

Niekonwencjonalne procesy kształtowania materiałów ceramicznych i kompozytowych

Unconventional processes of ceramic and composite materials shaping

ADAM RUSZAJ*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.3.39>

Aby uzyskać wysoką jakość elementów maszyn czy narzędzi, coraz częściej stosuje się materiały ceramiczne oraz kompozytowe na osnowie metalicznej lub ceramicznej. Efektywne kształtowanie tych materiałów obróbką skrawaniem czy szlifowaniem klasycznym jest utrudnione z uwagi na ich bardzo dobre właściwości mechaniczne. Racjonalnym rozwiązaniem jest zastosowanie metod niekonwencjonalnych, takich jak obróbka elektrochemiczna, elektroerozyjna czy elektroerozyjno-elektrochemiczna (ECDM) w przypadku materiałów przynajmniej częściowo przewodzących prąd elektryczny. Materiały ceramiczne nieprzewodzące prądu elektrycznego można kształtować z zastosowaniem odmiany procesu ECDM nazywanej *spark assisted chemical engraving (SACE)*.

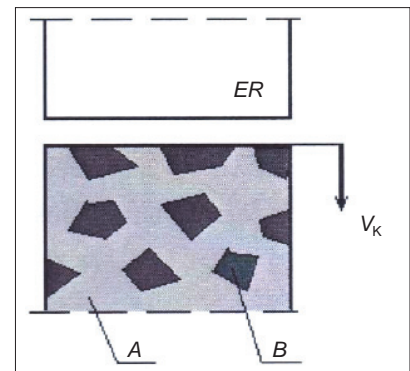
SŁOWA KLUCZOWE: obróbka niekonwencjonalna, materiały ceramiczne, materiały kompozytowe

In order to reach the high quality parts of machines or tools very often ceramic or composite materials on metallic or ceramic base are being applied. Efficient shaping above mentioned materials using cutting or classical grinding is difficult because of their high mechanical properties. Rational solution is application of unconventional machining methods as: electrochemical, electrodischarge or electrochemical – electrodischarge (ECDM) in case when machined materials are at least partly conductive of electrical current. In case of shaping ceramic materials uncondutive for electrical current the rational solution can be application of Spark Assisted Chemical Engraving (SACE) process – the special kind of ECDM process.
KEYWORDS: unconventional machining processes, ceramic materials, composite materials

Materiały ceramiczne, materiały kompozytowe na osnowie metalicznej lub ceramicznej przy odpowiednim dobranym składzie mają bardzo dobre właściwości mechaniczne (wysoką twardość, wytrzymałość, wytrzymałość zmęczeniową, odporność na zużycie itp.). Takie właściwości utrudniają, a nawet uniemożliwiają obróbkę metodami mechanicznymi (skrawaniem, szlifowaniem).

Schemat obróbki materiałów kompozytowych przedstawiono na rys. 1. Materiały na osnowie metalicznej (np.: Al, Al–Mg, Al–Li, Mg, Ti, Ni, Co, Cr i ich stopy) są umacniane cząstkami ceramicznymi (np.: SiC, PCD, Al₂O₃, ZrO₂, Si₃N₄, WC, TiC, TaC, TiB₂, B₄C), natomiast cermetale to materiały na osnowie ceramicznej (np.: Al₂O₃, Zr[SiO₄], TiC, Si₃N₄, ZrO₂, B₄C) zmieszanej z proszkami metali (W, Co, Ni, Fe, Cu) [1]. Wymienione materiały zachowują zwykle bardzo dobre właściwości mechaniczne również w wysokiej temperaturze. Istnieje jeszcze grupa materiałów, które są szeroko stosowane w wytwarzaniu MEMS (systemów mikroelektromechanicznych); to różnego rodzaju szkła, kwarc, krzem i jego związki (tlenek krzemu, azotek krzemu, PZT (cyrkonian – tytanian ołowiu)). Z nich

powstają mikroelementy wchodzące w skład MEMS. Często konieczne jest wykonywanie w tych materiałach mikrootworów, aby utworzyć połączenia elektryczne między warstwami [1–3]. Wymienione materiały – ze względu na ich bardzo dobre właściwości mechaniczne: wysoką wytrzymałość i twardość (np. Al₂O₃), wysoką twardość i kruchość (np. szkło) lub małe wymiary (wymiar mikroelementów w MEMS << 1 mm) – należy kształtować z zastosowaniem procesów, w których usuwanie nadmiaru nie zależy istotnie od właściwości mechanicznych materiału obrabianego.



Rys. 1. Schemat obróbki elementu wykonanego z materiału kompozytowego. A – materiał osnowy (materiał metalowy lub ceramiczny), B – cząstki fazy umacniającej (ziarna metalowe lub ceramiczne), ER – elektroda robocza

Warunek ten spełniają: obróbka elektrochemiczna (ECM), elektroerozyjna (EDM) oraz obróbka elektrochemiczno-elektroerozyjna (ECDM), w której następuje koincydencja procesów elektrochemicznego (reakcji elektrochemicznych) i elektroerozyjnego (wyładowań elektrycznych).

Charakterystyka obróbki materiałów trudno obrabialnych z wykorzystaniem procesów ECM, EDM oraz ECDM

W trakcie obróbki ECM materiał z przedmiotu obrabianego (anody) jest usuwany w wyniku jonizacji atomów, a następnie ich dyfuzji w głąb szczeliny międzyelektrodowej, gdzie wchodzi w dalsze reakcje i tworzą – zwykle nierozpuszczalne – wodorotlenki. Jeżeli w materiale występują ziarna niemetaliczne, to po rozтворzeniu otaczającej fazy metalicznej są one wypłukiwane przez przepływający przez szczelinę międzyelektrodową elektrolit i w obrabianym materiale pozostaje pusta przestrzeń. Z tego względu zastosowanie ECM do obróbki materiałów kompozytowych z fazą niemetaliczną jest ograniczone wymiarami ziaren tej fazy. Jeśli ziarno niemetaliczne nie zostanie wypłukane, to w jego otoczeniu zmniejsza się grubość szczeliny międzyelektrodowej, rośnie lokalnie koncentracja wodoru wydzielającego się na katodzie, co może prowadzić do wyładowań elektrycznych uszkadzających elektrodę roboczą oraz przedmiot obrabiany. Dlatego obróbkę elektrochemiczną można stosować efektywnie przede wszystkim do kształtowania jednorodnych materiałów metalicznych lub o osnowie metalicznej z drobnymi (mikro, nano) ziarnami fazy umacniającej [1–3].

* Prof. dr hab. inż. Adam Ruszaj (ruszaj@mech.pk.edu.pl) – Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji Politechniki Krakowskiej, Instytut Techniczny Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Nowym Sączu

W obróbce elektroerozyjnej (EDM) materiał obrabiany jest usuwany w wyniku wyładowań elektrycznych. W ich otoczeniu wydziela się ciepło, a temperatura osiąga lokalnie wartość $6000 \div 12\,000$ K. Dlatego materiał (fazy metaliczne i niemetaliczne) ulega stopieniu, częściowemu odparowaniu i tworzy kratery na powierzchni obrabianej. Z uwagi na to, że metodą EDM (drażeniem czy wycinaniem) można efektywnie obrabiać tylko materiały przewodzące prąd elektryczny, często do materiałów nieprzewodzących dodaje się fazę przewodzącą prąd elektryczny. Udział procentowy takiej fazy wywiera istotny wpływ na przebieg i wyniki obróbki EDM [1–3].

Obróbką ECDM można kształtować zarówno materiały przewodzące prąd elektryczny, jak i nieprzewodzące. W przypadku obróbki materiałów przewodzących prąd elektryczny w obszarze usuwania materiału następuje koincydencja procesu roztwarzania elektrochemicznego i wyładowań elektrycznych. W wyniku reakcji elektrochemicznych z anody usuwana jest – atom po atomie – faza metaliczna przedmiotu obrabianego, która ostatecznie tworzy wodorotlenki. Na powierzchni katody jako reakcja równoważna następuje wydzielanie się wodoru i w miejscach, gdzie jego koncentracja przekracza 70%, występują wyładowania elektryczne. Na skutek wysokiej temperatury w obszarze wyładowania (ok. $6000 \div 12\,000$ K) następuje parowanie i topienie materiału obrabianego oraz elektrody roboczej (narzędzia), parowanie elektrolitu, trawienie itp., co potęguje niejednorodność mieszaniny elektrolit–produkty obróbki i przy odpowiednio dobranych warunkach wspomaga procesy ECM i EDM [1–3].

Koncepcja wykorzystania procesu hybrydowego elektrochemiczno-elektroerozyjnego (ECDM) do kształtowania materiałów trudno obrabialnych była i jest intensywnie rozwijana [4–6]. Badania materiałów metalowych (np. stali nierdzewnej 1Cr18Ni9Ti) wykazały, że wydajność obróbki ECDM może być wielokrotnie większa (nawet 50 razy) niż w procesie elektrochemicznym, a jakość powierzchni obrabianej – znacznie lepsza niż w EDM. Również zużycie elektrody roboczej jest znacznie mniejsze niż w klasycznym procesie EDM. Badania dotyczyły również materiałów kompozytowych na osnowie metalicznej (np. aluminium 6061 umacnianego ziarnami Al_2O_3 w ilości $10 \div 20\%$) [1, 4]. Wyniki obróbki ECDM takich materiałów również są obiecujące, chociaż zrealizowano je dla niewielu przypadków. Proces ECDM zastosowano także z pozytywnym skutkiem do obróbki stopu Nd-Fe-Ba oraz materiału kompozytowego na osnowie ceramicznej ZrB_2 -Cu.

Aby podtrzymać proces obróbki w przypadku materiału o małej przewodności lub nieprzewodzącego prądu elektrycznego, należy zastosować dodatkową anodę (np. wykonaną z Pt). Prąd płynie między dodatkową anodą i katodą, na której wydziela się wodór, i zachodzą wyładowania elektryczne pomiędzy katodą oraz elektrolitem. W wyniku tych wyładowań z przedmiotu obrabianego usuwany jest materiał (poprzez topienie, parowanie, kruszenie oraz dodatkowo termiczne trawienie chemiczne). Ten wariant procesu ECDM nazywany jest w literaturze *spark assisted chemical engraving* (SACE). Został on z dobrym skutkiem zastosowany do obróbki Al_2O_3 , szkła czy ZrO_2 [4, 7].

Wszystkie badania procesu ECDM – zarówno dla metali i ich stopów, materiałów kompozytowych na osnowie metalicznej i ceramicznej, jak i materiałów ceramicznych nieprzewodzących prądu elektrycznego – wskazują na jego zalety przejawiające się stosunkowo: wysoką wydajnością, dobrą jakością powierzchni oraz małym zużyciem elektrody – oczywiście przy optymalnie dobranych warunkach obróbki. Pomimo to proces ten nie został

jeszcze szeroko zastosowany w praktyce przemysłowej, m.in. z powodu słabego upowszechnienia wyników badań. Z tego względu celem niniejszego artykułu jest przedstawienie praktycznych zastosowań procesów EDM oraz ECDM (również w wariacie SACE).

Obróbka elektroerozyjna materiałów kompozytowych na osnowie ceramicznej

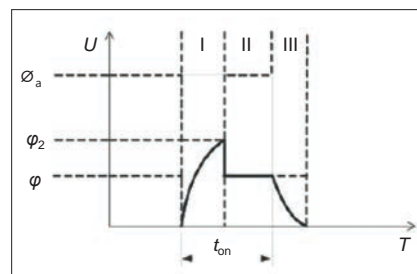
Wśród materiałów ceramicznych (np. Si_3N_4 , Al_2O_3 , B_4C) ZrO_2 ma bardzo dobrą wytrzymałość (~ 12 GPa), ale umiarkowaną twardość. Można ją zwiększyć przez dodanie fazy przewodzącej. Poprawia to przy okazji przewodność elektryczną i pozwala na obróbkę elektroerozyjną takiego materiału [8]. Aby polepszyć właściwości mechaniczne i umożliwić efektywniejszą obróbkę EDM, do ceramiki na bazie ZrO_2 dodawano fazy: WC, TiCN lub TiC w postaci proszków nano, mikro lub ich mieszaniny. Poprzez zmianę udziału procentowego tych faz ($40 \div 60\%$) oraz wymiarów ziaren w fazie przewodzącej można regulować prędkość cięcia elektroerozyjnego w zakresie $3 \div 10$ mm/min. Równocześnie Rz zmienia się w zakresie $9 \div 20$ μ m.

Próby wycinania przeprowadzono na maszynie Charmilles Robofil 240c. Zastosowano drut z brązu o średnicy $\varnothing 250$ μ m, a proces realizowano w wodzie zdejonizowanej o przewodności 5 μ S/cm. Badania potwierdziły, że przez właściwy dobór rodzaju i ziarnistości fazy przewodzącej materiałów ceramicznych na bazie ZrO_2 można istotnie wpływać na prędkość cięcia i chropowatość powierzchni obrabianej, która maleje wraz ze zmniejszaniem prędkości cięcia [8].

Obróbka elektrochemiczno-elektroerozyjna materiałów kompozytowych na osnowie metalicznej

Materiały kompozytowe na osnowie metalicznej mogą być obrabiane zarówno metodą EDM, jak i ECDM.

Rys. 2. Typowy przebieg impulsu napięcia w ECDM; etap I – wzrost napięcia międzyelektrodowego z równoczesnym zachodzeniem roztwarzania elektrochemicznego fazy metalicznej oraz wydzielaniem wodoru aż do osiągnięcia napięcia przebicia φ_2 i zainicjowania wyładowania iskrowego. W momencie rozpoczęcia wyładowania napięcie spada do wartości φ – etap II, w którym zachodzi wyładowanie łukowe trwające do końca impulsu napięcia; w etapie III na skutek efektu pojemnościowego napięcie stopniowo spada do zera [9]

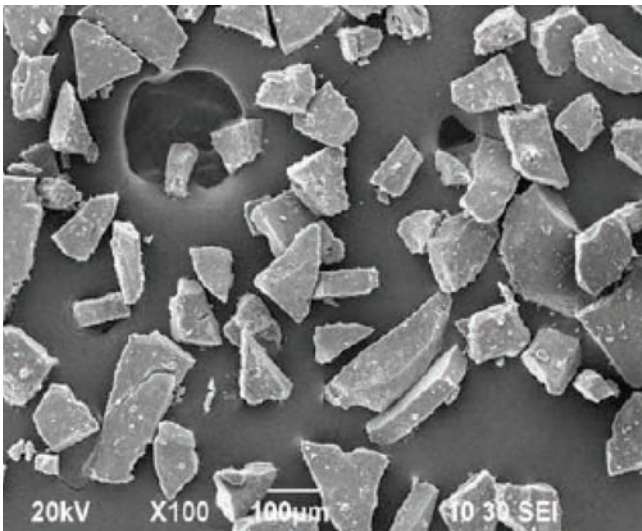


Badania procesu ECDM przeprowadzono dla próbek z materiału kompozytowego na bazie stopu aluminium 359 zawierającego 20% SiC (faza umacniająca). Wymiar ziarna fazy umacniającej wynosił 10 μ m. Jako elektrolit zastosowano $NaNO_3$ o stężeniu $1 \div 1,6\%$. Elektrolit był pompowany przez dyszę do obszaru obróbki.

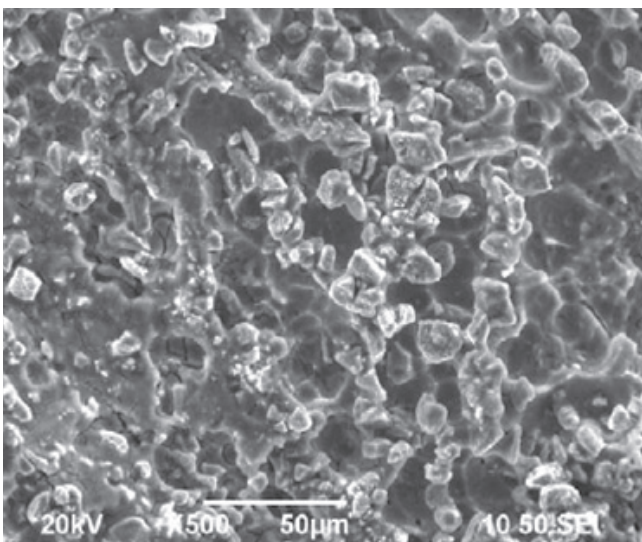
Badano wpływ natężenia prądu wyładowania, czasu impulsu, czasu przerwy oraz stężenia elektrolitu na proces ECDM [9]. Przeprowadzono również wyrzykowe badania procesu EDM. Obróbkę prowadzono przez 3 min. Napięcie przebicia wynosiło: $26 \div 30$ V dla ECDM i 110 V dla EDM. Wydajność obu procesów była porównywalna. Z uwagi na małą koncentrację i przewodność elektrolitu

udział ECM w usuwaniu fazy metalicznej (naddatku) był niewielki. Wartości liczbowych wydajności nie podano.

Na rys. 3 przedstawiono wybrane duże i nieregularne produkty obróbki. Ich wymiary i kształt wskazują, że podobnie jak w EDM podstawowym mechanizmem usuwania naddatku w procesie ECDM jest wykruszanie spowodowane naprężeniami cieplnymi. Analiza powierzchni po ECDM i EDM wykazuje, że występuje również proces ponownego krzepnięcia materiału stopionego czy odparowanego. Zatem topienie i parowanie są kolejnymi głównymi mechanizmami usuwania naddatku. Podobieństwo produktów obróbki EDM i ECDM świadczy o tym, że w obu procesach występują wyładowania łukowe. Średnie wymiary najliczniejszych (procentowo) produktów obróbki ECDM zmieniają się w przedziale $23\div 80\ \mu\text{m}$. W procesie EDM wymiary produktów wynoszą $35\div 100\ \mu\text{m}$. Chociaż można również znaleźć produkty o wymiarach poniżej $5\ \mu\text{m}$.



Rys. 3. Produkty erozji w ECDM stopu aluminium 359 umocnionego cząstkami SiC (amplituda napięcia $U = 110\ \text{V}$, czas impulsu $40\ \mu\text{s}$, stężenie elektrolitu $\text{NaNO}_3\ 1\%$, amplituda natężenia prądu $5\ \text{A}$, czas obróbki $3\ \text{min}$, grubość szczeliny międzyelektrodowej $s = 5\ \mu\text{m}$). Średnie wymiary najliczniejszych (procentowo) produktów obróbki ECDM zmieniają się w przedziale $23\div 80\ \mu\text{m}$ [9]



Rys. 4. Typowy widok powierzchni po obróbce ECDM (Al 359 + 20% ziaren SiC o wymiarze $10\ \mu\text{m}$) – widoczne są ponownie zakrzepłe cząstki fazy metalicznej i fazy umacniającej oraz mikropęknięcia [9]

Obróbka elektrochemiczno-elektroerozyjna materiałów nieprzewodzących prądu elektrycznego

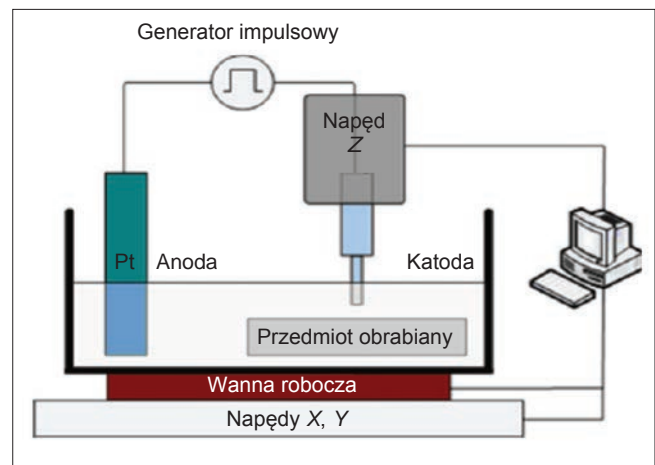
Szkło, krzem oraz polimery są popularnymi materiałami wykorzystywanymi w wytwarzaniu MEMS. Twardość i kruchość szkła utrudniają jego obróbkę. Dotychczasowe metody mikroobróbki twardych i kruchych materiałów nie dają zadowalających rezultatów. Metodą USM można obrabiać szkło i ceramikę, ale zakres jej zastosowania jest ograniczony przez duże zużycie sonotrody oraz mechaniczne pęknięcia na powierzchni i wewnątrz materiału obrabianego. Litograficzne metody zapewniają bardzo dobrą jakość powierzchni obrabianej i ostrość krawędzi, jednak w tym przypadku ograniczona jest ilość materiałów. Obróbka laserowa LBM umożliwia kształtowanie większości materiałów, ale jej zastosowanie do kształtowania odbijających i przezroczystych materiałów jest utrudnione. W ECDM materiał jest usuwany w wyniku wyładowań elektrycznych, którym towarzyszy wydzielenie się ciepła oraz wzrost temperatury ($6000\div 12000\ \text{K}$), co powoduje topienie i parowanie materiału, a czasem rozrywanie na skutek wewnętrznych naprężeń cieplnych [10]. Przedmiot obrabiany jest zanurzony w elektrolicie (zwykle wodnym roztworze NaOH lub KOH). Napięcie jest przyłożone do dodatkowej elektrody (anody – najczęściej wykonanej z Pt) i narzędzia (katody) znajdującej się blisko przedmiotu obrabianego nieprzewodzącego prądu elektrycznego.

Na anodzie zachodzi reakcja: $4\text{OH}^- \rightarrow +\text{O}_2 + 4\text{e}^-$, a na katodzie: $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^- + \text{H}_2$

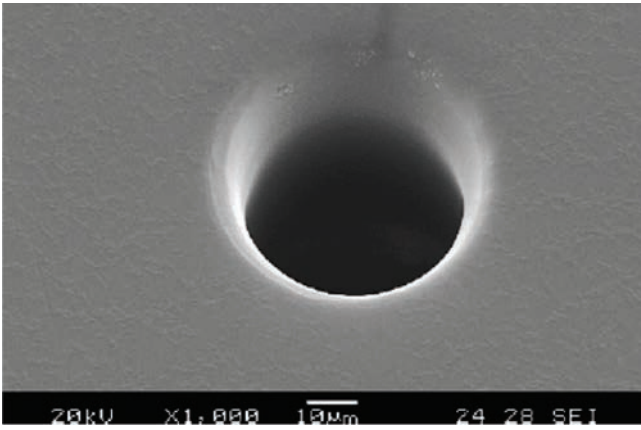
Gdy napięcie osiągnie wartość krytyczną, pęcherzyki wodoru tworzą warstwę przylegającą do katody i zachodzą wyładowania (przebiecie warstwy). Ponieważ elektroda (katoda) jest blisko przedmiotu obrabianego, w czasie wyładowania materiał z jego powierzchni jest usuwany na skutek topienia i parowania.

Prezentowane badania były ukierunkowane na wytwarzanie otworów (drażenie) oraz struktur mniejszych niż $100\ \mu\text{m}$ i o dobrej jakości powierzchni (frezowanie) w szkłe (Pyrex Glass). Analizowano wpływ rodzaju elektrolitu, jego stężenia oraz czasu impulsu napięcia i czasu przerwy na wyniki procesu.

Przez zmianę rodzaju elektrolitu ($\text{KOH}\ 20\div 40\%$ oraz $\text{NaOH}\ 20\div 30\%$), amplitudy napięcia ($30\div 40\ \text{V}$) i czasu przerwy pomiędzy impulsami napięcia ($0\div 3\ \text{ms}$) można zmieniać średnicę otworu na wejściu elektrody w granicach $70\div 110\ \mu\text{m}$. Średnica otworu na wyjściu dla powyższych



Rys. 5. Schemat stanowiska do badań procesu SACE (*spark assisted chemical engraving*) w kinematyce drażnienia i frezowania [10]



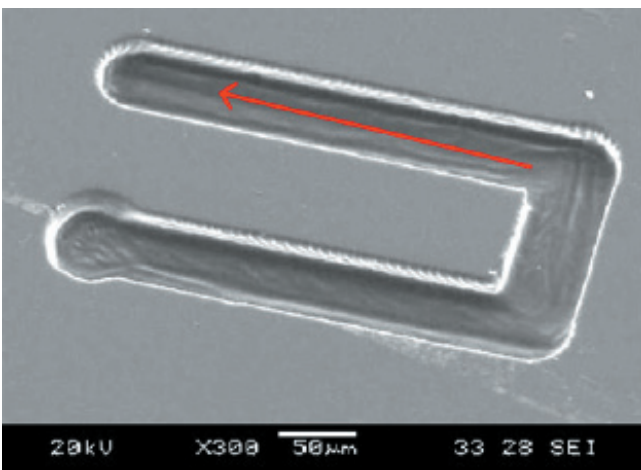
Rys. 6. Mikrootwór przelotowy wykonany drążeniem ECDM w płytce ze szkła (Pyrex Glass) o grubości 150 μm . Średnica narzędzia 31 μm , elektrolit KOH o stężeniu 30%, napięcie $U = 30\text{ V}$, czas impulsu = czas przerwy = 1 ms, obroty narzędzia 300 obr/min [10]

parametrów zmienia się w granicach 50÷70 μm . Czas wykonania otworów przelotowych w płytce o grubości 150 μm zmieniał się wraz z podanymi zakresami zmienności parametrów w granicach 500÷2000 s. Czas wykonania otworu malał istotnie wraz ze wzrostem stężenia elektrolitu.

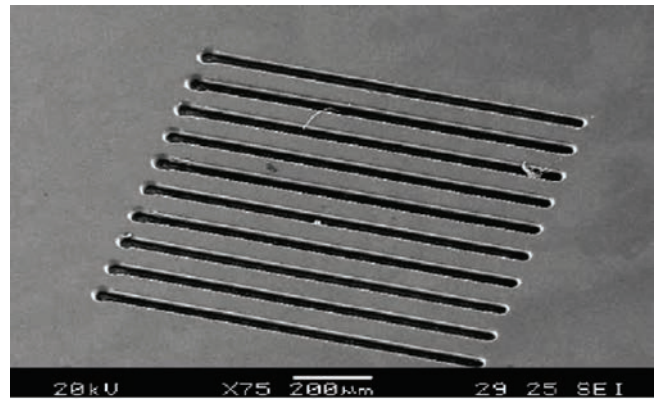
W operacjach frezowania naddatek był usuwany warstwa po warstwie do potrzebnej głębokości. Usuwanie materiału cienkimi warstwami zapobiega losowemu mechanicznemu kontaktowi elektrody (katody) podczas jej dosuwu do przedmiotu obrabianego, a tym samym powstawaniu pęknięć na przedmiocie. Sprzyja również lepszemu przepłukiwaniu szczeliny między katodą i przedmiotem obrabianym, a tym samym materiał jest łatwiej usuwany. Niestety wraz ze zmniejszaniem grubości warstwy wzrasta czas obróbki. Stabilny przebieg procesu zaobserwowano dla warstwy usuwanej o grubości ~30 μm . Zwiększenie tej grubości do 40 μm powodowało przy dosuwie uderzenie katody w przedmiot obrabiany i powstawanie mikropęknięć. Dla bezpieczeństwa w dalszych badaniach usuwano materiał warstwami o grubości 25 μm .

Przy większych niż 3 $\mu\text{m/s}$ wartościach posuwu występują mikropęknięcia, a powyżej 5 $\mu\text{m/s}$ narzędzie ulega złamaniu.

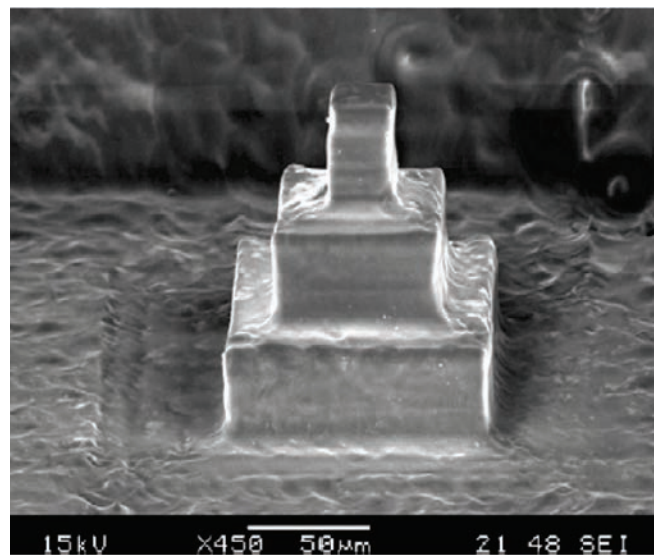
Proces wycinania elektrochemiczno-elektroerozyjnego (WECDM), nazywany także *Wire Spark Assisted Chemical Engraving (WSACE)*, może być stosowany do cięcia na plasterki materiałów nieprzewodzących o dużej twardości, kruchości czy wytrzymałości.



Rys. 7. Wgłębienie kształtowe w szkło (Pyrex Glass) wykonane w operacji frezowania: posuw 3 $\mu\text{m/s}$ (KOH 30%, napięcie przebicia 23 V, czas impulsu/czas przerwy 1 ms/1 ms). Chropowatość powierzchni: $R_a = 0,099\ \mu\text{m}$ [10]



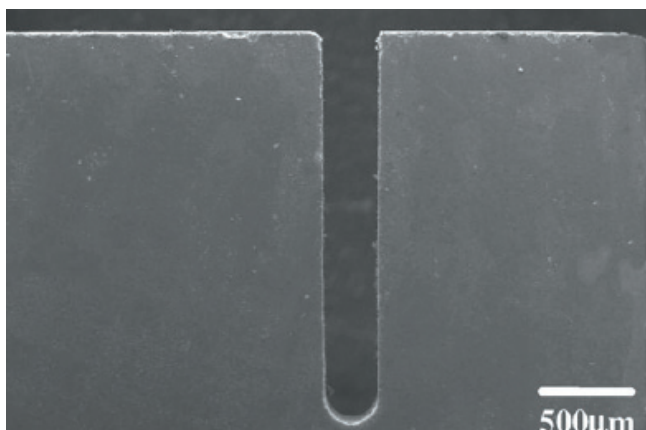
Rys. 8. Mikrorowki wykonane metodą SACE: KOH 30%, $U = 23\text{ V}$, czas impulsu/czas przerwy 1 ms/1 ms, średnica narzędzia 30÷33 μm , posuw 3 $\mu\text{m/s}$, obroty narzędzia 300 obr/min. Materiał obrabiany Pyrex Glass, wymiary: głębokość 30 μm , długość 1000 μm , szerokość 40 μm . Czas obróbki każdego rowka 360 s [10]



Rys. 9. Mikropiramida wykonana frezowaniem w Pyrex Glass metodą SACE. Obróbka wykończeniowa: KOH 30%, $U = 23\text{ V}$, czas impulsu/czas przerwy 1 ms/1 ms, średnica narzędzia 30÷33 μm , posuw 3 $\mu\text{m/s}$, obroty narzędzia 300 obr/min; obróbka zgrubna: $U = 28\text{ V}$, KOH 30%, czas impulsu/czas przerwy 1ms/1ms, posuw 3 $\mu\text{m/s}$. Sumaryczny czas obróbki 3 godz. [10]

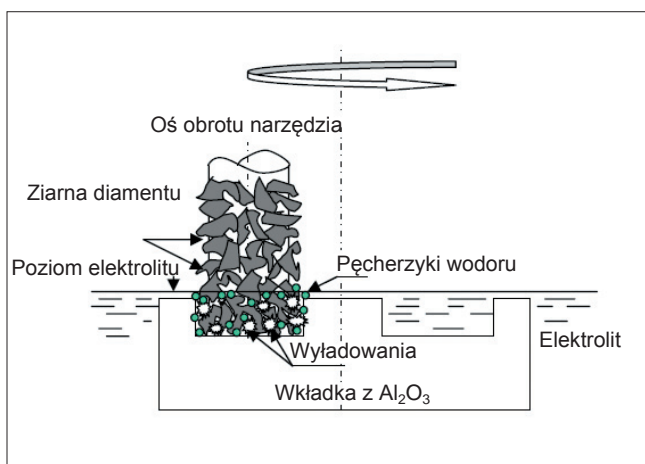
W wyniku reakcji elektrochemicznych na katodzie tworzy się cienka warstwa wodoru. Jeżeli napięcie osiągnie wartość krytyczną, występują ciągłe wyładowania i materiał z przedmiotu obrabianego jest usuwany w wyniku erozji elektrycznej oraz chemicznego trawienia. W przypadku procesu wycinania drutowego na skutek wyładowań oraz drgań drutu przy zwykle małej grubości szczeliny jakość cięcia nie jest zadowalająca. Aby utrzymać odpowiednią grubość szczeliny, zastosowano mieszaninę elektrolitu z ziarnami ściernymi SiC.

Dodanie ścierniwa do elektrolitu powoduje, że ziarna znajdują się również w obszarze obróbki i uniemożliwiają gromadzenie się w jednym miejscu pęcherzyków wodoru. Dzięki temu warstwa wodoru jest w miarę równomierna. To sprawia, że rośnie wartość napięcia krytycznego, a tym samym zmniejsza się energia wyładowań, co sprzyja zmniejszeniu rozbicia szczeliny cięcia (rys. 10). Dodanie ścierniwa zmniejsza chropowatość powierzchni. Ziarna ściernie uczestniczą w procesie usuwania naddatku, pomagają zmniejszyć mikropęknięcia i obszar przetopiony, który powstaje w wyniku wyładowań. Zastosowanie mniejszych ziaren sprzyja zmniejszeniu R_a .



Rys. 10. Szerokość szczeliny cięcia w procesie SACE szkła (Pyrex Glass); grubość szczeliny międzyelektrodowej $S \approx 150 \mu\text{m}$, $Ra = 0,84 \mu\text{m}$, rozbitcie 0,024 mm, elektrolit KOH z ziarnami ściernymi SiC (średni wymiar ziarna $57 \mu\text{m}$) o koncentracji 300 g/l [11]

Przy obróbce metodą SACE otworów o większej głębokości w Al_2O_3 występuje wyraźne pogorszenie jakości otworu (mikropęknięcia na skutek szoku temperaturowego). Aby zredukować ten efekt, zastosowano ściernicę na osnowie metalowej (zamiast cylindrycznej metalowej katody) (rys. 11).



Rys. 11. Schemat obróbki elementu z Al_2O_3 metodą SACE elektrodą z ziarnami ściernymi [12]

Zastosowanie narzędzia ściernego umożliwia wykonywanie głębszych otworów z większą wydajnością i lepszą jakością powierzchni. Maksymalna głębokość wynosi do 1,5 mm, obroty osiągają od 275 do 631 obr/min, a amplituda impulsu napięcia wynosi $50 \div 120 \text{ V}$. Zastosowano: specjalny generator impulsów napięcia (U do 300 V), impulsy natężenia prądu do 15 A, czas impulsu $t_i = 0,25 \div 1000 \mu\text{s}$, posuw $0,002 \div 1,980 \text{ mm/min}$, obroty $0,1 \div 99 \text{ obr/min}$. W zależności od amplitudy natężenia prądu, czasu impulsu i amplitudy napięcia wydajność zmieniała się w przedziale $5 \div 30 \text{ mm}^3/\text{min}$.

Podsumowanie

Aby osiągnąć wysoką trwałość elementów maszyn czy narzędzi do obróbki plastycznej, w ich produkcji coraz częściej stosuje się materiały ceramiczne oraz kompozytowe na osnowie metalicznej lub ceramicznej. Dynamicznie rozwijające się zastosowania MEMS wymagają obróbki mikroelementów ($d < 1 \text{ mm}$) ze specjalnych materiałów, takich jak: krzem i jego związki, kwarc

czy różnego rodzaju szkła (np. Pyrex Glass). Efektywne kształtowanie tych materiałów obróbką skrawaniem czy szlifowaniem klasycznym oraz obróbką ultradźwiękową jest – ze względu na ich właściwości mechaniczne lub małe wymiary elementów MEMS – bardzo trudne lub niemożliwe. Również zastosowanie obróbki laserowej jest ograniczone ze względu na pękanie materiału. Racjonalnym rozwiązaniem tych problemów jest zastosowanie metod niekonwencjonalnych – obróbki elektrochemicznej, elektroerozyjnej czy elektroerozyjno-elektrochemicznej (ECDM) w przypadku materiałów przynajmniej częściowo przewodzących prąd elektryczny. Materiały ceramiczne nieprzewodzące prądu elektrycznego można kształtować z wykorzystaniem odmiany procesu ECDM nazywanej *spark assisted chemical engraving* (SACE).

W artykule przedstawiono podstawowe możliwości i problemy związane z kształtowaniem wymienionych specjalnych materiałów na przykładzie:

- wycinania EDM materiału stanowiącego mieszaninę ZrO_2 z fazami przewodzącymi: WC, TiCN lub TiC w postaci proszków nano, mikro lub ich mieszanin,
- obróbki ECDM materiału kompozytowego na bazie stopu aluminium 359 zawierającego 20% SiC (faza umacniająca),
- drążenia i frezowania metodą SACE mikroelementów wykonanych z Pyrex Glass,
- cięcia drutowego Pyrex Glass w mieszninie elektrolitu z ziarnami ściernymi,
- drążenia metodą SACE wgłębień w Al_2O_3 ściernicą na osnowie metalicznej.

LITERATURA

1. Hocheng H. (red.) "Machining technology for composite materials. Principles and practice". Oxford–Cambridge–Philadelphia–New Delhi: Woodhead Publishing Limited, 2012.
2. Kulkarni A., Sharan R., Lal G.K. "An experimental study of discharge mechanism in electrochemical discharge machining". *International Journal of Machine-Tool & Manufacture*. 42 (2002): s. 1121–1127.
3. Wuthrich R., Fascio V. "Machining of non-conducting materials using electrochemical discharge phenomenon – an overview". *International Journal of Machine-Tool & Manufacture*. 45 (2005): s. 1095–1108.
4. Pramanik A. "Developments in the non-traditional machining of particle reinforced metal matrix composites". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 86 (2014): s. 44–61.
5. Qingfeng Y., Baorui W., Yongbin Z., Fang J., Guangmin L. "Research of lower tool electrode wear in simultaneous EDM and ECM". *Journal of Materials Processing Technology*. 214 (2014): s. 1759.
6. Mediliyegedara T.K.K.R., De Silva A.K.M., Harrison D.K., McGeough J.A. "New developments in the process control of the hybrid electrochemical discharge machining (ECDM) process". *Journal of Materials Processing Technology*. 167 (2005): s. 338–343.
7. Laio Y.S., Wu L.C., Peng W.Y. "A study to improve drilling quality electrochemical discharge machining (ECDM) process". *Procedia CIRP*. 6 (2013): s. 609–614.
8. Lauwers B., Brans K., Liu W., Veleugels J., Salehi S., Vanmeensel K. "Influence of type and grain size of the electro-conductive phase on the wire – EDM performance of ZrO_2 ceramic composites". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 57 (2008): s. 191–194.
9. Liu J.W., Yue T.M., Guo Z.N. "An analysis of the discharge mechanism in electrochemical discharge machining of particulate reinforced metal matrix composites". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 50 (2010): s. 86–96.
10. Xuan Doan Cao, Bo Hyung Kim, Houg Nam Chu. "Microstructuring of glass with features less than $100 \mu\text{m}$ by electrochemical discharge machining". *Precision Engineering*. 33 (2009): s. 459–465.
11. Yang C.T., Siong S.L., Yan B.H., Huang F.Y. "Improving machining performance of wire electrochemical discharge machining by adding SiC abrasive to electrolyte". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 46 (2005): s. 2044–2050.
12. Sanjay K., Chak P., Venkateswara Rao. "Trepanning of Al_2O_3 by electro-chemical discharge machining (ECDM) process using abrasive electrode with pulsed DC supply". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 47 (2007): s. 2061–2070.