

# Obróbka elektroerozyjno-ścierna – wybrane zagadnienia

## Selected issues to abrasive/electrodischarge machining

ADAM RUSZAJ  
SEBASTIAN SKOCZYPIEC\*

W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój komunikacji lotniczej, co bezpośrednio wpływa na wzrost produkcji samolotów, a tym samym elementów silników lotniczych. Elementy te są wykonywane ze specjalnych, trudno obrabialnych materiałów stopowych i kompozytowych. Ich efektywne kształtowanie metodami tradycyjnymi jest utrudnione i z tego względu często wykorzystuje się obróbkę elektroerozyjną, w której nadatek usuwany jest w wyniku topienia i parowania. To jednak powoduje powstanie na powierzchni obrabianej warstwy wierzchniej o niekorzystnych właściwościach użytkowych. Można je istotnie poprawić przez obróbkę hybrydową elektroerozyjno-ścierną, której nowe zastosowania opisano w artykule.

**SŁOWA KLUCZOWE:** obróbka hybrydowa, szlifowanie i wycinanie elektroerozyjno-ściernie, obróbka elektroerozyjna w mieszaninie dielektryka i ścierniwa, obróbka specjalnych materiałów

*Dynamic development of airplane communication takes place in recent years, which directly results in increase of aircraft and aircraft engine parts production rates. Parts of engines are usually made of special alloys or composite materials difficult to machine with use of traditional methods. For efficient machining of these materials electrodischarge process is applied where allowance material is removed by melting and evaporation effect. However, this method of material removal leaves low quality of the machined surface. The surface finish can be significantly improved by applying the hybrid abrasive/electrodischarge process. Presented in the paper is the new practical application of this process.*

**KEYWORDS:** hybrid machining, abrasive/electrodischarge grinding and wire cutting, electrodischarge machining in the mix of dielectric and abrasive grains, machining of special materials

Rozwój procesów wytwarzania jest stymulowany przez konstruktorów nowoczesnych urządzeń dla przemysłu kosmicznego, zbrojeniowego, lotniczego, motoryzacyjnego, medycznego oraz branży AGD. Przykładowo: przemysł medyczny potrzebuje aparatury, narzędzi (np. chirurgicznych) oraz implantów wykonanych z materiałów charakteryzujących się biokompatybilnością, odpornością na płyny ustrojowe czy brakiem szkodliwego działania na organizm człowieka. Materiały, z których produkowane są współczesne konstrukcje, powinny być tak dobrane, by zapewnić właściwe cechy użytkowe (trwałość, niezawodność, funkcjonalność, estetykę), a także niskie koszty produkcji i eksploatacji. Konstruktorzy powinni również uwzględniać w swoich opracowaniach najnowsze osiągnięcia naukowe, szczególnie w zakresie mikro- i nanotechnologii. Umożliwiają one m.in. miniaturyzację elementów, a tym samym – zmniejszenie zużycia materiałów i energii.

Aby sprostać współczesnym wymaganiom, intensywnie rozwija się wszystkie metody wytwarzania, a zwłaszcza metody hybrydowe, w których kształtowanie elementu odbywa się z jednoczesnym wykorzystaniem kilku mechanizmów obróbkowych i (lub) kilku form energii [1, 2]. Hybrydowe procesy wytwarzania są różnie definiowane zarówno przez badaczy, jak i inżynierów. Zalicza się do nich także procesy o kontrolo-

wanej kombinacji pojawiających się efektów, konwencjonalnie wywoływane przez oddzielne operacje (obróbkę i nadawanie kształtu lub zmianę właściwości warstwy wierzchniej niezwiązane bezpośrednio z procesem obróbkowym). Dobrym przykładem jest połączenie usuwania naddatku z hartowaniem: aby wydzielila się odpowiednia ilość ciepła, stosuje się większe głębokości szlifowania (np. 0,5 mm) i mniejsze prędkości posuwu. Po ochłodzeniu powierzchni płynem obróbkowym osiąga się na powierzchni twardość ~800 HV, a na głębokości 0,3 mm – 650 HV [1, 2].

Wśród metod hybrydowych istotną rolę odgrywają niekonwencjonalne procesy obróbki wykończeniowej, czyli np. połączenie obróbki elektrochemicznej, elektroerozyjnej (EDM – *electrodischarge machining*) i ścierniej. Coraz większe znaczenie ma również wytwarzanie sekwencyjne, np. wykończeniowa obróbka elektrochemiczna, elektroerozyjno- czy elektrochemiczno-ścierna po zgrubnej obróbce elektroerozyjnej [11÷13]. Metody sekwencyjne i hybrydowe uzupełniają się nawzajem w racjonalizacji procesów wytwarzania.

Niniejszy artykuł jest poświęcony procesowi hybrydowemu, w którym nadatek usuwany jest w wyniku wyładowań elektrycznych oraz mechanicznego oddziaływania ziaren ściernych.

### Charakterystyka hybrydowych procesów obróbki elektroerozyjno-ścierniej

Procesy hybrydowe obróbki elektroerozyjno-ścierniej bazują na równoczesnej i kontrolowanej interakcji różnych mechanizmów procesu, czyli usuwania materiału w wyniku wyładowań elektrycznych (wywołujących zjawiska: nagrzewania, topienia, parowania, krzepnięcia) i oddziaływania mechanicznego ziaren ściernych [3÷10]. Oddziaływanie ziaren ściernych jest wymuszane przez ruch narzędzia ściernego względem przedmiotu obrabianego. Można je realizować za pomocą ścierniwa związanego spoiwem (ściernic, osetek, strun, taśm, szczotek z włóknami zawierającymi ścierniwo) lub luźnego, niezwiązanego ścierniwa stanowiącego mieszaninę z dielektrykiem.

W przypadku luźnego ścierniwa ziarna ściernie przepływają wraz z dielektrykiem i uderzają w materiał obrabiany. Gdy ziarno ściernie znajdzie się w obszarze wyładowania, wówczas uzyskuje dodatkową energię kinetyczną, z którą uderza w powierzchnię obrabianą. Jeżeli dodatkowo wprowadzimy drgania ultradźwiękowe elektrody, przedmiotu obrabianego lub dielektryka, to po osiągnięciu progu kawitacji zaistnieją warunki do występowania tego zjawiska. W obszarze kawitacji następują: formowanie, wzrost i gwałtowne zapadanie się (implozja) pęcherzyków wypełnionych gazem. Na skutek tego lokalnie pojawia się bardzo wysokie ciśnienie (~100 MPa; temperatura ~5000 K, prędkość zmian temperatury rzędu 10<sup>7</sup> K/s). Zjawisko kawitacji istotnie zmienia warunki fizyczne w obszarze obróbki [8].

Niezależnie od sposobu mechanicznego oddziaływania ziaren ściernych na obrabiany materiał, podczas wyładowań elektrycznych w obszarze obróbki występują zjawiska: nagrzewania, topienia, parowania i krzepnięcia materiału obrabianego. Nagrzany materiał łatwiej ulega odkształceniom na skutek uderzeń ziaren ściernych, a stopiony materiał w większym stopniu jest „wyciskany/usuwany” z krateru erozyjnego przez przepływający dielektryk – zwłaszcza

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

w przypadku występowania kawitacji, której towarzyszy zjawisko erozji kawitacyjnej [8÷10].

Ocenia się, że w procesie EDM –proszek udział usuwania materiału w wyniku mechanicznego oddziaływania ziaren ściernych jest niewielki. Wynika to z tego, że nawet jeżeli ziarno ściernie znajdzie się w obszarze wyładowania elektrycznego czy implozji pęcherzyka kawitacyjnego, to z uwagi na małą masę jego energia kinetyczna i tym samym udział w usuwaniu nadmiaru wskutek mechanicznego oddziaływania ziaren ściernych zmieszanych z dielektrykiem są zwykle pomijane przez badaczy.

Istotny natomiast okazuje się wpływ proszku (również ścierniwa) na rozkład pola elektrycznego w szczelinie, który powoduje zmianę rozdziału energii wyładowania pomiędzy narzędziem a przedmiotem obrabianym [7, 9, 10]. Na podstawie analizy wyników badań można przypuszczać, że większa ilość energii jest przekazywana do przedmiotu obrabianego, a mniejsza do elektrody roboczej. Dlatego po wprowadzeniu proszku do dielektryka obserwuje się:

- wzrost grubości szczeliny międzyelektrodowej,
- zwiększenie średnicy krateru wyładowczego i zmniejszenie jego głębokości (ale objętość krateru rośnie),
- zwiększenie wydajności obróbki,
- zmniejszenie chropowatości powierzchni,
- wzrost zużycia elektrody.

Ponadto, jeżeli zastosowany zostanie odpowiedni proszek (np. proszek ścierny TiC o twardości 3200 HV i ziarnistości 10  $\mu\text{m}$ ), to zostaje on przynajmniej częściowo wtopiony w warstwę wierzchnią przedmiotu (średnia temperatura w kanale wyładowania wynosi 6000÷12000 K). Zmienia to korzystnie jej właściwości (np. powoduje wzrost twardości i odporności na zużycie, usunięcie warstwy białej). Z tych względów w praktyce nie mówi się o obróbce elektroerozyjno-ścierniej luźnym ścierniwem, ponieważ wprowadzenie materiału proszkowego do dielektryka wpływa na proces obróbki w inny sposób i w znacznie większym stopniu niż oddziaływanie mechaniczne ziaren. Dlatego dalej scharakteryzowano procesy szlifowania i wycinania elektroerozyjno-ściernego, w których udział obróbki ścierniej jest istotny, i które znalazły praktyczne zastosowanie.

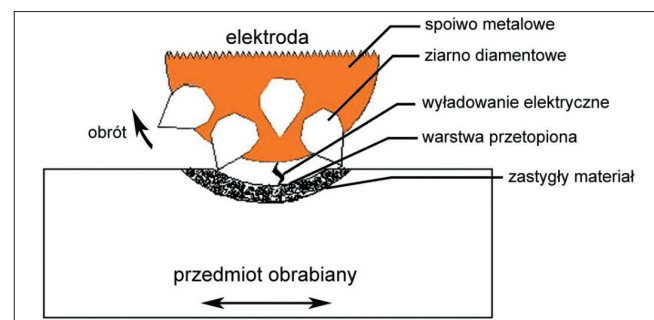
### Szlifowanie elektroerozyjno-ściernie (AEDG)

Według wielu badaczy najlepszym sposobem poprawy efektywności wytwarzania jest połączenie różnych fizycznych i chemicznych procesów działających na materiał obrabiany w jeden proces hybrydowy. Słuszność tego stwierdzenia potwierdza się również w obróbce elektroerozyjno-ścierniej [3÷5]. W procesach AEDG (*abrasive electrodischarge grinding*) występuje efekt synergii, który przejawia się m.in. wzrostem wydajności i zmniejszeniem zużycia ściernicy w trakcie obróbki takich trudno obrabialnych materiałów, jak: płytki z syntetycznym PCD, ceramika techniczna, węgliki spiekane czy materiały kompozytowe o osnowie metalicznej (MMC – *metal-matrix composites*). Wyładowania elektryczne powodują przetopienie części usuwanego materiału. Przetopiony materiał ma gorsze właściwości mechaniczne, dlatego siły działające na poszczególne ziarna są mniejsze i spowalnia się zużycie ściernicy. Ponadto w procesie AEDG występuje samoczynne ostrzenie ściernicy na skutek wyładowań elektrycznych. Podczas wyładowania część energii przekazywana jest do narzędzia, powoduje to podgrzewanie i parowanie spoiwa ściernicy, zwiększając tym samym przestrzeń pomiędzy ziarnami ściernymi i odsłaniając nowe ziarna.

Wymienione zalety i efekty wynikające ze stosowania obróbki elektroerozyjno-ścierniej w operacjach szlifowania i wycinania drutem AWEDM (*abrasive wire electrodischarge machining*) zostały potwierdzone w ostatnich badaniach do-

tyczących obróbki takich materiałów, jak: stopy niklu, ceramika techniczna, węgliki spiekane czy materiały kompozytowe o osnowie metalicznej zbrojone cząstkami [4÷6].

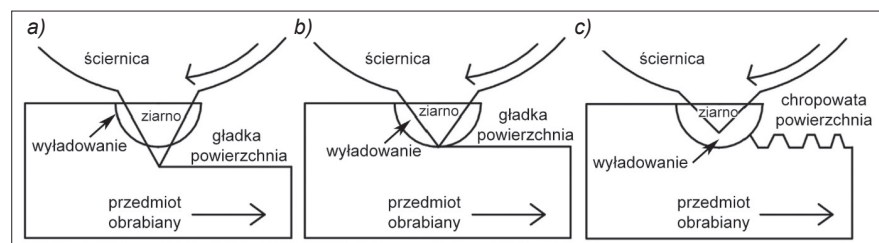
Mechanizm usuwania materiału w AEDG jest bardzo skomplikowany z powodu współzależności energii mechanicznej i cieplnej powodujących usuwanie nadmiaru [4÷6]. W przypadku szlifowania stosuje się ściernicę na osnowie metalicznej, która jest podłączana do katody generatora impulsów elektrycznych (rys. 1). Z uwagi na nowe zastosowania praktyczne tego procesu podejmowane są prace nad jego modelowaniem i optymalizacją. Opracowano m.in. model matematyczny oparty na podstawowych zasadach usuwania nadmiaru w EDM i konwencjonalnym procesie szlifowania. Wykazano, że dominującą rolę w usuwaniu nadmiaru odgrywa energia wyładowań elektrycznych. Wyniki obliczeń według tego modelu różnią się maksymalnie o 2,75% od rezultatów badań doświadczalnych. Badania wskazują, że ziarna ściernie usuwają z powierzchni przedmiotu warstwę przetopioną i ponownie zastygłego materiału (rys. 1) [4].



Rys. 1. Schemat szlifowania elektroerozyjnego ściernicą diamentową na spoiwie wykonanym z brązu [4]

Badania przeprowadzono na materiale ceramicznym przewodzącym prąd elektryczny  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}_w\text{-TiC}$ . Materiał obrabiany charakteryzował się twardością 2400 HV, przewodnością cieplną 63 W/mK i opornością elektryczną właściwą 0,009  $\Omega\cdot\text{cm}$ . Ściernica została wykonana na spoiwie z brązu, z ziarna diamentowego o ziarnistości 800 mesh. Wymiary ściernicy:  $\varnothing 100$  mm, szerokość 20 mm. Jako dielektryk zastosowano naftę, a napięcie biegu jałowego wynosiło  $U = 60$  V. Powierzchnię próbek po obróbce obserwowano skaningowym mikroskopem elektronowym w powiększeniu 1000 $\times$ . Na podstawie obserwacji oceniano, w jakim stopniu została usunięta warstwa przetopiona.

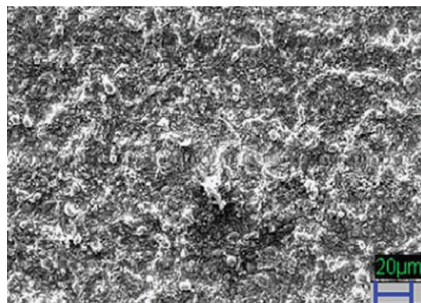
Wyróżniono trzy przypadki (rys. 2): a) głębokość szlifowania jest większa od grubości warstwy przetopionej, b) głębokość szlifowania jest równa grubości warstwy przetopionej oraz c) głębokość szlifowania jest mniejsza od grubości warstwy przetopionej. Praktyczne znaczenie mają przypadki a i b. W przypadku c) na powierzchni zostaje warstwa przetopiona, zwykle o niskiej odporności na zużycie, co obniża jakość warstwy wierzchniej.



Rys. 2. Schemat pracy pojedynczego ziarna ściernego: a) głębokość szlifowania jest większa od grubości warstwy przetopionej, b) głębokość szlifowania jest równa grubości warstwy przetopionej, c) głębokość szlifowania jest mniejsza od grubości warstwy przetopionej [4]

Jeżeli na powierzchni próbki wystąpią ślady szlifowania, to znaczy, że cała warstwa przetopiona oraz część materiału rodzimego zostały usunięte (rys. 4a). Brak śladów szlifowania i nieregularności na powierzchni próbki świadczy o tym, że warstwa przetopiona została dokładnie usunięta, bez





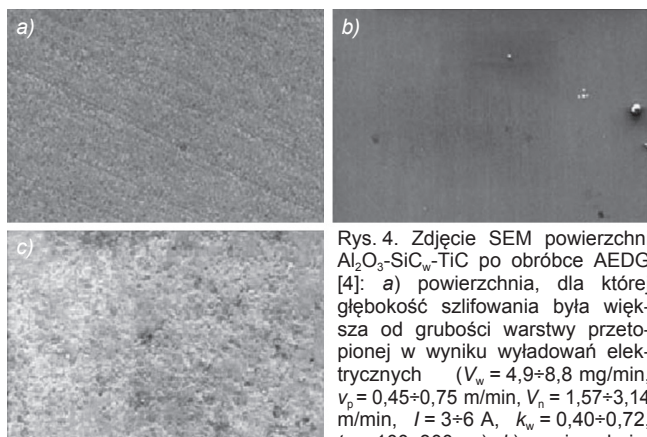
Rys. 3. Zdjęcie SEM powierzchni  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}_w\text{-TiC}$  po obróbce EDM [4]

naruszenia rodzimego materiału (rys. 4b). Oznacza to również, że grubość tej warstwy była stała. Jeżeli niecała warstwa przetopiona została usunięta, to będzie ona widoczna na powierzchni ze śladami kraterów po wyładowaniach (rys. 4c). Podobnie będzie na powierzchni po czystej obróbce EDM (rys. 3).

Autorzy opracowali modele i wykonali obliczenia dla każdego z trzech powyższych przypadków wydajności procesów szlifowania, elektroerozji oraz AEDG. Wynikową wydajność AEDG obliczyli jako sumę ważoną wydajności EDM i szlifowania. Wagi dobierano na podstawie warunków procesu w trzech opisanych przypadkach, w których uzyskuje się inną morfologię powierzchni. Rozróżnienia dokonywano w oparciu o wskaźnik  $F$ :

$$F = I \cdot t_{\text{on}} \cdot k_w = I \cdot t_{\text{on}}^2 / (t_{\text{on}} + t_{\text{off}})$$

gdzie:  $I$  – amplituda natężenia prądu wyładowania,  $t_{\text{on}}$  – czas impulsu,  $t_{\text{off}}$  – czas przerwy pomiędzy impulsami,  $k_w = t_{\text{on}} / (t_{\text{on}} + t_{\text{off}})$  – współczynnik wypełnienia.



Rys. 4. Zdjęcie SEM powierzchni  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}_w\text{-TiC}$  po obróbce AEDG [4]: a) powierzchnia, dla której głębokość szlifowania była większa od grubości warstwy przetopionej w wyniku wyładowań elektrycznych ( $V_w = 4,9 \div 8,8$  mg/min,  $v_p = 0,45 \div 0,75$  m/min,  $V_n = 1,57 \div 3,14$  m/min,  $I = 3 \div 6$  A,  $k_w = 0,40 \div 0,72$ ,  $t_{\text{on}} = 100 \div 300$   $\mu\text{s}$ ); b) powierzchnia,

dla której głębokość szlifowania była równa grubości warstwy przetopionej w wyniku wyładowań elektrycznych ( $V_w = 8,1 \div 9,5$  mg/min,  $v_p = 0,45 \div 0,90$  m/min,  $V_n = 0,79 \div 3,93$  m/min,  $I = 4 \div 5$  A,  $k_w = 0,40 \div 0,56$ ,  $t_{\text{on}} = 300 \div 400$   $\mu\text{s}$ ); c) powierzchnia, dla której głębokość szlifowania była mniejsza od grubości warstwy przetopionej w wyniku wyładowań elektrycznych ( $V_w = 6,9 \div 14,1$  mg/min,  $v_p = 0,45 \div 0,75$  m/min,  $V_n = 1,57 \div 3,14$  m/min,  $I = 4 \div 6$  A,  $k_w = 0,40 \div 0,77$ ,  $t_{\text{on}} = 300 \div 400$   $\mu\text{s}$ )

Opracowany model matematyczny wydajności obróbki w szlifowaniu elektroerozyjnym (przy założeniu, że naddatek jest usuwany w wyniku wyładowań elektrycznych i szlifowania) został zweryfikowany doświadczalnie, co pozwoliło na ocenę jego dokładności. Model umożliwia również świadomy dobór parametrów obróbki w celu uzyskania wyników w wariancie a, b lub c (rys. 2).

Rozróżnienia przypadków można dokonać na podstawie wartości wskaźnika  $F$ . Wyniki pokazują, że:

- dla  $F > 900$  dominuje proces EDM (na powierzchni obrabianej pozostaje warstwa przetopionego materiału obrabianego),
- dla  $600 < F < 900$  dominuje proces EDG (cała warstwa przetopiona zostaje usunięta),

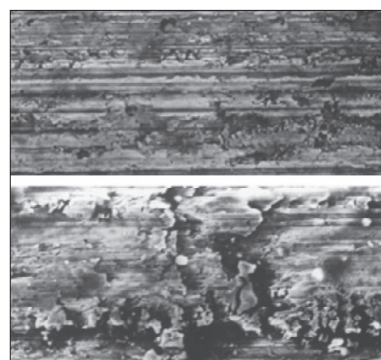
- dla  $F < 600$  dominuje proces szlifowania (usunięta zostaje cała warstwa przetopiona oraz część materiału rodzimego próbki).

Badania wykazały, że wraz ze zmianą parametrów procesu wydajność obróbki zmienia się w przedziale  $4,9 \div 14,1$  mg/min, co z punktu widzenia właściwości obrabianego materiału ( $HV = 2400$ ) jest dobrym osiągnięciem. Morfologię powierzchni oceniano jakościowo na podstawie zdjęć SEM – nie podano wartości liczbowych parametrów struktury geometrycznej powierzchni. Na podstawie zdjęć sklasyfikowano powierzchnie do grup a, b lub c (rys. 4).

Według opublikowanych wyników badań doświadczalnych proces AEDG jest efektywny zarówno w przypadku obróbki wysokowytrzymałych stopów, jak i ceramiki technicznej oraz MMC na bazie Al: whisker- $\text{SiC}_p$ ,  $\text{SiC}_p/\text{A356}$ ,  $\text{SiC}/\text{Al}$ , oraz na bazie Cu-Fe-C (grafit). Szczegółowe badania obróbki MMC: Cu(60%)-Fe(30%)-C(10%) przedstawiono w [5]. W badaniach uwzględniono: amplitudę natężenia prądu ( $2 \div 6$  A), czas impulsu ( $10 \div 30$   $\mu\text{s}$ ), czas przerwy ( $15 \div 25$   $\mu\text{s}$ ) oraz ziarnistość ( $80 \div 240$  mesh). Stosowano ściernice diamentowe (o koncentracji 75%) na spoiwie z brązu. Wydajność obróbki zmieniała się w przedziale:  $\sim 0,04 \div 0,12$  g/min, a wskaźnik chropowatości powierzchni 3D:  $\sim 0,84 \div 1,93$   $\mu\text{m}$ .

Badania procesu AEDG materiału [WC-TiC-(TaNb)C-Co] przedstawione w [2] potwierdzają, że w zależności od warunków obróbki zmienia się udział EDM i szlifowania w usuwaniu naddatku, a to decyduje o składzie i strukturze geometrycznej otrzymanej powierzchni. Skład i struktura geometryczna powierzchni zmieniają się istotnie wraz ze zmianą natężenia prądu (rys. 5):

- dla amplitudy natężenia prądu  $\sim 0,4$  A na powierzchni próbki widać ślady odwzorowania ziaren ściernych, co świadczy o tym, że usunięta została cała warstwa przetopiona i część rodzimego materiału;
- dla amplitudy natężenia prądu  $\sim 2,1$  A na powierzchni próbki nie ma śladów odwzorowania ziaren ściernych, a widok powierzchni przypomina strukturę po obróbce EDM.



Rys. 5. Widok powierzchni po obróbce węglików spiekanych [WC-TiC-(TaNb)C-Co] dla  $I = 0,4$  A (warstwa przetopiona po EDM została całkowicie usunięta – wskazują na to widoczne na powierzchni ślady szlifowania) oraz dla  $I = 2,1$  A (warstwa przetopiona nie została usunięta, struktura powierzchni jest analogiczna jak po EDM).

W obydwu przypadkach czas impulsu wynosił 10  $\mu\text{s}$ , współczynnik wypełnienia 0,5, a prędkość szlifowania 4,7 m/s [2]

Wykazano, że wydajność obróbki rośnie w porównaniu ze szlifowaniem klasycznym od  $\sim 8$  mm<sup>3</sup>/min do  $\sim 16$  mm<sup>3</sup>/min dla amplitudy natężenia prądu  $I = 0,5$  A. Dla większej wartości amplitudy wydajność maleje i dla  $I \approx 2$  A jest mniejsza niż podczas klasycznego szlifowania.

### Wycinanie elektroerozyjno-ściernie (AWEDM)

Wycinanie elektroerozyjne (WEDM – *wire electrical discharge*) nie jest stosowane w przypadku elementów lotniczych wykonujących ruch obrotowy z krytycznymi prędkościami. Wynika to z obniżonej wytrzymałości zmęczeniowej z powodu niekorzystnych właściwości warstwy wierzchniej na skutek występowania na powierzchni przetopionego materiału (tzw. warstwy białej). Aby poprawić właściwości warstwy wierzchniej w procesie WEDM, zastosowano drut z ziarnem diamentowym [2, 6]. Był to drut dostępny na rynku

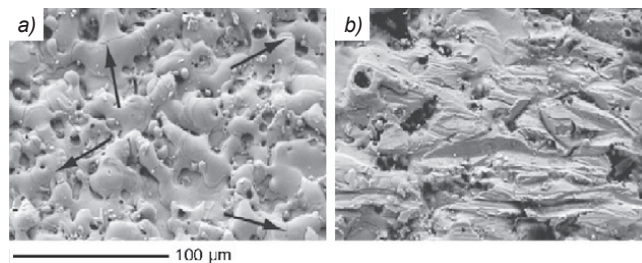
i stosowany w precyzyjnych piłach diamentowych do cięcia półprzewodników. Średnica drutu wynosiła 180  $\mu\text{m}$  i zawierała rdzeń stalowy, a na nim była nałożona warstwa diamentu syntetycznego (wymiary ziarna: 50  $\mu\text{m}$ ) w osnowie niklowej.

Przeprowadzono badania obróbki stali SAE 1018 oraz stopów niklu (Ni 600). W przypadku WEDM występuje warstwa przetopiona o stałej grubości  $\sim 5 \mu\text{m}$ . Przy identycznych parametrach w AWEDM (rys. 6) warstwa przetopiona nie występuje. Badania przeprowadzono dla następujących wartości parametrów:  $U$  do 180 V (optymalny przedział  $U = 108 \div 162 \text{ V}$ ),  $t_{\text{on}} = 4,9 \mu\text{s}$ ,  $t_{\text{off}} = 100 \mu\text{s}$ , naciąg drutu 6,8 N, a prędkość przesuwu drutu 5,5 m/min. W tych warunkach wydajność procesu wycinania wynosiła  $0,02 \div 0,10 \text{ mm}^3/\text{min}$ , a grubość szczeliny  $8 \div 20 \mu\text{m}$ . W procesie WEDM stosowano taki sam drut jak w badaniach AWEDM, tylko bez ziaren ściernych.

Na rys. 7 przedstawiono procentowy wzrost wydajności w AWEDM (w stosunku do WEDM). Wydajność rośnie wraz ze zmniejszaniem napięcia  $U$  oraz wzrostem amplitudy napięcia prądu. Dalszy wzrost wydajności można uzyskać przez zwiększenie prędkości przesuwu drutu. O przebiegu procesów WEDM i AWEDM można również wnioskować na podstawie analizy produktów obróbki. Produkty obróbki dla  $U = 162 \text{ V}$  oraz  $I = 8 \text{ A}$  zawierają w większości kulki charakterystyczne dla procesu EDM. Potwierdza to zerowy wzrost wydajności AWEDM oraz brak siły działającej na drut. Produkty obróbki dla  $U = 108 \text{ V}$  i  $I = 8 \text{ A}$  są w większości typowe dla procesu ściernego, co potwierdza wzrost wydajności o 300% oraz siły działającej na drut do 1 N. Wygląd produktów wskazuje ponadto, że przed usunięciem materiał był poddany działaniu wysokiej temperatury.

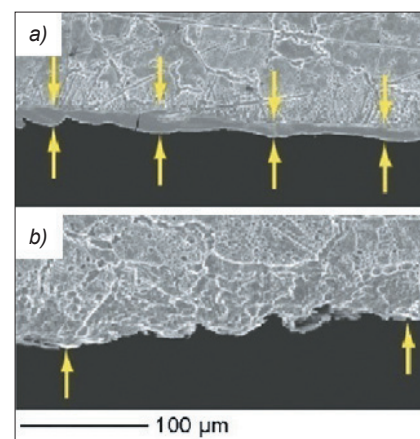
Na rys. 8 widać topografię powierzchni po obróbce WEDM (a) i AWEDM ( $U = 108 \text{ V}$ ,  $I = 8 \text{ A}$ ) (b). W procesie WEDM uzyskano powierzchnię izotropową z nielicznymi

mikropęknięciami zaznaczonymi strzałkami, o  $R_a = 2 \mu\text{m}$ . Dla powierzchni po AWEDM  $R_a = 0,9 \mu\text{m}$  i ma strukturę typową dla obróbki ścierniej.

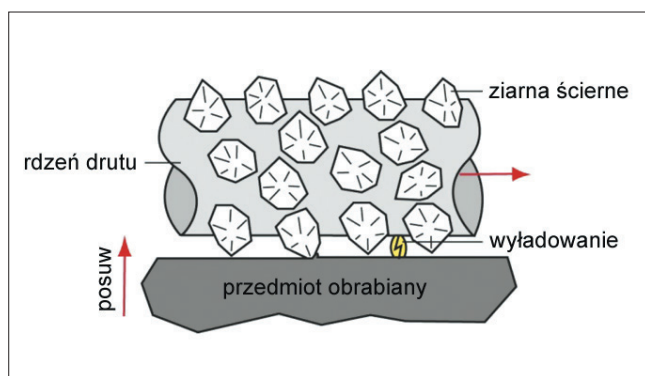


Rys. 8. Zdjęcie powierzchni obrabianej (stal SAE 1018) po obróbce: a) WEDM, b) AWEDM [6]

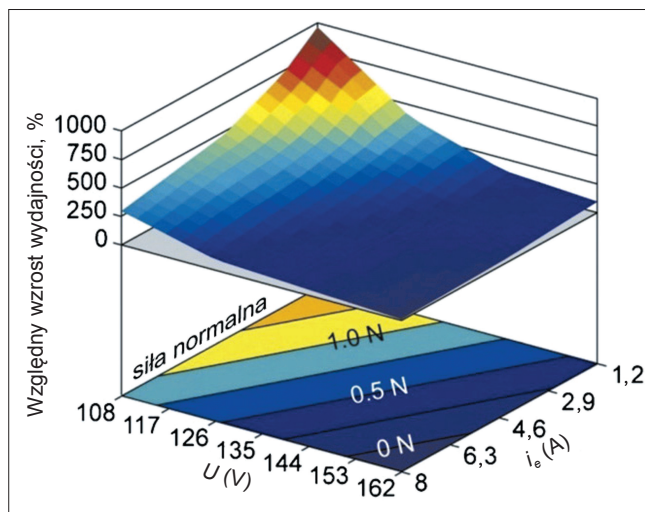
Badania procesu AWEDM przeprowadzono również dla stopu niklu (Ni 600) (rys. 9). Wykazały one, że po cięciu WEDM na powierzchni występuje warstwa przetopiona o grubości  $\sim 5 \mu\text{m}$ . Po cięciu AWEDM warstwa przetopiona nie występuje lub występuje szczałkowo. Elementy z warstwą wierzchnią bez przetopionego materiału mają odpowiednią wytrzymałość zmęczeniową i mogą być stosowane w ruchomych elementach lotniczych.



Rys. 9. Powierzchnia obrabiana (stop niklu Ni 600) po obróbce: a) WEDM, b) AWEDM [6]



Rys. 6. Schemat obszaru obróbki w AWEDM [6]



Rys. 7. Procentowy przyrost wydajności obróbki w zależności od napięcia międzyelektrodowego  $U$ ,  $I_e$  – amplituda napięcia prądu [6]

## Podsumowanie

W przemyśle kosmicznym, lotniczym, medycznym i zbrojeniowym stosowane są materiały ceramiczne (np.  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}_w\text{-TiC}$ ), węgliki spiekane (np.  $[\text{WC-TiC-(TaNb)C-Co}]$ ),



stopy takich materiałów jak tytan (np. Ti-6Al-4V) czy nikiel (np. Ni 600) oraz materiały kompozytowe o osnowie z Cu(60%)-Fe(30%)-C(10%). Materiały te są trudne do kształtowania nawet metodami niekonwencjonalnymi (np. EDM). Szczególnie trudno jest osiągnąć wydajność obróbki i właściwości warstwy wierzchniej akceptowalne w zastosowaniach praktycznych.

Dobre efekty obróbki wykończeniowej uzyskuje się z zastosowaniem szlifowania i wycinania elektroerozyjno-ściernego. Jednak z uwagi na ciepłno-mechaniczny charakter usuwania nadmiaru trudno jest osiągnąć wartość chropowatości  $SR \ll 1 \mu\text{m}$ . Mniejsze wartości parametrów chropowatości powierzchni dla niektórych materiałów można osiągnąć, stosując szlifowanie elektrochemiczne [11, 12] lub sekwencyjną obróbkę elektroerozyjną i elektrochemiczną [13].

Połączenie usuwania nadmiaru w wyniku wyładowań elektrycznych i szlifowania ściernego umożliwia:

- zwiększenie wydajności obróbki zarówno w porównaniu z EDM, jak i ze szlifowaniem mechanicznym,
- uzyskanie zadowalających właściwości warstwy wierzchniej oraz struktury geometrycznej powierzchni,
- zmniejszenie zużycia ziaren ściernych oraz zwiększenie żywotności ściernicy na skutek: zmniejszenia sił działających na ziarna ściernic, występowania procesu samoostrezenia ściernicy (podczas wyładowań elektrycznych część energii przekazywana jest do ściernicy, co powoduje usuwanie materiału spoiwa metalowego, zapobiega zalepianiu się ściernicy i sprzyja odsłanianiu nowych ostrych ziaren) oraz zmniejszenia intensywności tarcia pomiędzy materiałem obrabianym a spoiwem ściernicy, co obniża temperaturę w obszarze szlifowania.

#### LITERATURA

1. Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., Mincintosh D. "Hybrid processes in Manufacturing". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 1252 (2014).
2. Lauwers W. "Surface Integrity in Hybrid Machining Processes". *Procedia Engineering*. 19 (2011): pp. 241÷251.
3. Kozak J., Oczko K.E. "Selected problems of abrasive hybrid machining". *Journal of Materials Processing Technology*. 109 (2001): pp. 360÷366.
4. 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.
5. Shrivastava P.K., Dubey A.K. "Experimental modeling and optimization of electric discharge diamond face grinding of metal matrix composite". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 69 (2013): pp. 2471÷2480.
6. Menesis I., Koshy P. "Assesment of abrasion assisted material removal in wire EDM". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 57 (2008): pp. 195÷198.
7. Wong Y.S., Lim L.C., Rahuman I., Tee W.M. "Near-mirror phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric". *Journal of Materials Processing Technology*. 79 (1998): pp. 30÷40.
8. Ichida Y., Sato R., Morimoto Y., Kobayashi K. "Material removal mechanisms in non-contact ultrasonic abrasive machining". *Wear*. 258 (2005): pp. 107÷114 (available online at: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)).
9. Chen Y.F., Lin Y.C.H. "Surface modification of Al-Zn-Mg alloy using combined EDM with ultrasonic machining and addition of TiC particles into dielectric". *Journal of Materials Processing Technology*. 209 (2009): pp. 4343÷4350.
10. Prihandana G.S., Mahardika M., Hamdi M., Wong Y.S. Mitsui K. "Effect of micro-powder suspension and ultrasonic vibration of dielectric fluid in micro-EDM process –Taguchi approach". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 49 (2009): pp. 1035÷1041.
11. 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.
12. Ruszaj A., Skoczypiec S. „Wybrane zagadnienia obróbki elektrochemiczno-ściernej”. *Mechanik*. Nr 2 (2015): s. 103÷105.
13. Skoczypiec S., Ruszaj A. "A sequential electrochemical – electrodischarge process for microparts manufacturing". *Precision Engineering*. Vol. 38 (July 2014). Iss. 3: pp. 680÷690. ■