

OBRÓBKA MATERIAŁÓW CERAMICZNYCH I KOMPOZYTOWYCH METODAMI NIEKONWENCJONALNYMI

Piotr LIPIEC, Magdalena MACHNO

Streszczenie. Unikalne własności materiałów ceramicznych i kompozytowych powodują, że są one dzisiaj stosowane w bardzo wielu dziedzinach, w tym w przemyśle elektronicznym. Istotną część jego produktów jest wytwarzana w mikroskali. Są to zarówno elementy planarne (elementy elektroniczne VLSI), jak i przestrzenne (mikrosystemy elektromechaniczne – MEMS). Do ich wytwarzania stosuje się różnego rodzaju techniki, przede wszystkim fotolitografię i trawienie chemiczne, ale także inne techniki należące do grupy metod niekonwencjonalnych – obróbkę elektroerozyjną czy elektrochemiczną. Te dwie ostatnie wydają się trudne do obróbki materiałów słabo przewodzących prąd elektryczny, jednak odpowiednio dobrane warunki procesu oraz połączenie ich razem, pokazuje, że wykorzystanie ich staje się możliwe. Artykuł przedstawia wybrane techniki stosowane do obróbki tego typu materiałów.

Słowa kluczowe: Materiały ceramiczne, obróbka elektroerozyjna, obróbka laserowa, SACE, LAJECM

1. Wprowadzenie

Na przestrzeni lat materiały ceramiczne uległy znacznym przemianom ze względu na potrzeby cywilizacji przemysłowej. Klasyczna ceramika opierająca się na naturalnych surowcach nie sprostała rosnącym potrzebom powstałym dziedzin przemysłowych, dlatego zastąpiła ją generacja tworzyw ceramicznych opartych wyłącznie o surowce syntetyczne. Ceramika określana jako funkcjonalna znalazła szerokie zastosowanie w prawie każdej gałęzi przemysłu. Na uwagę zasługuje zastosowanie jej do wytwarzania materiałów na potrzeby przemysłu elektronicznego i elektrotechnicznego. Ponieważ postępująca miniaturyzacja wymaga coraz większego zapotrzebowania na różnego rodzaju mikroukłady, dlatego jedną z istotnych gałęzi tego przemysłu są obecnie mikro- i nanotechnologie. Niewielkie rozmiary sprawiają, że mikroukłady mają mniejsze zapotrzebowanie na energię, wytwarzają mniej ciepła i są lżejsze. Zmniejsza się także koszt produkcji ze względu na mniejsze zapotrzebowanie na materiały [1]. Współczesna technologia elektroniczna oraz elektrotechniczna próbuje sprostać postępującej miniaturyzacji, co sprawia że gwałtownie wzrasta poziom trudności wytworzenia mikroelementów. Największym problemem jest brak efektywnych metod kształtowania struktur wymiarowych. Zazwyczaj stosuje się trawienie chemiczne, jednak proces ten jest drogi i czasochłonny. Do metod alternatywnych kształtowania materiałów ceramicznych zalicza się niekonwencjonalne metody obróbki, takie jak obróbka laserowa, ultradźwiękowa, wycinanie strugą wodno – ścierną, obróbka elektrochemiczna i elektroerozyjna [2, 3, 4].

2. Charakterystyka MEMS

Jedną z bardzo ważnych grup produkowanych obecnie mikroukładów stanowią elektromechaniczne mikrosystemy MEMS (Micro – Electro – Mechanical - System), jak również elektromechaniczne nanosystemy (NEMS, czyli Nano – Electro – Mechanical - System) [4]. Układy MEMS składają się z członów wykonawczych oraz elektryczno – elektronicznych. Obiekty elektroniczne wytwarzane są najczęściej w oparciu o podłoże krzemowe, które obrabia się wykorzystując odmiany fotolitografii, osadzania warstw, trawienia (metody trawienia na sucho i na mokro). Obiekty wykonawcze wytwarza się z zastosowaniem technik skrawania – toczenie, frezowanie, wiercenie, szlifowanie, obróbkę elektroerozyjną, wytłaczanie, napawanie, obróbkę laserową, obróbkę elektrochemiczną [2, 5]. MEMS w układach elektronicznych najczęściej są używane zarówno jako sensory, procesory, jak i aktuatory. Są elementami przekształcającymi sygnał lub energię (np. elektryczną, magnetyczną) jednego typu na inny, np. energię mechaniczną, termiczną, chemiczną, radiacyjną (np. wpływać na natężenie promieniowania elektromagnetycznego, długości lub fazy rozchodzących się fal elektromagnetycznych) [1, 6].

3. Materiały wykorzystywane do produkcji mikroukładów

Materiałem najczęściej wykorzystywanym do produkcji MEMS jest krzem oraz jego pochodne (SiO_2 – tlenek krzemu, Si_3N_4 – azotek krzemu, SiC – węgiel krzemu). Wynika to z właściwości fizycznych krzemu oraz dostępności wykonywanych płytek podłożowych na bazie krzemu. Dobrze przewodzi ciepło, nie ulega zniekształceniu w wyniku nacisku, a także charakteryzuje się stabilnością własności fizyko – chemicznych, nawet w wyższych temperaturach. Monokrystaliczny krzem z łatwością integruje się z układami elektronicznymi, również wykonywanymi na bazie krzemu [1]. Ponadto do produkcji MEMS wykorzystuje się również materiały, takie jak: GaAs – arsenek galu, diament, stopy AlN, stopy z pamięcią kształtu (stopy Ti – Ni, metale – Ag, Al., Au, Cu, Ir, Ni, Ti), polimery [2, 4].

Istotną grupą materiałów stosowanych do produkcji mikroukładów są materiały ceramiczne, określane jako ceramika funkcjonalna [3]. Do materiałów ceramicznych zalicza się wszystkie materiały nieorganiczno – niemetaliczne. Uzyskuje się je w procesie obróbki cieplnej – spiekanie, prażenie, w warunkach wysokiej temperatury (powyżej kilkuset stopni Celsjusza). W materiałach tych występują wiązania jonowe i kowalencyjne, które powodują powstanie zazwyczaj sieci przestrzennej, co sprawia że charakteryzują się wysoką temperaturą topnienia, znaczną sztywnością, twardością, odpornością na agresywne środowiska – np. odporność na dynamiczne (udarowo, szokowo) zmienne temperatury, odporność na korozję [6, 7]. Parametry, takie jak dobre własności mechaniczne, wysoka wytrzymałość na rozciąganie, wysokie przewodnictwo cieplne, wysoka wytrzymałość dielektryczna, rezystywność, niska stratność, pozwalają stosować ją w elektronice [3]. Obecnie wytwarza się wiele materiałów ceramicznych, które znajdują zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu. Złożone są one głównie ze związków metali z niemetalami. Stąd ceramika tzw. inżynierska wytwarzana jest w większości z takich związków jak: tlenki, węgliki, azotki, borki, fosforki oraz związki złożone na ich osnowie [2, 6]. Materiały te znajdują zastosowanie w wielu obszarach przemysłu, m. in. w budownictwie, hutnictwie, przemyśle kosmicznym.

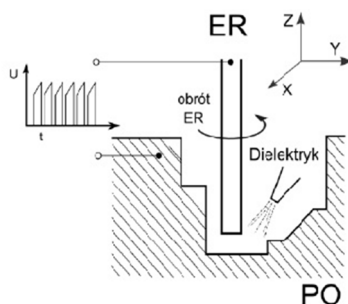
Wśród ceramiki wyróżnia się także kompozyty ceramiczne. Do poważnej wady materiałów ceramicznych zalicza się ich kruchość, która nie pozwala na stosowanie ich

w niektórych przypadkach (np. materiały do budowy silników spalinowych w transporcie drogowym, lotniczym, szynowym) pomimo innych istotnych zalet (m. in. odporność na korozję, sztywność, wytrzymałość). Wówczas dobrym rozwiązaniem okazują się kompozyty o osnowie ceramicznej wzmocnione włóknami. Zbudowane są z co najmniej dwóch faz ceramicznych. Dzięki takiemu rozwiązaniu można zniwelować częściowo problem kruchego pęknięcia. Warto zwrócić uwagę również na ceramiczne kompozyty ziarniste (do bardziej interesujących, ze względu na właściwości mechaniczne, należą: $ZrO_2 - Al_2O_3$, $Al_2O_3 - SiC$). Charakteryzują się typową polikrystaliczną osnową ceramiczną. Spieczony w wysokiej temperaturze kompozyt, a następnie schłodzony, posiada odmienne właściwości rozproszonych ziaren i osnowy, który zapewnia większą odporność na pęknięcie oraz większą sprężystość [7]. Materiały kompozytowe znalazły zastosowanie w medycynie, m. in. jako materiał na endoprotezy (np. endoproteza stawu biodrowego) oraz materiał na stabilizatory złamanych kości [8, 26].

4. Charakterystyka wybranych metod niekonwencjonalnych wykorzystywanych do obróbki materiałów ceramicznych i kompozytowych

4.1. Obróbka elektroerozyjna

Obróbka elektroerozyjna (Electrical Discharge Machining - EDM) polega na usuwaniu nadmiaru z materiału obrabianego w wyniku zjawisk, które zachodzą w czasie wyładowania elektrycznego w szczelinie międzyelektrodowej. Jedną elektrodą stanowi przedmiot obrabiany, natomiast drugą elektrodą roboczą. Obie elektrody zanurzone są w dielektryku (olej transformatorowy, lotniczy, wrzecionowy, nafta, woda dejonizowana, woda destylowana, parafina) oraz podłączone do generatora prądu stałego (rys. 1). Podczas wyładowania ma miejsce erozja elektrod, czyli usuwanie materiału obrabianego na skutek wyładowań elektrycznych, którym towarzyszy parowanie, topnienie, rozrywanie i kruszenie materiału obrabianego. Wyładowaniom elektrycznym w przestrzeni zjonizowanej towarzyszy bardzo wysoka temperatura (rzędu 3000 – 10000 stopni Celsjusza – temperatura plazmy) [9, 27, 28]. Ponieważ nadatek z materiału obrabianego usuwany jest w wyniku wyładowań elektrycznych ten rodzaj obróbki stosowany jest do kształtowania elementów wykonanych z trudnoskrawalnych materiałów przewodzących prąd elektryczny, takich jak: utwardzona stal, różnego typu węgliki, super twarde materiały itp. [2]. EDM znajduje zastosowanie m. in. w przemyśle lotniczym, do wykonywania form w matrycach, kokilach, dzięki możliwości wykonania skomplikowanych krzywoliniowych kształtów z zachowaniem wysokiej dokładności [2, 9, 10].



Rys. 1. Schemat obróbki elektroerozyjnej [11]

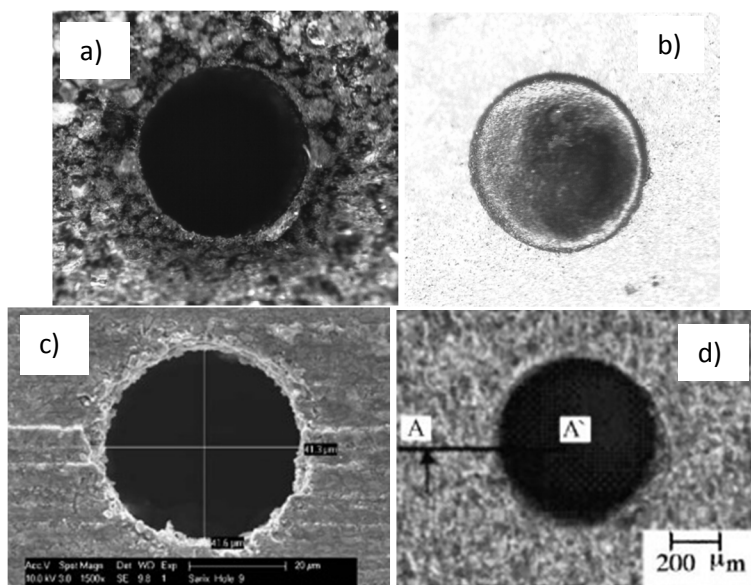
Można wyróżnić następujące odmiany obróbki elektroerozyjnej w zależności od stosowanego narzędzia oraz kinematyki procesu [9, 12]:

- wycinanie elektroerozyjne – elementem wycinającym jest drut o średnicy rzędu nawet 20 μm ,
- drażnienie elektroerozyjne – polega na odwzorowaniu kształtu elektrody roboczej w materiale obrabianym,
- wiercenie elektroerozyjne – polega na drażnieniu głębokich otworów z wykorzystaniem elektrod o małych średnicach rzędu 100 μm ,
- obróbka elektroerozyjna elektrodą uniwersalną – kształt powierzchni obrabianej uzyskuje się dzięki odwzorowaniu trajektorii elektrody roboczej w materiale obrabianym.

4.1.1. Zastosowanie EDM do obróbki materiałów ceramicznych i kompozytowych

Materiały ceramiczne posiadają właściwości mechaniczne i fizyczne, które pozwalają na stosowanie ich w przemyśle elektronicznym, również w mikroelektronice. Pomimo, że ceramika nie zalicza się do klasycznych przewodników, to odpowiednio dobierając parametry procesu, można stosować EDM do obróbki tego typu materiałów [13]. W celu uzyskania wyładowania stosuje się maski z materiałów przewodzących lub pokrywa się je cienką warstwą metalu lub proszku. Do pokrywania stosuje się m. in. TiN, WC, $\text{TiC}_{0.5}\text{N}_{0.5}$, TiB_2 , spieczoną warstwę węgla. Wówczas możliwa jest obróbka takich materiałów jak: Si_3N_4 , ZrO_2 , Al_2O_3 (rys. 2. c) [13, 14]. Pokrywanie materiałów ceramicznych warstwą spieczonego węgla pozwala uzyskać bardziej precyzyjny kształt wykonanych otworów (rys. 2. d). Stosuje się także bardzo wysokie napięcia, które umożliwiają powstanie wyładowania. Czasami w strukturze materiałów ceramicznych czy kompozytowych znajduje się materiał przewodzący prąd elektryczny np. w formie spoiwa. Przykładem jest tutaj węgiel boru B_4C oraz silit SiSiC (rys. 2. a, b). Odpowiedni dobór parametrów obróbki takich jak: prąd pracy, czas impulsu, przerwy między impulsami, energia dostarczona do układu, rodzaj dielektryka, pozwalają na zainicjowanie wyładowania elektrycznego [5, 14]. W mikroobróbce EDM istotny jest także materiał, z którego wykonana jest elektroda robocza, a także jej kształt. Najczęściej stosowane są elektrody miedziowo – wolframowe. Badania wykazały, że podczas obróbki zużycie elektrody miedziowo – wolframowej jest mniejsze niż miedziowej, a efekty obróbki są podobne. Natomiast elektrody w kształcie rurki pozwalają na szybsze usuwanie materiału podczas obróbki, a także uzyskiwanie wyraźnych krawędzi wytwarzanego kształtu [14]. Także zakres stosowanego napięcia podczas obróbki ma duży wpływ na przebieg procesu. Stosowanie wysokich napięć (rzędu 70 – 80V) przy obróbce niektórych materiałów (np. ceramiki izolacyjnej) jest konieczne do zainicjowania wyładowań.

W przypadku obróbki materiałów słabo przewodzących prąd elektryczny, znaczący jest dobór rodzaju dielektryka. Stosowanie dielektryków ropochodnych przy użyciu dużego prądu pracy oraz napięcia może spowodować zapalenie się cieczy dielektrycznej.



Rys. 2. a) otwór wykonany w SiSiC. Parametry obróbki: $t_i=50\ \mu\text{s}$, $t_p=85\ \mu\text{s}$, $I=3,25\ \text{A}$ [5], b) otwór wykonany w B_4C . Parametry obróbki: $t_i=275\ \mu\text{s}$, $t_p=140\ \mu\text{s}$, $I=3\ \text{A}$ [5], c) otwór wykonany w Si_3N_4 pokrytym TiN [13], d) otwór wykonany w Si_3N_4 wspomagany warstwą spieczonego węgla [14]

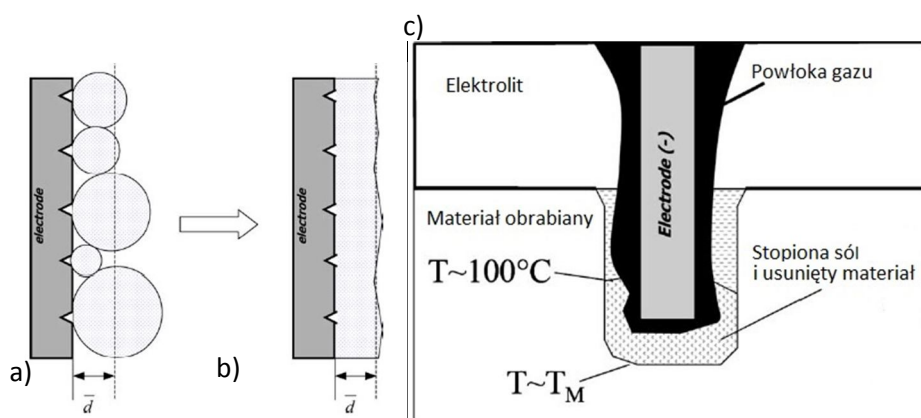
4.2. Obróbka wyładowaniami elektrycznymi w elektrolicie (Spark Assisted Chemical Engraving - SACE)

SACE – Spark Assisted Chemical Engraving, czyli wyładowania elektryczne w elektrolicie. Przedmiot obrabiany zanurzony jest w elektrolicie, jedna elektroda pełni funkcję elektrody roboczej (katoda) a druga elektroda jest elektrodą pomocniczą (anoda). Obie elektrody podłączane są do źródła prądu stałego. Elektroda robocza jest umieszczona nad materiałem obrabianym, który nie przewodzi prądu elektrycznego (rys. 4. b). Wraz ze wzrostem napięcia proces wydzielania się pęcherzyków gazu intensyfikuje się, a następnie dochodzi do ich łączenia, co prowadzi do wytworzenia wokół elektrody roboczej powłoki gazu. Jej obecność umożliwia powstanie wyładowań elektrycznych między elektrodą roboczą, a materiałem obrabianym. Ciepło dostarczone przez wyładowania elektryczne umożliwia osiągnięcie temperatury rzędu 500 – 600 stopni Celsjusza na powierzchni obrabianego materiału (rys. 3) [17, 18, 29]. Procesowi obróbki z wykorzystaniem wyładowań elektrycznych w elektrolicie, oprócz wysokiej temperatury towarzyszy przyspieszone trawienie chemiczne. Wymaga to dostarczenia do układu dużej ilości energii elektrycznej [15].

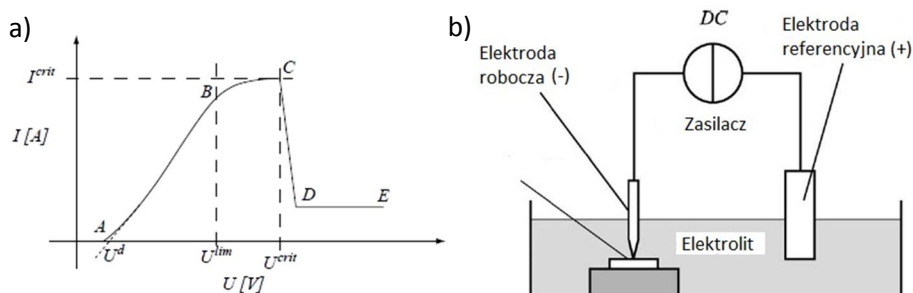
Wyładowania elektryczne można przedstawić w sposób ilościowy z podaniem średnich charakterystyk prądowo – napięciowych, w których można wyróżnić pięć charakterystycznych regionów (rys. 4. a) [16]:

- I – Region termodynamiczny i nad potencjalny, w którym występują napięcia mniejsze niż 2V, tutaj prąd jeszcze nie może płynąć

- II – Region rezystancyjny (zakres A - B), tutaj zależność $U(I)$ ma charakter bardzo zbliżony do liniowego, w tym regionie typowy zakres napięć mieści się w przedziale 2 – 10V
- III – Region tzw. limitu prądowego (zakres B - C), tutaj średnie natężenie prądu osiąga wartość graniczną, na którą wpływ mają wymiary i długość elektrody roboczej oraz elektrolit
- IV – Obszar niestabilności (zakres C - D), w którym średnia wartość prądu szybko się zmniejsza i tworzy się powłoka gazowa wokół elektrody roboczej. Jest region niestabilności ponieważ proces może być podobny do zakres B – C lub do zakresu D – E
- V – Region tzw. iskrzenia (zakres D - E), w którym jest ukształtowana powłoka gazu wokół elektrody roboczej oraz widoczne są wyładowania elektryczne, w tym regionie zachodzi obróbka materiału.



Rys. 3. a) tworzenie się powłoki gazowej przez koalescencję, b) utworzona powłoka gazowa na elektrodzie roboczej [17], c) schemat obróbki elektrochemicznych wyładowań w elektrolicie, T – temperatura konieczna aby zaszła obróbka materiału [18]

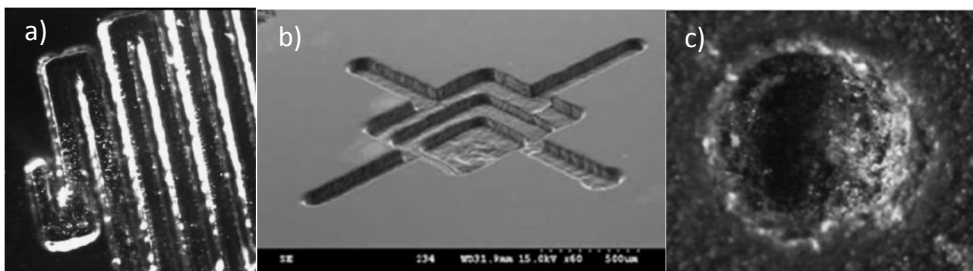


Rys. 4. a) charakterystyka prądowo – napięciowa z zaznaczonymi regionami przebiegu procesu [17], b) schemat procesu obróbki z wykorzystaniem wyładowań elektrycznych w elektrolicie [16]

4.2.1. Zastosowanie SACE do obróbki materiałów ceramicznych i kompozytowych

SACE można zastosować do precyzyjnej obróbki materiałów nieprzewodzących prądu elektrycznego w mikroskali [18]. Tą niekonwencjonalną metodą obróbki można obrabiać szkło, kwarc, granit, tlenek aluminium, tworzywa sztuczne, jak również materiały ceramiczne (Al_2O_3 , Si_3N_4 , MgO , Y_2O_3), materiały kompozytowe (m. in. kompozyty epoksydowe), materiały piezoelektryczne (PZT – cyrkonian - tytanian ołowiu) [16, 19].

Rodzaj elektrolitu oraz jego stężenie mają wpływ na przebieg procesu. Najczęściej jako elektrolit wykorzystuje się: NaF , NaNO_3 , NaCl i NaOH , KOH , H_2SO_4 . Jednak najbardziej interesujący wydaje się roztwór NaOH , który może znacznie poprawić jakość powierzchni po obróbce. Przeprowadzone dotychczas badania wykazują, że wzrost stężenia NaOH do poziomu 30% pozwala na obniżenie napięcia stosowanego w trakcie obróbki (30 – 32V), jednak w przypadku przekroczenia tego poziomu stężenia, należy ponownie zwiększyć napięcie pracy. Natomiast użycie roztworu NaOH z płynnym mydłem w proporcji 10:1 jako elektrolitu, pozwala zastosować w obróbce mniejsze napięcie rzędu 15 - 20V [17]. Wodorotlenek sodu (NaOH) ma większą przewodność właściwą, a dodatkowo w wyższych temperaturach dochodzi do szybszego trawienia chemicznego materiału, co w efekcie przyspiesza usuwanie nadmiaru [20]. Odpowiednia temperatura procesu wynosi 500 – 600 stopni Celsjusza (T_M). Natomiast podgrzewanie elektrolitu podczas procesu pozwala uniknąć tworzenia się stref ciepła oraz pęknięć termicznych [16, 18, 21]. Ciekawym rozwiązaniem poprawiającym efekty obróbki materiałów niemetalowych wydaje się zastosowanie prądu impulsowego w metodzie SACE w połączeniu z obrotem elektrody roboczej. Dobre efekty tej kombinacji ukazują się w tworzeniu mikro struktur trójwymiarowych (rys. 5. b) [18]. Badania pokazały również, że na obróbkę SACE ma wpływ (na szybkość oraz dokładność obróbki) kształt końcówki elektrody roboczej, a dokładnie zakończenie elektrody (płaskie lub okrągłe) oraz kształt ścianek bocznych (ścięte ścianki lub proste) [20].

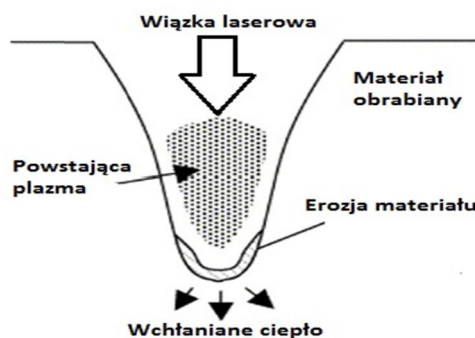


Rys. 5. a) kanał dla mikro reaktora wykonany w szkle Pyrex metodą SACE [22], b) mikrostruktura 3D wykonana w szkle Pyrex wykonana z użyciem wyładowań elektrycznych w elektrolicie z wykorzystaniem impulsowego napięcia oraz obrotem elektrody roboczej [18], c) otwór wykonany w granicie (napięcie $U = 50$ [V], elektrolit – NaNO_3 o stężeniu 20%, prędkość obrotowa elektrody roboczej 50 [obr./min], posuw wglębny elektrody 30[$\mu\text{m}/\text{min}$]) [2]

4.3. Obróbka laserowa

Obróbka laserowa polega na usuwaniu materiału w wyniku oddziaływania skoncentrowanej wiązki promieniowania elektromagnetycznego. Promieniowanie to jest

monochromatyczne oraz spójne, cechujące się niewielką rozbieżnością ($10^{-3} - 10^{-2}$ rad). Monochromatyczność oraz mała rozbieżność wiązki promieniowania laserowego umożliwia zogniskowanie jej na obszarze powierzchni o małej średnicy. Działająca na przedmiot obrabiany wiązka laserowa częściowo się odbija, a częściowo zostaje pochłonięta (absorpcja). Energia promieniowania laserowego ulega w bardzo krótkim czasie zamianie na energię cieplną, która powoduje nagrzanie materiału, jego topnienie oraz parowanie, sublimację, dysocjację, tworzenie się plazmy, ablację. Powstałe wówczas ciśnienie sprawia, że zostaje usunięty odparowany oraz stopiony materiał (rys. 6) [9, 23].

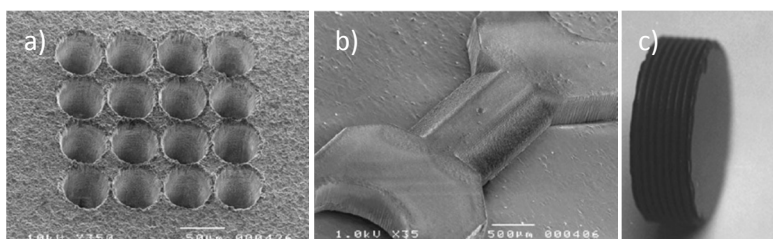


Rys. 6. Schemat drążenia laserowego [23]

W obróbce laserowej wykorzystuje się lasery molekularne CO₂ (emitują promieniowanie o długości fali 10,63 μm, pracują w sposób ciągły bądź impulsowy), lasery na ciele stałym Nd:YAG (pracują w sposób ciągły bądź impulsowy, długość fali emitowanego promieniowania równa się 1,064 μm), lasery tzw. excimerowe (impulsowe lasery gazowe) [9].

4.3.1. Obróbka laserowa materiałów ceramicznych

Podczas obróbki laserowej materiałów ceramicznych występują takie zjawiska jak odbicie, absorpcja, rozpraszanie oraz transmisja. Ponieważ materiały ceramiczne cechują się znacznie mniejszą przewodnością elektryczną, zachodzi w nich szybciej proces absorpcji niż w metalach. Materiały ceramiczne charakteryzują się mniejszą przewodnością cieplną niż metale, stąd absorpcja energii odbywa się w nich szybciej. Energia z padającej na powierzchnię wiązki laserowej w całości dociera na powierzchnię materiału. Zaabsorbowana energia przez materiał zależy od właściwości ceramiki (współczynnik odbicia), wielkości padającej energii lasera, długości fali, kąta padania na powierzchnię obrabianą [23]. W przypadku np. azotku krzemu (Si₃N₄) i tlenku glinu (Al₂O₃) stosuje się lasery impulsowe w których stosowane jest światło o małej długości [24]. Na uwagę zasługuje metoda bezpośredniego zapisu wielu procesów obróbki laserem podczas jednej operacji (rys. 7. a), która umożliwia tworzenie tablic o dużej gęstości wykonanych w nich otworów bez występowania pęknięcia materiału obrabianego. Metodę tę można z powodzeniem stosować w mikroobróbce (rys. 7. b) [24].

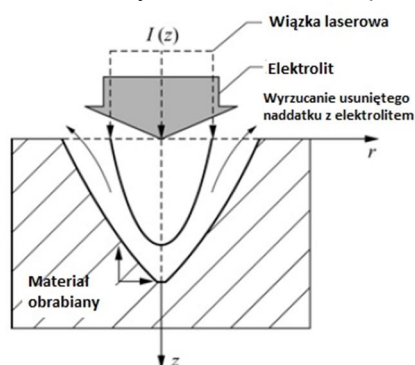


Rys. 7. a) tablica z otworami o średnicy $40\ \mu\text{m}$ wykonana w płytce z tlenku glinu o grubości $250\ \mu\text{m}$, b) przykład wykonania procesu wiercenia, cięcia, frezowania wykonany w tlenku glinu (Al_2O_3) podczas jednej operacji [24], c) toczenie gwintów wykonane w azotku krzemu (Si_3N_4) [23]

Obróbkę laserową można podzielić na: jedno-, dwu- i trójwymiarową. W obróbce jednowymiarowej wiązka laserowa jest nieruchoma względem przedmiotu obrabianego (np. wiercenie). W dwuwymiarowej obróbce laserowej (cięcie), wiązka laserowa wykonuje ruch względem materiału obrabianego. Wiązka laserowa wykonuje cięcie na całej grubości lub głębokości materiału poprzez jego topienie/odparowanie. Natomiast dwie lub więcej wiązek laserowych jest wykorzystywane do trójwymiarowej obróbki laserowej, a każda wiązka wykonuje ruch względem materiału obrabianego (rys. 7. c) [23].

4.4. Obróbka elektrochemiczna wspomagana laserowo (Laser Assisted Jet Electrochemical Machining - LAJECM)

Obróbka elektrochemiczna wspomagana laserowo polega na łączeniu mocy lasera oraz strumienia elektrolitu do usuwania nadmiaru. W procesie tym materiał usuwany jest w wyniku rozpuszczenia elektrochemicznego wspieranego przez promieniowanie laserowe. Obróbkę umożliwiają dwa rodzaje energii: energia fotonów w wiązce laserowej oraz energia jonów w obróbce elektrochemicznej [25]. Laser wysyła do zewnętrznej części materiału obrabianego kwant energii, co sprawia że wzrasta temperatura w tym obszarze. Wyższa temperatura zwiększa gęstość przepływającego prądu. Podnosi się także temperatura elektrolitu powodując wzrost przewodności elektrycznej (rys. 8). Nadmiar jest łatwiej usuwany w wyniku dyfuzji w wyższej temperaturze. Procesy elektrochemiczne przebiegają szybciej ze względu na wyższą temperaturę. Wiązka laserowa skupiona jest w jednym miejscu na przedmiocie obrabianym, co stanowi ważną zaletę tego procesu [25].



Rys. 8. Schemat modelu procesu LAJECM [25]

Dotychczasowa analiza procesu pokazuje, że istotnym problem w LAJECM jest określenie zależności pomiędzy rozkładami temperatury, gęstości prądu oraz prędkości roztwarzania. Rozkład temperatury w miejscu nagrzania materiału zależy od współczynnika absorpcji, (elektrolitu oraz materiału obrabianego), energii strumienia wiązki laserowej, współczynnika przewodnictwa cieplnego. Skutecznym sposobem zwiększenia lokalizacji procesu roztwarzania okazuje się użycie ultrakrótkich impulsów laserowych oraz impulsów napięciowych. Wiąże się to z faktem, że ze względu na bardzo krótki czas impulsu laserowego, wydzielone ciepło nie zdąży się rozprzestrzenić poza obszar naświetlania [9].

4.4.1. LAJECM stosowany do obróbki materiałów ceramicznych i kompozytowych

Laser Assisted Jet Electrochemical Machining (LAJECM) obecnie jest procesem będącym cały czas w fazie badań laboratoryjnych. Przewiduje się zastosowanie LAJECM głównie do kształtowania powierzchni mikro elementów, w tym także dla przemysłu elektronicznego. LAJECM daje możliwość kształtowania mikroelementów wykonanych z materiałów cechującymi się specjalnymi właściwościami m. in. materiałów kompozytowych i ceramicznych oraz znacznie ułatwia kształtowanie otworów oraz wgłębień. Umożliwia obróbkę elementów o wymiarach 5 – 500 μm z dokładnością 1 – 10 μm . Naświetlanie laserem powierzchni obrabianej elektrochemicznie umożliwia zwiększenie roztwarzania bądź osadzania katodowego (10 – 100x), także wykonanie procesu roztwarzania lub osadzania w trudnodostępnych miejscach, lokalizację procesu nawet na powierzchni o wymiarach kilku mikrometrów. Parametry wiązki światła laserowego powinny być tak dobierane, aby zmniejszać ilość energii, która jest pochłaniana przez elektrolit [9].

5. Podsumowanie

Współcześnie, przemysł elektroniczny oraz elektrotechniczny chcąc sprostać wciąż postępującej miniaturyzacji potrzebuje coraz bardziej precyzyjnych metod obróbki materiałów. Problemem nadal jest brak efektywnych i stosunkowo tanich metod kształtowania struktur wymiarowych mikroelementów wykonanych z materiałów ceramicznych i kompozytowych stosowanych w produkcji wyrobów elektronicznych i elektrotechnicznych. Z tego powodu metody niekonwencjonalne wydają się ciekawą alternatywą, pomimo, że niektóre z nich nadal znajdują się w fazie badań laboratoryjnych. W przypadku obróbki elektroerozyjnej stosowanie jej do materiałów słabo przewodzących wymaga odpowiedniego doboru parametrów pracy, a także dielektryka, pokrywaniu materiału warstwami (z materiałów przewodzących, warstwą spieczonego węgla), zastosowaniu elektrod roboczych wykonanych z odpowiednich materiałów (elektrody miedziowo - wolframowe).

Obróbka wyładowaniami elektrycznymi w elektrolicie (SACE) nadal znajduje się w fazie badawczej, nie mniej coraz lepsze poznawanie tego procesu pozwala przypuszczać, że wkrótce znajdzie ona zastosowanie przemysłowe. Metoda obróbki laserowej, jest z powodzeniem stosowana w przemyśle elektronicznym do mikrowytwarzania. Wspomaganie roztwarzania elektrochemicznego promieniowaniem laserowym również wydaje się bardzo ciekawym sposobem wykonywania struktur przestrzennych w mikroskali. Ponieważ zapotrzebowanie na mikroelementy jest coraz większe, dlatego

należy się spodziewać, że cały czas będzie postępował proces doskonalenia zaprezentowanych metod wytwarzania.

Literatura

1. Karbowniczek M.: Układy MEMS. *Elektronika Praktyczna*, 2/2010, 2010, s. 54 – 56.
2. Lipiec P., Skoczypiec S.: Niekonwencjonalne metody obróbki materiałów nieprzewodzących prądu elektrycznego. [w:] *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, pod redakcją Ryszarda Knosali, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2013, s. 663 – 676.
3. Librant Z.: Ceramika w elektronice – przegląd zastosowań i wybranych zagadnień technologicznych. *Materiały elektroniczne*, T. 66, Z. 2, , Warszawa 1989, s. 5 – 41.
4. Ruszaj A., Skoczypiec S., Wyszynski D., Lipiec P.: Wybrane aspekty zastosowania mikro i nanotechnologii w procesach wytwarzania. *Inżynieria Maszyn*, R. 16, Z. 4, 2011.
5. Lipiec P., Machno M.: Obróbka elektroerozyjna materiałów ceramicznych. *Prace szkoły inżynierii materiałowej*, Monografia pod redakcją prof. Jerzego Pacyny, Wydawnictwo Naukowe AKAPIT, Krynica 2013, s. 353 – 358.
6. Materiały ceramiczne. Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej, wykład dostępny na stronie internetowej: <http://www.im.pg.gda.pl>
7. Pampuch R.: Materiały ceramiczne oraz ich wpływ na rozwój inżynierii materiałowej w Polsce, *Polskie i światowe osiągnięcia nauki: nauki techniczne*, 2010, s. 46 – 96, artykuł dostępny na stronie: http://fundacjarozwojunauki.pl/res/Tom2/3_Pampuch.pdf
8. Materiałoznawstwo. Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki Akademii Górniczo – Hutniczej, wykład dostępny na stronie: <http://student.agh.edu.pl/~sendivog/Wyklady>
9. Ruszaj A.: Niekonwencjonalne metody wytwarzania maszyn i narzędzi. Instytut Obróbki Skrawaniem IOS, Kraków 1999.
10. Newman K. H. Ho: State of the art electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43, 2003, s. 1287–1300.
11. Skoczypiec S., Ruszaj A., Kozak J.: Wybrane problemy technologii elektrochemicznej i elektroerozyjnej mikro – narzędzi. *Inżynieria Maszyn*, 2009, 14, s. 20 – 30.
12. Zilong P., Zhenlong W., Yinghuai D., Hui C.: Development of a reversible machining method for fabrication of microstructures by using micro-EDM. *Journal of Materials Processing Technology* 210, 2010, s. 129 – 136.
13. Liu K., Lauwers B., Reynaerts D.: Process capabilities of Micro-EDM and its applications. *Int J Adv Manuf Technol* 47, 2010, s. 11 – 19.
14. Muttamara A., Fukuzawa Y., Mohri N., Tani T.: Probability of precision micro-machining of insulating Si₃N₄ ceramics by EDM. *Journal of Materials Processing Technology* 140, 2003, s. 243 – 247.
15. Yang C., Cheng C., Mai C., Wang A. C., Hung J., Yan B.: Effect of surface roughness of tool electrode materials in ECDM performance. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 50, 2010, s. 1088–1096.
16. Wuthrich R., Fascio V.: Machining of non-conducting materials Rusing electrochemical discharge phenomenon—an overview. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45, 2005, s.1095–1108.

17. Wuthrich R., Hof L. A.: The gas film in spark assisted chemical engraving (SACE)-A key element for micro-machining applications. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46, 2006, s.828–835.
18. Wuthrich R., Allagiu A.: Building micro and nanosystems with electrochemical discharges. *Electrochimica Acta* 55, 2010, s.8189–8196.
19. Singh Y. P., Jain K., Kumar P., Agrawal D.C.: Machining piezo electric (PZT) ceramics using an electrochemical spark machining (ECSM) process. *Journal of Materials Processing Technology* 58, 1996, s. 24 – 31.
20. Bhattacharyya B., Doloi B. N., Sorkhel S. K.: Experimental investigations into electrochemical discharge machining (ECDM) of non-conductive ceramic materials. *Journal of Materials Processing Technology* 95, 1999, s. 145 – 154.
21. Ziki J. D. A., Wuthrich R.: Forces exerted on the tool-electrode during constant-feed glass micro-drilling by spark assisted chemical engraving. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 73, 2013, s.47–54.
22. Fascio V., Wuthrich R., Bleuler H.: Spark assisted chemical engraving in the light of electrochemistry. *Electrochimica Acta* 49, 2004, s. 3997–4003.
23. Samant A. N., Dahotre N. B.: Laser machining of structural ceramics—A review. *Journal of the European Ceramic Society* 29, 2009, s. 969–993.
24. Knowles M. R. H., Rutterford G., Karnakis D., Ferguson A.: Micro-machining of metals, ceramics and polymers using nanosecond lasers. *Int J Adv Manuf Technol* 33, 2007, s. 95–102.
25. Hua Z., Jiawen X.: Modelling and Experimental Investigation of Laser Assisted Jet Electrochemical Machining. *Chinese Journal of Aeronautics* 23, 2010, s. 454-460.
26. Świczko – Żurek B.: Instrukcja do ćwiczeń z Biomateriałów pt.: Materiały biomedyczne, Katedra Inżynierii Materiałowej Politechniki Gdańskiej. Gdańsk, 2009, Instrukcja dostępna na stronie: <http://www.pg.gda.pl>
27. Albiński K.: Elektroerozyjna obróbka metali. Państwowe Wydawnictwo Techniczne, Warszawa 1954.
28. Abbas N. M., Yusoff N., Wahab R. M.: Electrical Discharge Machining (EDM): Practices in Malaysian Industries and Possible Change towards Green Manufacturing. *Procedia Engineering* 41, 2012, s. 1684 – 1688.
29. Ozhikandathil J., Morrison A., Packirisamy M., Wuthrich R.: Low resistive silicon substrate as an etch-stop layer for drilling thick SiO₂ by spark assisted chemical engraving (SACE). *Microsyst Technol* 17, 2011, s. 373 – 380.

Dr inż. Piotr Lipiec
 Mgr inż. Magdalena Machno
 Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji
 Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki
 31 – 155 Kraków, ul. Warszawska 24
 Tel.: (0-12) 374 3749
 e-mail: lipiec@mech.pk.edu.pl
 machno.magda@gmail.com