit zastosowano mieszaninę  $\text{NaNO}_3$  (75%) i  $\text{NaCl}$  (25%) o koncentracji 5÷10%. Parametry były następujące: temperatura elektrolitu 27÷37 °C, wydatek elektrolitu 10÷30 l/min, prędkość obrotowa koła obrabianego 40÷80 obr/min, napięcie międzyelektrodowe  $U = 8\div 16$  V. W trakcie prób nie zaobserwowano zużycia koła obrabiającego 2.

Po 2 min współpracy kół 1 i 2 wartość średnia  $R_a$  koła obrabianego 1 została zmniejszona z 1,79 do 1,09  $\mu\text{m}$ , a  $R_{max}$  z 10 do 8,42  $\mu\text{m}$ . Zmniejszenie  $R_a$  wpłynęło korzystnie na zmniejszenie zużycia i obniżenie hałasu pracy przekładni, a zmniejszenie  $R_{max}$  spowodowało zwiększenie jej żywotności. Dla czasu obróbki wynoszącego 2 min optymalne napięcie wynosiło 12 V, a obroty 60 obr/min. Wydłużenie czasu obróbki zmniejsza uzyskane efekty.



Rys. 4. Schemat obróbki wykończeniowej stożkowego koła zębatego: 1 – koło obrabiane (anoda), 2 – koło obrabiające, 3 i 4 – koła – katody, 5 – dysze dostarczające elektrolitu do obszaru obróbki [20]

## Podsumowanie

Procesy hybrydowe są obecnie przedmiotem intensywnych badań w wielu ośrodkach uniwersyteckich i przemysłowych. Najszerszą grupę procesów hybrydowych stosowanych w przemyśle stanowią hybrydowe procesy obróbki ścierniej. Najbardziej intensywne badania są prowadzone w zakresie wspomaganie procesów obróbki ścierniej drganiami ultradźwiękowymi, chłodzeniem kriogenicznym oraz wyładowaniami elektrycznymi i roztwarzaniem elektrochemicznym. W artykule skoncentrowano się przede wszystkim na wspomaganie procesów obróbki ścierniej roztwarzaniem elektrochemicznym. Zaprezentowano przykłady badań oraz praktycznych zastosowań roztwarzania elektrochemicznego do wspomaganie operacji wykończeniowych elementów lotniczych.

## LITERATURA

- Schuh G., Kreysa J., Orilski S. "Roadmap Hybride Produktion". *Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*. 104, 5 (2009): pp. 385÷391.
- Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., Micintosh D. "Hybrid processes in Manufacturing". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 1252 (2014).
- Lauwers W. "Surface Integrity in Hybrid Machining Processes". *Procedia Engineering*. 19 (2011): pp. 241÷251.
- Skoczypiec S., Ruszaj A. "A sequential electrochemical – electrodischarge process for microparts manufacturing". *Precision Engineering*. Vol. 38, Iss. 3 (July 2014): pp. 680÷690.
- Zhao B., Wu Y.G., Jiao G.F. "Research on micro-mechanism of nanocomposite ceramic in two-dimensional ultrasound grinding". *Key Engineering Materials*. 304 (2008): pp. 344÷348.
- Bhaduri D. et al. "A study on ultrasonic assisted creep feed grinding of nickel-based superalloys". *Procedia CIRP*. 1 (2012): pp. 359÷364.
- Gao G.F. et al. "Research on the surface characteristics in ultrasonic grinding nano-zirconia ceramics". *Journal of Materials Processing Technology*. 209 (2009): pp. 32÷37.
- Ghahramani M. et al. "Ultrasonic-Assisted Grinding of Ti6Al4V Alloy". *Procedia CIRP*. 1 (2012): pp. 353÷358.
- Liang Z. et al. "Experimental study on brittle-ductile transition in elliptical ultrasonic assisted grinding (EUAG) of monocrystal sapphire using single abrasive grain". *Journal of Materials Processing Technology*. 71 (2013): pp. 41÷51.
- Mohsen G.N., Movahhedy M.R., Javad A. "Ultrasonic-Assisted Grinding of Ti6Al4V Alloy". *5th CIRP Conference on High Performance Cutting*, 2012.
- Yildiz Y., Nalbandt M. "A review of cryogenic cooling in machining processes". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 48 (2008): pp. 947÷964.
- Manimaran G., Kumar M.P. "Effect OF cryogenic cooling and sol-gel alumina Wheel on grinding performance of AISI 316 stainless steel". *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 13 (2013): pp. 304÷312.
- Manimaran G., Kumar M.P., Ventkatasamy R. "Influence of cryogenic cooling on surface grinding of stainless steel 316". *Cryogenics*. 59 (2014): pp. 76÷83.
- Kozak J., Oczko K.E. "Selected problems of abrasive hybrid machining". *Journal of Materials Processing Technology*. 109 (2001): pp. 360÷366.
- Hascalik A., Cydas U. "A comparative study of surface integrity of Ti-6Al-4V Alloy machined by EDM and AECG". *Journal of Materials Processing Technology*. 190 (2007): pp. 173÷180.
- Ruszaj A., Chuchro M., Czekaj J., Krehlik M., Zybura-Skrabalak M. "The Investigations Aiming to Increase the Flexibility of Electrochemical Grinding". *International Journal of Electrical Machining*. No. 3 (January 1998): pp. 25÷32.
- Ruszaj A., Zybura-Skrabalak M., Chuchro M., Mleczek A. "Investigations aiming at working out the CAD/CAM system for electrochemical grinding with spherical abrasive tool". *International Journal of Electrical Machining*. No. 5 (January 2000): pp. 35÷40.
- Curtis D.T., Soo S.L., Aspinwall D.K., Sage C. "Electrochemical superabrasive machining of a nickel-based aeroengine alloy using mounted grinding points". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 58 (2009): pp. 173÷179.
- Satyarthi M.K., Pandey P.M. "Modelling of material removal rate in electric discharge grinding process". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 74 (2013): pp. 65÷73.
- Shaikh J.H., Jain N.K. "Modelling of material removal rate and surface roughness in finishing of bevel gears by electrochemical honing process". *Journal of Materials Processing Technology*. 214 (2014): pp. 200÷209. ■