

NIEKONWENCJONALNE METODY OBRÓBKI MATERIAŁÓW NIEPRZEWODZĄCYCH PRĄDU ELEKTRYCZNEGO

Piotr LIPIEC, Sebastian SKOCZYPIEC

Streszczenie: Jednym z bardzo istotnych produktów rynku mikrotechnologii są elektromechaniczne systemy MEMS. Do ich wytwarzania wykorzystywane są zarówno materiały metalowe jak i różnego rodzaju materiały niemetalowe (kompozyty, polimery, materiały ceramiczne). Do ich obróbki wykorzystywane są różnego typu techniki, w tym te zaliczane do grupy metod niekonwencjonalnych (np. obróbka elektroerozyjna i elektrochemiczna). W przypadku materiałów słabo lub wcale nieprzewodzących prądu ich obróbka z wykorzystaniem EDM lub ECM wydaje się praktycznie niemożliwa, jednak odpowiednio dobierając parametry procesu, czy wykorzystując właściwości materiału obrabianego, można zastosować te metody. W artykule przedstawiono przegląd technik stosowanych do obróbki tego typu materiałów.

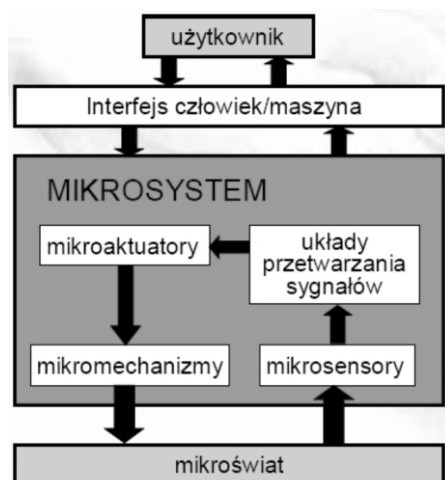
Słowa kluczowe: mikroobróbka EDM, mikroobróbka ECM, mikroobróbka.

1. Wprowadzenie

Wśród wielu kierunków rozwoju współczesnego przemysłu, mikro i nanotechnologie zajmują bardzo ważne miejsce. Dotyczy to zarówno ośrodków akademickich czy badawczo-rozwojowych, jak i dużych koncernów przemysłowych. W państwach wysoko uprzemysłowionych należą do priorytetowych programów naukowych i stanowią o nowoczesności i konkurencyjności danej gospodarki. Rynek mikrotechnologii charakteryzuje się bardzo dużą i stale rosnącą dynamiką rozwoju. Swoim zakresem obejmuje praktycznie wszystkie dziedziny przemysłu, poczynając od medycyny i przemysłu farmaceutycznego, przez chemiczny, elektroniczny, spożywczy, lotniczy, maszynowy czy wojskowy [8]. Postępująca miniaturyzacja powoduje wzrost zapotrzebowania na różnego typu mikroukłady zarówno elektroniczne jak i mechaniczne. Wśród nich istotne miejsce zajmują systemy elektromechaniczne nazywane MEMS (Micro – Electro – Mechanical – System). Układy te są zintegrowanymi obiektami elektryczno – elektroniczno – mechanicznymi, których zadaniem jest przetwarzanie różnego typu wielkości fizycznych (mechanicznych, termicznych czy chemicznych) na sygnały elektryczne i odwrotnie (rys. 1). Przyjmuje się, że ich wymiary charakterystyczne mieszczą się w granicach od 20 μm do 1 mm.

W przeciwieństwie od układów elektronicznych, które z reguły mają strukturę planarną, wytwarzanie systemów MEMS wiąże się z wykorzystaniem technologii pozwalającej na wykonanie skomplikowanych struktur przestrzennych. W większości wypadków układy te są wytwarzane z wykorzystaniem mikroobróbki powierzchniowej lub objętościowej. W układach MEMS występują człony wykonawcze i elektryczno-elektroniczne człony aktywności. Do wytwarzania tych drugich najczęściej stosuje się technologie obróbki krzemu. Najczęściej spotykane to: fotolitografia, osadzanie warstw i trawienie (stosowane są tu zarówno metody trawienia na sucho, jak i na mokro). Do wytwarzania elementów członów wykonawczych stosuje się różnego typu techniki obróbki skrawaniem jak

toczenie, frezowanie, wiercenie czy szlifowanie, obróbkę elektroerozyjną, wytłaczanie, napawanie, obróbkę laserową, a także obróbkę elektrochemiczną. Należy pamiętać, że techniki te są też bardzo często wykorzystywane do wytwarzania narzędzi potrzebnych do produkcji elementów systemu MEMS.



Rys. 1. Schemat Systemu MEMS [15]

2. Charakterystyka materiałów stosowanych do wytwarzania systemów elektromechanicznych

Jak już wspomniano, do wytwarzania układów MEMS stosowane są różnego typu materiały charakteryzujące się bardzo różnymi właściwościami fizycznymi, chemicznymi i mechanicznymi. Do najczęściej stosowanych należą:

- szkło, tlenek krzemu (SiO_2), azotek krzemu (Si_3N_4), węgiel krzemu (SiC), kwarc, diament, arsenek galu (GaAs),
- azotek glinu (AlN),
- tlenek glinu (odmiana α – Al_2O_3),
- polimery (PMMA) oraz materiały z pamięcią kształtu (stopy Ti - Ni) oraz metale (najczęściej Ag, Al., Au, Cu, Ir, Ni, Ti).

Szkło nie posiada uporządkowanej struktury dalekiego zasięgu. Sposób rozmieszczenia podstawowych elementów sieci przestrzennej przypomina rozmieszczenie molekuł w cieczy. Jednak nie posiadają one możliwości przemieszczania się lub jest ona bardzo mała ze względu na bardzo dużą lepkość. Według amerykańskiej normy ASTM-162 (1983) szkło jest zdefiniowane jako nieorganiczny materiał, który został schłodzony do stanu stałego bez krystalizacji. Do najważniejszych cech szkła można zaliczyć:

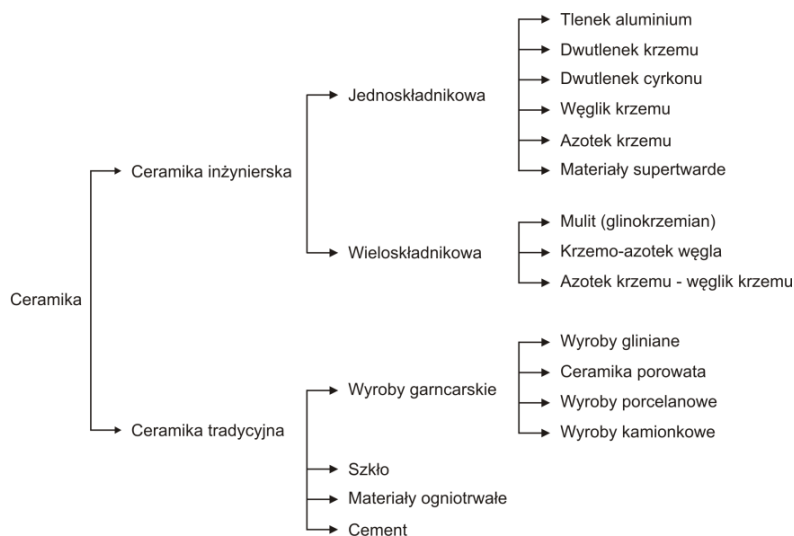
- wysoką odporność chemiczną,
- niską przewodność elektryczną i cieplną,
- biogodność,
- wysoką twardość i dużą kruchość oraz małą wytrzymałość na rozciąganie.

Jedną z bardzo często wykorzystywanych odmian szkła jest żaroodporne szkło borowo-krzemowe Pyrex, składające się z 8% tlenku boru i 85% tlenku krzemu. Następną ważną grupą są materiały ceramiczne. Są to wszystkie tworzywa i wyroby nieorganiczno-

niemetaliczne, w trakcie otrzymywania których istotnym procesem jest obróbka cieplna w temperaturze powyżej kilkuset stopni Celsjusza, np. spiekanie lub prażenie. Sieć przestrzenna materiałów ceramicznych jest bardziej złożona niż metali. Można wyróżnić ceramikę inżynierską, do której zalicza się materiały wytworzone w wyniku spiekania w wysokiej temperaturze (~ 1500 - 2100°C) z bardzo czystych, syntetycznych, drobnoziarnistych proszków (wielkość ziaren poniżej 1µm) bez udziału fazy szklistej, z takich związków jak: tlenki, węgliki, azotki, borki, fosforoki oraz związki złożone na ich podstawie.

Do najbardziej charakterystycznych cech materiałów ceramicznych można zaliczyć:

- wysoką temperaturę topnienia,
- niski ciężar właściwy,
- wysoką twardość i dużą kruchość,
- wysoką wytrzymałość na ściskanie,
- niską wytrzymałość na rozciąganie,
- niską rozszerzalność cieplną i małą przewodność cieplną,
- odporność na działanie wysokich temperatur i na działanie czynników chemicznych,
- dobre właściwości dielektryczne i izolacyjne.



Rys. 2. Klasyfikacja współczesnej ceramiki w zależności od przeznaczenia i składu [14]

Materiały ceramiczne znajdują szerokie zastosowanie w różnych obszarach przemysłu: budownictwie, hutnictwie, elektronice, transporcie lądowym, morskim i powietrznym, przemyśle kosmicznym. Stosowane są w miejscach narażonych na działanie czynników atmosferycznych, agresywnych związków chemicznych, zarówno nieorganicznych jak i organicznych, wysokiej temperatury. Z powodzeniem wykorzystywane są jako elementy piezoelektryczne w czujnikach ciśnienia i generatorach ultradźwięków.

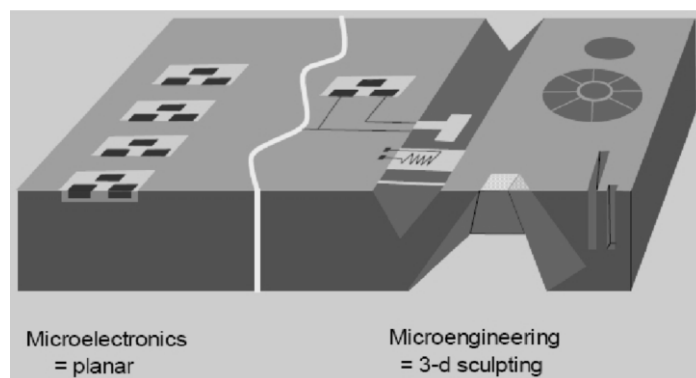
Ceramika znajduje również zastosowanie w medycynie, głównie w protezycie, jako główki protezy stawu biodrowego lub panewki stawu (ze względu na dużą tolerancję biologiczną oraz swoje właściwości mechaniczne), stawy kolanowe, protezy zębowe (ze

względu na obojętność chemiczną i estetykę). Możliwe jest wykorzystanie ceramicznych materiałów bioaktywnych w przypadku częściowych ubytków tkanki kostnej, które stymulują przebudowę, a nawet odbudowę tkanki kostnej. W produkcji układów MEMS materiały ceramiczne stosuje się w mikroakceleratorach, mikroreaktorach chemicznych, mikropompach, urządzeniach mikrofluidycznych, w urządzeniach medycznych (czujnikach przepływu, dozownikach leków).

Jednym z głównych problemów przy produkcji układów MEMS jest brak efektywnych metod kształtowania struktur wymiarowych. Najczęściej stosowane jest trawienie chemiczne, które jest procesem drogim i czasochłonnym. Spośród alternatywnych metod kształtowania można wymienić obróbkę laserową, ultradźwiękową, wycinanie strugą wodno-ścierną. Duży problem stanowi wytwarzanie smukłych struktur (np. smukłych otworów w szkle).

3. Specyfika mikrowytwarzania

Wytwarzanie mikroelementów obejmuje zarówno ubytkowe jak i przyrostowe sposoby wytwarzania. Największy obszar zastosowania obejmuje odlewanie i formowanie plastyczne które najczęściej wykorzystywane jest do produkcji seryjnej. W przeciwieństwie do układów elektronicznych wysokiej skali integracji, kształtowane powierzchnie mikronarzędzi są najczęściej powierzchniami krzywoliniowymi wewnętrznymi lub zewnętrznymi (rys. 3). Stosowanie metod niekonwencjonalnych pozwala na osiągnięcie wysokiej efektywności techniczno – ekonomicznej, zwłaszcza przy wytwarzaniu struktur mikrogeometrycznych w elementach maszyn, MEMS, oprzyrządowania i narzędzi oraz na etapie projektowania i testowania nowych mikrosystemów (wykonawstwo prototypów przy możliwie małych nakładach finansowych) [8].



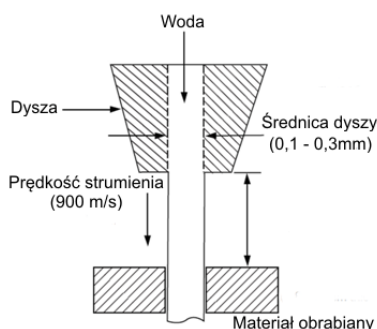
Rys. 3. Schemat przedstawiający różnicę pomiędzy strukturą układów elektronicznych i elektro-mechanicznych [13]

Wśród metod niekonwencjonalnych wykorzystywanych do wytwarzania systemów elektromechanicznych można wymienić mikroobróbkę elektroerozyjną, elektrochemiczną, laserową czy ultradźwiękową. Odgrywają one dużą rolę w fazie przygotowania produkcji, np. wytwarzania form, stempli, narzędzi lub do projektowania, modelowania i testowania nowych rozwiązań. Zalety i ograniczenia metod niekonwencjonalnych zostaną przedstawione poniżej na przykładzie wybranych rodzajów obróbek.

4. Wybrane niekonwencjonalne metody obróbki materiałów izolacyjnych

4.1. Wycinanie strugą wodną i wodno- ścierną

Wycinanie strugą wodno-ścierną, to grupa technologii przecinania różnego typu materiałów z wykorzystaniem strumienia wody pod wysokim ciśnieniem. Użycie samej wody jest ograniczone do niektórych rodzajów materiałów (tworzywa sztuczne, szkło), przecinanie twardszych materiałów wykonuje się z dodatkiem ziaren ściernych (Abrasive Water Jet) [12].



Rys. 4. Schemat procesu cięcia strumieniem wodno-ściernym [12]

Do najczęstszych obszarów zastosowań tego rodzaju obróbki można zaliczyć wycinanie [12, 16]:

- materiałów kruchych, twardych, ciągliwych, miękkich,
- nietypowych, skomplikowanych elementów,
- elementów wymagających wysokiej dokładności wymiarowo – kształtowej,
- części wchodzących w skład prototypów maszyn i urządzeń,
- pojedynczych części jak i elementów produkowanych seryjnie.

W obrabianym materiale nie obserwuje się stref wpływu ciepła, nie ma zmian właściwości warstwy wierzchniej. Technologię można stosować do materiałów miękkich (gąbka, żywność) jak i bardzo twardych (stal nierdzewna). Ten rodzaj obróbki może być używany do cięcia materiału o grubości kilkunastu centymetrów. Rozdzielczość ograniczona jest grubością strugi wodno-ściernej. Wysoki koszt obróbki spowodowany jest ceną ścierniwa, a także kosztami eksploatacyjnymi (pompa wysokociśnieniowa, konieczność utylizacji szlamu poobrobkowego) [16].

4.2. Obróbka ultradźwiękowa

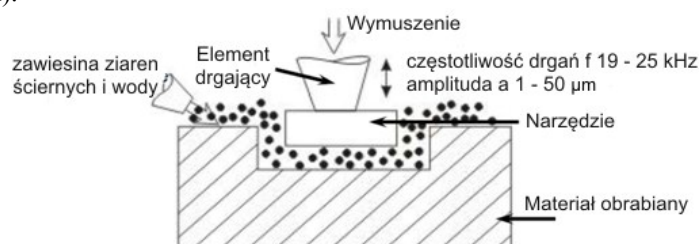
Obróbka ultradźwiękowa polega na wykruszaniu niewielkich cząstek materiału wskutek uderzenia czoła koncentratora drgań w ziarna ściernie znajdujące się w zawieszynie wodnej wprowadzonej w szczelinę między narzędzie, a obrabiany materiał (rys.5). Częstotliwość drgań ultradźwiękowych najczęściej mieści się w przedziale od 19 do 25 kHz o amplitudzie między 10 a 50 μm [17, 18]. W procesie używana jest ciecz robocza, której zadaniem jest [18, 19]:

- doprowadzenie ziaren ściernych do strefy obróbki,

- przeniesienie drgań ultradźwiękowych (powodują one m. in. zjawisko kawitacji),
- usuwanie cząstek wykruszonego materiału,
- chłodzenie strefy obróbki.

Koncentracja ścierniwa w wodzie jest na poziomie 30 – 40%. Dodatkowo zawiera ona dodatki antykorozyjne. Najczęściej używane ziarna ściernie to: węglík krzemu, węglík boru, korund, diament.

Obróbka ultradźwiękowa znajduje zastosowanie w drążeniu otworów o różnych kształtach w materiałach nie przewodzących prądu elektrycznego, takich jak: szkło, ceramika, kwarc, kamienie szlachetne, kompozyty, węgliki spiekane. Na dokładność obróbki ma duży wpływ wielkość ziaren, warunki wymiany produktów procesu, częstotliwość i amplituda drgań narzędzia (dokładność wzrasta wraz ze wzrostem częstotliwości).



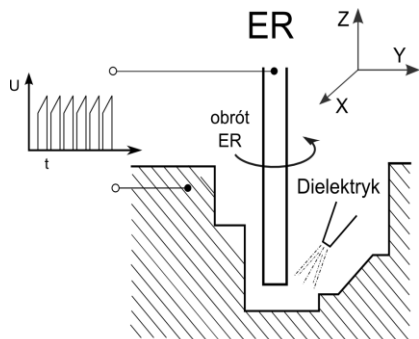
Rys. 5. Schemat procesu obróbki ultradźwiękowej [20]

4.3. Obróbka elektroerozyjna

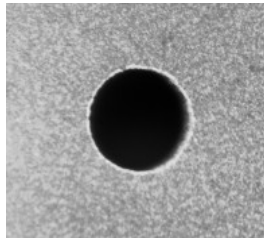
Obróbka elektroerozyjna polega na usuwaniu nadmiaru z przedmiotu obrabianego w wyniku zjawisk towarzyszących wyładowaniom elektrycznym (topienie, parowanie, rozrywanie i kruszenie materiału) w obszarze szczeliny między elektrodą roboczą, a przedmiotem obrabianym [11, 16]. Szczelina wypełniona jest cieczą dielektryczną (np.: wodą dejonizowaną, naftą, mieszaniną węglowodorów ropopochodnych), której zadaniem, oprócz inicjowania procesu wyładowania, jest usuwanie produktów erozji z przestrzeni międzyelektrodowej i chłodzenie obszaru obróbki (rys. 6). Ponieważ mechanizm usuwania nadmiaru oparty jest na zjawisku wyładowań elektrycznych, dlatego ten rodzaj obróbki stanowi racjonalną alternatywę kształtowania elementów trudnoskrawalnych takich jak utwardzona stal, różnego typu węgliki, super twarde materiały, itp., przewodzących prąd elektryczny [11]. Obróbka elektroerozyjna umożliwia wykonanie skomplikowanych, krzywoliniowych kształtów z dużą dokładnością, dlatego często jest wykorzystywana do wytwarzania narzędzi, form wtryskowych czy matryc [6].

Obecnie, w zależności od rodzaju stosowanego narzędzia i kinematyki procesu, można wyróżnić następujące kierunki rozwoju mikroobróbki elektroerozyjnej [7, 8]:

- wycinanie elektroerozyjne – odmiana obróbki, w trakcie której docelowy element wycinany jest drutem, którego średnica może wynosić nawet 20 μm ,
- drążenie elektroerozyjne – kształtowanie odbywa się w wyniku odwzorowania kształtu elektrody roboczej w przedmiocie obrabianym,
- wiercenie elektroerozyjne – otrzymuje się otwory o średnicach do 5 μm ,
- obróbka elektroerozyjna elektrodą uniwersalną – w tej odmianie kształt powierzchni obrabianej jest odwzorowaniem trajektorii elektrody roboczej.



Rys. 6. Schemat obróbki elektroerozyjnej elektrodą uniwersalną



Rys. 7. Zagłębienie wykonane w ceramice (węglík boru)

W przypadku materiałów słabo przewodzących i nieprzewodzących obróbka jest bardzo utrudniona, jednak możliwa do wykonania. Aby zainicjować proces stosuje się maski z materiałów przewodzących, lub pokrywa się powierzchnie obrabiane proszkiem lub farbą przewodzącą. Innym sposobem jest stosowanie bardzo wysokich napięć, co w efekcie prowadzi do zainicjowania wyładowania. W przypadku niektórych materiałów ceramicznych czy kompozytowych zdarza się, że w jego strukturze, np. jako spoiwo występuje materiał przewodzący prąd elektryczny. To wystarczy, żeby, przy odpowiednio dobranych warunkach procesu, doszło do zainicjowania wyładowania.

Przykładem takiego materiału jest węglík boru. Pomimo, że jest to materiał nieprzewodzący, jednak poddaje się on obróbce elektroerozyjnej. Na rys. 7 przedstawione jest zagłębienie wykonane w takim materiale. Obróbka była przeprowadzona elektrodą roboczą z węglíka wolframu o średnicy 0,4 mm. Średnice powstałych zagłębíeń mają ok. 0,42 mm. Największym problem w tego typu obróbce jest doprowadzenie dielektryka w obszar obróbki oraz ewakuacja produktów erozji elektrycznej. Do prawidłowej obróbki konieczny jest odpowiedni dobór parametrów, w tym przypadku napięcia i natężenia prądu.

W trakcie obróbki elektroerozyjnej materiałów słabo przewodzących prąd elektryczny bardzo istotnym problemem jest odpowiedni dobór dielektryka. Ponieważ w przypadku takich materiałów stosuje się wyższe napięcia i prądy, dlatego może dojść do zapalenia się dielektryka będącego pochodną nafty, czy ogólnie mieszaniną węglowodorów. Kolejną istotną kwestią jest zużycie elektrody roboczej, jednak jest to w dużej mierze związane z konkretnymi parametrami procesu i z konkretnym materiałem.

5. Obróbka wyładowaniami elektrycznymi w elektrolicie (SACE)

5.1 Charakterystyka procesu

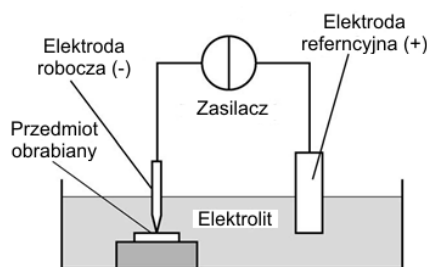
Obróbka z wykorzystaniem wyładowań w elektrolicie (SACE – Spark Assisted Chemical Engraving) polega na usuwaniu nadmiaru w wyniku kombinacji oddziaływań termicznych i chemicznych na obrabiany materiał (rys.8). Główne zjawiska wpływające na proces to [1,2,5]:

- topienie i parowanie w wyniku wyładowań elektrycznych,
- trawienie chemiczne w podwyższonej temperaturze,
- pęknięcia w wyniku różnej rozszerzalności cieplnej składników materiału,
- naprężenia termiczne, mikropęknięcia i odpryski,

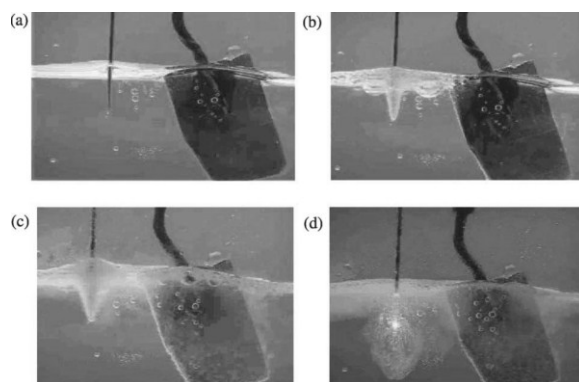
- oddziaływanie mechaniczne w wyniku wzrostu pęcherzyków gazu i ruchu elektrolitu (kawitacja).

Pomimo, że proces ten jest znany od około 40 lat, jednak do tej pory nie znalazł szerokiego zastosowania w przemyśle. Potencjalnie można go zastosować do dużej grupy materiałów nieprzewodzących, takich jak szkło, kwarc, materiały ceramiczne. Można go stosować w operacjach mikrowiercenia, obróbki elektrodą nieprofilowaną, wycinania [5]. Wydajność procesu dochodzi do kilkudziesięciu mg/min przy średnicach elektrody w granicach 1 mm. Do najważniejszych problemów należy niska powtarzalność związana z dynamiką i stabilnością warstwy pęcherzyków gazu wokół elektrody [3, 4].

Proces rozpoczyna się w momencie przekroczenia wartości napięcia krytycznego. Wtedy pojawiające się wokół elektrody roboczej pęcherzyki gazu łączą się wytwarzając osłonę gazową w której mogą zachodzić wyładowania elektryczne (rys.9). W dotychczasowych badaniach stwierdzono, że tempo usuwania materiału wzrasta wraz ze wzrostem stężenia elektrolitu, jednak do pewnej wartości, powyżej której zaczyna spadać. W trakcie obróbki następuje zużycie elektrody, co tłumaczy się zjawiskami elektrochemicznymi, które prowadzą do jej roztwarzania. Ze względu na swoją złożoność, nie udało się jak dotąd stworzyć jednego, spójnego modelu procesu, który potrafi wyjaśnić wszystkie, zachodzące w jego trakcie zjawiska. Proces silnie zależy nie tylko od stężenia elektrolitu, ale także od jego rodzaju, co związane jest z rodzajem jonów i ich wpływem na np.: elektrodę roboczą. Pomimo swojej prostoty i obiecujących wyników w skali laboratoryjnej (m. in. dużej wydajności małej chropowatości), ze względu na problemy z osiągnięciem powtarzalności obróbki nadal jest w fazie badawczej [1].



Rys. 8. Schemat procesu obróbki z wykorzystaniem wyładowań w elektrolicie [1]



Rys. 9. Zjawisko wyładowań elektrycznych w elektrolicie dla różnych napięć: a) 0V, b) 7,5V, c) 15V, d) 30V [1]

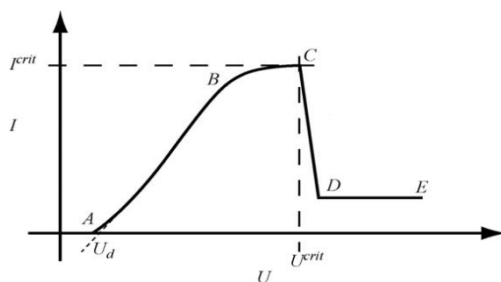
5. 2. Badania doświadczalne procesu SACE

Proces wyładowań elektrycznych można opisać ilościowo z wykorzystaniem charakterystyki prądowo – napięciowej, w których możemy wyróżnić 4 charakterystyczne regiony (rys. 10) [1, 2]:

- zakres rezystancyjny, mieszczący się w przedziale A-B, w którym zależność $U(I)$ jest liniowa. Typowe zakres napięć dla tego regionu to 2 – 10V. W tym regionie mamy do czynienia z procesem elektrolizy. Wraz ze zwiększaniem napięcia następuje zwiększenie intensywności wydzielanego na katodzie gazu (wynika to również ze wzrostu temperatury i wrzenia elektrolitu);
- zakres B-C, czyli tzw. zakres limitu prądowego, w którym średnie natężenie prądu ma wartość graniczną. Wpływ na nią mają wymiary i odległość pomiędzy elektrodami oraz koncentracja elektrolitu;
- zakres niestabilności (C-D), w którym zachowanie układu elektrochemicznego może być zbliżone do obszaru B-C, lub mogą zachodzić periodyczne i nieregularne w czasie wyładowania elektryczne;
- zakres D-E, czyli zakres parametrów, dla których wokół elektrody tworzy się osłona gazowa i zachodzą wyładowania elektryczne. W regionie D-E zachodzi obróbka materiału.

Na podstawie danych literaturowych można stwierdzić, że mechanizm obróbki SACE związany jest z następującymi zjawiskami [1, 4, 5]:

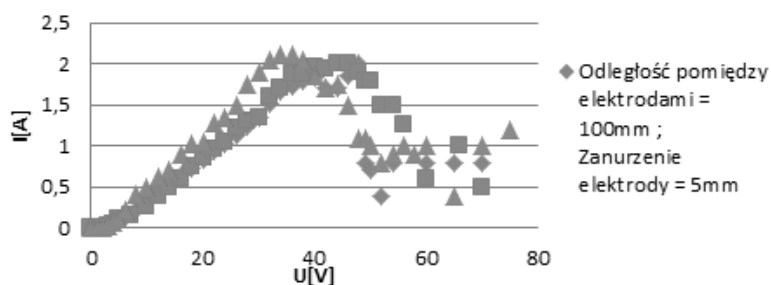
- topienie się i parowanie materiału w wyniku wyładowań elektrycznych,
- trawienie w podwyższonej temperaturze,
- oddziaływania mechaniczne związane z zapadającymi się pęcherzykami gazu (kawitacja) mechaniczne spowodowane rozszerzającym się gazem,
- naprężenia termiczne, które powodują odpryski i mikro-pęknięcia materiału.



Rys. 10. Schemat przedstawiający charakterystykę prądowo – napięciową z oznaczonymi punktami charakteryzującymi przebieg obróbki [1].

W Instytucie Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, w ramach prac [9, 10] przeprowadzono badania wstępne procesu obróbki wyładowaniami elektrycznymi w elektrolicie. Pozwoliły one na określenie zakresu podstawowych parametrów procesu. Na wstępie określono wpływ głębokości zanurzenia, średnicy katody oraz odległości pomiędzy elektrodami na charakterystyki napięciowo – prądowe procesu. Próby przeprowadzono z zastosowaniem zasilacza prądu stałego MATRIX MPS-7163L-1 charakteryzującego się zakresem $U = 0-160VDC$ i maksymalnym natężeniem prądu $I = 3A$.

Jako elektrolitu użyto wodnego roztworu NaNO_3 o stężeniu wagowym 20%. Na otrzymanych charakterystykach widać jak wraz ze wzrostem napięcia rośnie prąd przepływający przez elektrolit, by po osiągnięciu wartości krytycznej gwałtownie spaść. W tym zakresie napięć dochodzi do powstania warstwy gazu wokół elektrody roboczej, wyładowań elektrycznych i w ich następstwie obróbki. W badanym przypadku jest to zakres napięć między 60 a 80 V.

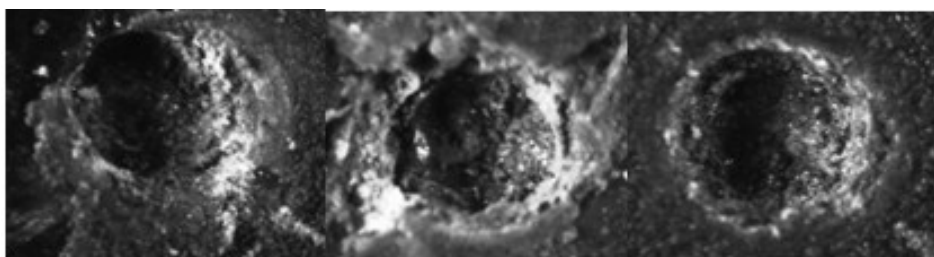


Rys. 11. Wykres charakterystyk prądowo – napięciowych. Średnica elektrody roboczej – 0,4 mm

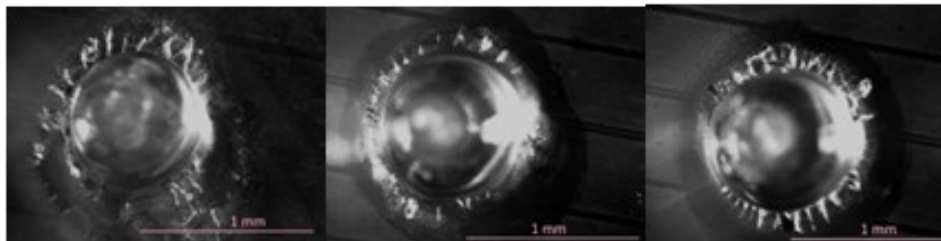
Warto również zaznaczyć, że zbyt duże zanurzenie elektrody ($> 5\text{ mm}$) powoduje rozszerzenie zakresu U i I , dla których zachodzi elektroliza. Ze względu na ograniczenie prądowe zasilacza dla tych przypadków nie udało się osiągnąć wartości krytycznego natężenia prądu. Podobnie było w przypadku zastosowania elektrody o średnicy 1,2 mm.

Na podstawie otrzymanych zależności określono wartości napięcia, dla których przeprowadzono próby mikro-wiercenia dla granitu i szkła laboratoryjnego z zastosowaniem elektrody o średnicy 0,4 mm. Na rys. 12 przedstawione zostały wybrane otwory wykonane w szkle, a na rys. 13 w granicie.

Otrzymane otwory przeanalizowano pod kątem powtarzalności wykonania. Wyniki tej analizy zostały przedstawione w tab. 1 i 2. Różnica pomiędzy maksymalną i minimalną średnicą otworu dla granitu wynosiła $114,5\ \mu\text{m}$, a dla szkła $106\ \mu\text{m}$. W przypadku obróbki szkła stwierdzono również, że niewielka zmiana napięcia w zakresie, w którym prowadzona jest obróbka prowadzi do zmiany charakteru procesu. W wyniku zbyt dużej energii wyładowań następuje szybkie zniszczenie (pęknięcie) obrabianego elementu (rys.14).



Rys. 12. Otwory wykonane w granicie, parametry obróbki: $U = 50\ \text{V}$, elektrolit NaNO_3 , 20%, prędkość obrotowa elektrody roboczej 50 obr./min, posuw wglębny elektrody $30\ \mu\text{m}/\text{min}$, czas obróbki 30 min.



Rys. 13. Otwory wykonane w szkle laboratoryjnym, parametry obróbki: $U = 50\text{ V}$, elektrolit NaNO_3 , 20%, prędkość obrotowa elektrody roboczej 100 obr/min, posuw wgłębny elektrody $50\ \mu\text{m}/\text{min}$, czas obróbki 22 min

Z przeprowadzonych wstępnych prób wynika, że proces SACE umożliwia kształtowanie wybranych materiałów trudnoobrabialnych, jednak na obecnym etapie badań, prowadzenie w pełni kontrolowanej i powtarzalnej obróbki jest utrudnione. W tym zakresie powinny być prowadzone dalsze badania, w szczególności w aspekcie zastosowania w operacjach wiercenia

Tab. 1. Analiza rozrzutu średnic zagłębień wykonanych w granicie.

Numer otworu	Średnica (D) [μm]	Średnia arytmetyczna średnic (D_{sr}) [μm]	Różnica ($ D - D_{\text{sr}} $) [μm]
1	522,1	587,3	65,2
2	628,9		41,6
3	589,6		2,3
4	559,5		27,8
5	636,6		49,3

Tab. 2. Analiza rozrzutu średnic zagłębień wykonanych w szkle.

Otwór	Średnica [mm]	Średnia arytmetyczna średnic [mm]	Odchylenie standardowe średnic [mm]	Rozstęp [mm]
O1	0,9371	0,8813	0,0386	0,1064
O2	0,8773			
O3	0,8925			
O4	0,8687			
O5	0,8307			



Rys. 14. Efekt wyładowań przy użyciu 80V, szkło popękane, średnica wyładowań około 1,5 mm

6. Podsumowanie

Bardzo dynamiczny rozwój mikrotechnologii spowodował, że wkroczyła ona praktycznie do każdego obszaru współczesnej techniki. Jej zakres spowodował, że praktycznie większość ze znanych materiałów jest w niej wykorzystywana. Pociągnęło to za sobą konieczność opracowania nowych technologii mikrowytwarzania. Ze względu na swoje cechy w obszarze tym pojawiły się również metody niekonwencjonalne, takie jak obróbka laserowa, ultradźwiękowa, elektroerozyjna, elektrochemiczna czy strumieniem wodno-ściernym. Większość z nich można stosować do obróbki materiałów trudnoskrawalnych, co jest bardzo dużą zaletą, zwłaszcza w obszarze mikrowytwarzania, gdzie dochodzą jeszcze problemy związane z pojawianiem się dużych sił np.: w przypadku obróbki skrawaniem. Dla obróbki elektrochemicznej i elektroerozyjnej czynnikiem decydującym o możliwości obróbki jest przewodnictwo elektryczne obrabianego materiału. Dobierając jednak odpowiednio warunki procesu można skutecznie przeprowadzić obróbkę materiałów słabo lub wcale nie przewodzących prądu elektrycznego. Przykładem tego może być obróbka elektroerozyjna materiałów ceramicznych. Często w tego typu materiałach stosowane są jako jeden ze składników materiały przewodzące. Powoduje to, że przy odpowiednio dobranych parametrach można z powodzeniem prowadzić obróbkę. Jest to szczególnie istotne w przypadku materiałów bardzo twardych czy kruchych. Ponieważ jednak materiały te cechują się bardzo dużym oporem, dlatego, żeby zaszedł proces erozji elektrycznej konieczne jest dostarczenie bardzo dużej energii do układu. Oznacza to stosowanie dużych napięć i prądów, co w przypadku stosowania dielektryków będących pochodnymi węglowodorów może powodować ich zapalenie. Oprócz tego stosowanie większych napięć powoduje zwiększenie energochłonności procesu i zwiększenie kosztów jednostkowej produkcji. To powoduje, że technologia ta może znaleźć zastosowanie tylko w przypadku, gdy zastosowanie metod tradycyjnych jest niemożliwe.

Innym przykładem tego jest wyładowaniami elektrycznymi w elektrolicie (SACE). Dzięki odpowiednio zbudowanemu układowi można uzyskać w elektrolicie wyładowania, za pomocą których można prowadzić obróbkę. Dobór parametrów pozwala na osiągnięcie odpowiednich wartości napięcia krytycznego i prądu krytycznego, które pozwalają uzyskać w obszarze obróbki pęcherza gazowego, w którym następują wyładowania elektryczne. Pomimo swej prostoty proces ten w dalszym ciągu jest w fazie badawczej i nie został jeszcze wdrożony w technikach wytwarzania. Jest to głównie związane z problemem uzyskania powtarzalnych i stabilnych wyników. Wynika to w dużej mierze z samej złożoności procesu, w którym nakładają się na siebie kilka zjawisk prowadzących do usuwania materiału. Powoduje to duże problemy z oszacowaniem ilościowego i

jakościowego wpływu poszczególnych parametrów na proces. Można tu wymienić trudności z kontrolowaniem momentu powstania i utrzymywania pęcherza gazowego, w którym zachodzą wyładowania, czy zużywanie się elektrody roboczej zarówno pod wpływem wyładowań, jak i procesów elektrochemicznych. Proces bardzo silnie zależy od rodzaju elektrolitu i jego stężenia. To powoduje, że nadal trudno jest opanować ten proces i wykorzystać w procesach obróbczych. Przeprowadzone badania pokazały, że w przypadku granitu i szkła można uzyskać regularne kształty. Otrzymane wyniki pozwalają na stworzenie wytycznych do planowania dalszych prac w tym kierunku.

Badania zostały zrealizowane w ramach projektu rozwojowego NR03-0031-10/2010 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

1. Wüthrich R., Fascio V.: Machining of non-conducting materials using electrochemical discharge phenomenon - an overview. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004.
2. Kurafuji H., Suda K.: Electrical discharge drilling of glass. *Annals of the CIRP* 16 (1968).
3. Wüthrich R., Hof L.: The gas film in spark assisted chemical engraving (SACE) - a key element for micro-machining applications. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005.
4. Wüthrich R.: Spark assisted chemical engraving - a stochastic modeling approach. Dissertation Thesis (2776), Swiss Federal Institute of Technology, EPF Lausanne, 2003.
5. Wüthrich R., Allagui A.: Building micro and nanosystems with electrochemical discharges *Electrochimica Acta* 55 – 2010. Jęgo 8
6. Abbas N.M., Solomon D.S., Bahari M.F.: A review on current research trends in electrical discharge machining (edm). *Int. J. of Mach. Tools and Manuf.*, 47:2007, 1214-1228.
7. Pham D.T., Dimov S.S., Bigot S., Ivanov A., Popov K.: Micro-edm - recent developments and research issues. *J. of Mater. Process. Technol.*, 149:2004, 50-57.
8. Ruszaj A., Gawlik J., Skoczypiec S.: Stan badań i kierunki rozwoju wybranych niekonwencjonalnych procesów wytwarzania. *Inżynieria Maszyn*, Wydawnictwo Wrocławskiej Rady FSNT NOT 2007, 14(1):2009, 7-19.
9. Drozd K.: Zastosowanie procesu Spark Assisted Chemical Engraving (SACE) do wiercenia otworów w granicie. Ocena jakości powtarzalności wykonanych otworów. Praca dyplomowa inżynierska, Politechnika Krakowska, Kraków, 2013.
10. Grzesik K.: Zastosowanie wyładowań elektrycznych w elektrolicie do obróbki szkła. Ocena powtarzalności kształtowania na przykładzie wiercenia mikrootworów. Praca dyplomowa inżynierska, Politechnika Krakowska, Kraków, 2013.
11. Perończyk J.: Obróbka elektroerozyjna kompozytów na podstawie metalowej i ceramiki technicznej. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 2008.
12. El-Hofy H.: *Advanced Machining Processes: Nontraditional and Hybrid Processes*. McGraw-Hill Co., New York, 2005.
13. Bossak M., Kozak J., Szmidt J.: Prognoza rozwoju mikro i nanotechnologii w Polsce w latach 2004 – 2007. Komitet Budowy Maszyn PAN. Warszawa, 2004.

14. Materiały ceramiczne. Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej, wykład dostępny na stronie internetowej: <http://www.im.mif.pg.gda.pl>.
15. Pióro Z.: Wstęp do Mikro Systemów. Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki Politechniki Warszawskiej, wykład dostępny na stronie internetowej: <http://pmik.imio.pw.edu.pl>.
16. Ruszaj A.: Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi. Instytut Obróbki Skrawaniem IOS, Kraków, 1999.
17. Glimore J.R.: Ultrasonic machining and polishing. *Manufacturing Science and Engineering ASME*, 64: 1993, 785 – 793.
18. Sliwinski A.: Ultradźwięki i ich zastosowania. Wydawnictwo Naukowo - Techniczne. Warszawa, 2001.
19. Kremer D., Saleh S. M., Ghabrial S.R., Moisan A.: The state of art of ultrasonic machining. *Annals of the CIRP*, 30(1), 1981.
20. Skoczypiec S.: Badania wspomaganego drganiami ultradźwiękowymi procesu obróbki elektrochemicznej elektrodą uniwersalną. Rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, 2006.

Dr inż. Piotr Lipiec
Dr inż. Sebastian Skoczypiec
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@m6.mech.pk.edu.pl
skoczypiec@m6.mech.pk.edu.pl