

Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji
Wydział Mechaniczny
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

Praca doktorska

Modelowanie matematyczne procesu kształtowania
elektrochemicznego mikroelementów

Autor: mgr inż. Piotr Lipiec
Promotor: prof. dr hab. inż. Adam Ruszaj

Kraków, 2011.



Podziękowania

Pragnę wyrazić serdeczne podziękowania promotorowi Profesorowi Adamowi Ruszajowi za wkład merytoryczny oraz cenne uwagi podczas pisania niniejszej pracy. Dziękuję Narodowemu Centrum Nauki za dofinansowanie pracy (grant promotorski Nr N N503 217138).

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów	5
1 ANALIZA TEMATU.....	7
1.1 Uzasadnienie wyboru tematu.	7
1.2 Ogólna charakterystyka procesu obróbki elektrochemicznej.....	11
1.3 Drążenie elektrochemiczne	23
1.4 Obróbka elektrochemiczna elektrodą uniwersalną w kinematyce frezowania. 27	
1.5 Wnioski z analizy literatury i wstępnych badań własnych.	30
1.6 Cel i zakres pracy.....	30
2 MODELOWANIE MATEMATYCZNE – MATEMATYCZNY MODEL DEDUKCYJNY	32
2.1 Cele i założenia matematycznego modelowania procesu elektrochemicznego kształtowania mikroelementów.....	32
2.2 Uproszczony model matematyczny geometrii powierzchni w trakcie procesu roztwarzania elektrochemicznego.....	34
2.3 Uproszczony model pola elektrycznego w szczelinie międzyelektrodowej...	38
2.4 Symulacje komputerowe.	46
3 STANOWISKO BADAWCZE	55
3.1 Opis stanowiska badań.	55
3.1.1 Układ napędów	58
3.1.2 Oprogramowanie sterujące.....	60
3.1.3 Mocowanie elektrody roboczej.....	60
3.1.4 Układ obiegu cieczy roboczej.....	62
3.1.5 Zasilacz impulsowy.	64
3.1.6 Urządzenia kontrolno – pomiarowe.....	65
3.1.7 Układ obserwacyjny.	65
3.1.8 Przygotowanie elektrod.....	66
4 BADANIA DOŚWIADCZALNE – MATEMATYCZNY MODEL STATYSTYCZNY	71

4.1	Metodyka badań i plan eksperymentu.....	71
4.2	Metody i technika pomiarów.....	74
4.3	Analiza wyników badań.....	77
5	WYTYCZNE DO PROJEKTOWANIA I REALIZACJI PROCESU TECHNOLOGICZNEGO WYTWARZANIA MIKROELEMENTÓW OBRÓBKĄ ECM – CNC.....	114
6	PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	122
7	BIBLIOGRAFIA	128

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

Wykaz oznaczeń

a	grubość usuniętego naddatku
α	współczynnik przejścia
β	koncentracja fazy gazowej
C	pojemność warstwy podwójnej
C_e	stężenie elektrolitu
C_H	koncentracja objętościowa wodoru
η	wydajność prądowa roztwarzania anodowego
φ_a	potencjał anody
φ_k	potencjał katody
F	liczba Faraday'a
F_0	początkowy kształt powierzchni obrabianej
I	natężenie prądu
i	gęstość prądu
i_0	gęstość prądu wymiany
i_m	gęstość strumienia masy
k_w	współczynnik wypełnienia
ηk_v	współczynnik obrabialności elektrochemicznej
m	masa materiału usuniętego z przedmiotu obrabianego
R	stała gazowa
R_e	oporność elektrolitu
S_0	grubość początkowej szczeliny
θ	temperatura
τ	stała czasowa ładowania warstwy podwójnej
T_e	temperatura elektrolitu
t_i	czas impulsu roboczego
t_p	czas przerwy między impulsami
U	napięcie robocze
V_f	prędkość przesuwu elektrody roboczej

Wykaz skrótów

ECM obróbka elektrochemiczna (ang. Electrochemical Machining)

ER elektroda robocza

PECM impulsowa obróbka elektrochemiczna (ang. Pulse Electrochemical Machining)

PO przedmiot obrabiany

1 ANALIZA TEMATU

1.1 Uzasadnienie wyboru tematu.

Mikro- i nanotechnologie stanowią obecnie jeden z najważniejszych obszarów zainteresowań produkcyjnych czołowych firm zagranicznych i stanowią jeden z głównych kierunków prac badawczo rozwojowych w programach naukowych najbardziej rozwiniętych państw. Rynek mikrotechnologii charakteryzuje się coraz większą dynamiką rozwoju [5]. Postępująca miniaturyzacja powoduje zwiększanie się zapotrzebowania na różnego typu mikroukłady, wśród których istotne miejsce zajmują elektromechaniczne mikrosystemy nazywane MEMS (Micro – Electro – Mechanical – System). Układy MEMS są zintegrowanymi obiektami elektroniczno - elektryczno – mechanicznymi, przetwarzającymi różne wielkości mechaniczne, termiczne, chemiczne na sygnały elektryczne i odwrotnie. Przyjmuje się, że ich wymiary mieszczą się w przedziale od 20 μm do 1 mm.

W przeciwieństwie do scalonych układów elektronicznych bardzo wysokiej skali integracji, wytwarzanie układów MEMS wiąże się z zastosowaniem technologii umożliwiających wytworzenie skomplikowanych, przestrzennych struktur [17]. Z reguły układy MEMS są wytwarzane w dwóch technologiach:

- mikroobróbka powierzchniowa,
- mikroobróbka objętościowa.

W układach MEMS występują człony wykonawcze i człony elektryczno – elektroniczne. Do wytwarzania tych drugich najczęściej stosuje się różnego typu technologie obróbki krzemu. Najbardziej rozpowszechnione to fotolitografia, gdzie stosuje się promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu ultrafioletu lub rentgenowskiego, osadzanie warstw oraz trawienie (stosowane są tu zarówno metody trawienia na sucho, jak i na mokro). Do wytwarzania elementów członów wykonawczych stosuje się techniki obróbki skrawaniem (toczenie, frezowanie, wiercenie, szlifowanie), obróbkę elektroerozyjną, wytłaczanie, napawanie, obróbkę laserową, obróbkę elektrochemiczną. Oprócz wytwarzania układów MEMS, techniki te są używane do wytwarzania narzędzi potrzebnych do ich produkcji.

Najpopularniejszym materiałem do wytwarzania układów MEMS jest krzem, stosowany w postaci wafli lub cienkich warstw. Jego zastosowanie uzasadnione jest doskonałymi właściwościami mechanicznymi. Dodatkowo bardzo dobrze integruje się

z układami elektronicznymi, które w większości wypadków, wykonane są z materiałów na bazie krzemu. W trakcie wytwarzania układów MEMS wykorzystuje się również metale i ich stopy, np. maski używane do trawienia, elementy przewodzące, lub stanowiące osnowę. Zastosowanie metali i ich stopów jest nieodzowne także w przypadku budowy układu o właściwościach magnetycznych.

Do najważniejszych zalet układów MEMS należy zaliczyć:

- małe wymiary,
- mała waga,
- mały pobór mocy,
- wysoki poziom integracji,
- szeroka gama zastosowań,
- niezawodność.

Układy MEMS mają bardzo szerokie zastosowanie, a co za tym idzie bardzo zróżnicowaną budowę.

Wytwarzanie mikroelementów jest bardzo dynamicznie rozwijającym się obszarem zarówno w ubytkowych, jak i przyrostowych sposobach wytwarzania. Wiodącymi metodami są tu: formowanie plastyczne, obróbka plastyczna, odlewanie, szlifowanie, obróbka laserowa, obróbka elektroerozyjna, obróbka elektrochemiczna [23]. W produkcji mikroelementów za pomocą metod przyrostowych, używa się selektywnego spiekania laserowego bądź stereolitografii.

Największy obszar zastosowania obejmuje odlewanie i formowanie plastyczne. To właśnie za ich pomocą wykonywane są produkty seryjne. Pozostałe metody wykorzystuje się do przygotowania produkcji, np. wytwarzania form, stempli, narzędzi lub do projektowania, modelowania i testowania nowych rozwiązań.

Wśród technik stosowanych w wytwarzaniu mikroelementów ważne miejsce zajmuje skrawanie oraz metody bezstykowe, takie jak obróbka elektrochemiczna (Electrochemical Machining - ECM) i elektroerozyjna (Electrodischarge Machining - EDM) [1, 10, 11, 60, 61, 89, 98]. Metody te charakteryzują się wysoką efektywnością techniczną – ekonomiczną przy wytwarzaniu zarówno samych układów MEMS, jak i oprzyrządowania oraz narzędzi potrzebnych do ich wykonania. Dąży się do takiego rozwoju ECM i EDM, by można było za ich pomocą wykonywać dowolne struktury przestrzenne [65, 88, 92].

Jednym z najistotniejszych problemów skrawania elementów o wymiarach charakterystycznych poniżej 1 mm, jest nieliniowy wzrost sił skrawania [101]. Powoduje to, że w przypadku elementów o rozmiarach poniżej 50 μm , bardzo trudno jest prowadzić obróbkę bez ryzyka uszkodzenia narzędzia i przedmiotu obrabianego. Opisane problemy sprawiają, że używa się narzędzi z ostrzami diamentowymi, a najczęściej obrabianymi materiałami są mosiądz, stopy aluminium, krzem i tworzywa sztuczne.

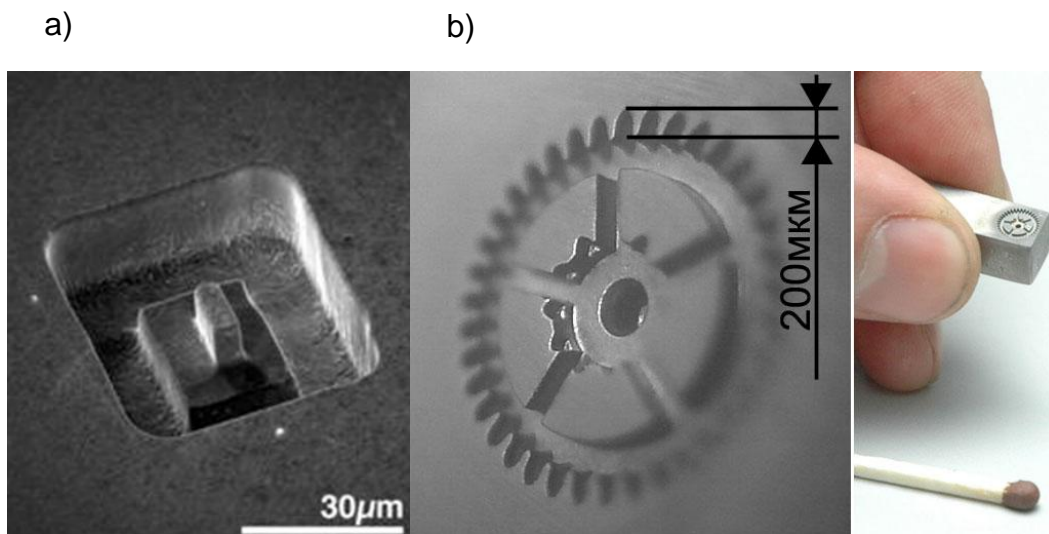
W mikroobróbce wykorzystuje się: toczenie, wiercenie, frezowanie oraz szlifowanie. Elementy wykonane tymi technikami mają wymiary charakterystyczne poniżej 100 μm , np. średnica wałków toczonych z miedzi wynosi ok. 40 μm . Dużym problemem przy tego typu produkcji jest zapewnienie powtarzalności i niezawodności procesu.

W przypadku obróbki elektroerozyjnej czy laserowej naddatek jest usuwany w wyniku topienia i odparowania materiału, co powoduje powstawanie warstwy o zmienionej strukturze i właściwościach, a także składzie chemicznym, często z mikropęknięciami. Z kolei w obróbce skrawaniem dużym ograniczeniem są małe wymiary narzędzia i nieliniowy wzrost sił skrawania wraz ze zmniejszeniem rozmiarów przedmiotu obrabianego. W trakcie obróbki zarówno narzędzie, jak i materiał obrabiany jest narażony na uszkodzenie lub zniszczenie.

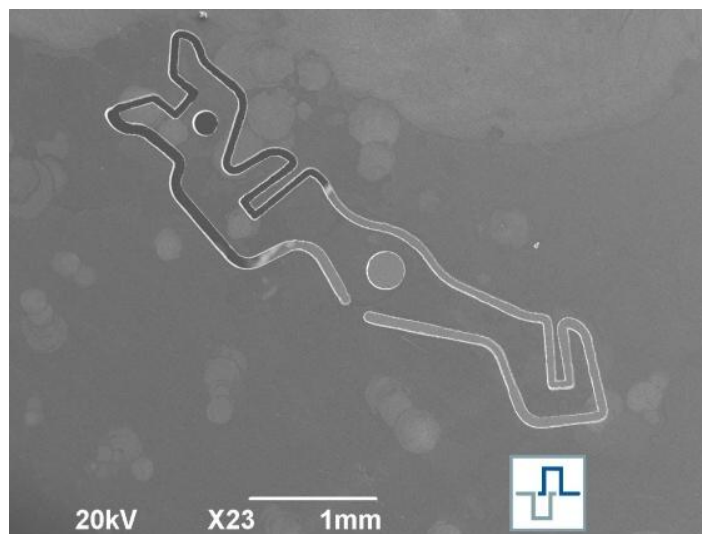
Spośród metod niekonwencjonalnych na uwagę zasługuje obróbka elektrochemiczna (ECM) [29, 30, 32, 52, 105]. Szczególnymi jej zaletami są [20, 21, 38, 73, 82, 91]:

- zanedbywalne zmiany w strukturze, mikrotwardości i składzie chemicznym,
- temperatura procesu nie przekraczająca 100 °C,
- brak zużycia elektrody roboczej – narzędzia.

W obróbce elektrochemicznej materiał usuwany jest atom po atomie w niskiej temperaturze. Struktura oraz własności chemiczne i mechaniczne obrobionego materiału nie ulegają istotnym zmianom w trakcie procesu. Obróbka nie wprowadza istotnych zmian w warstwie wierzchniej. Wydajność i dokładność nie zależy od właściwości mechanicznych materiału [4, 10, 15, 47]. Jest to bardzo istotna cecha, dzięki której można wykorzystać ECM do kształtowania materiałów trudnoskrawalnych (bardzo twardych, kruchych, ciągliwych, itp.) [73]. Wadą obróbki elektrochemicznej jest to, że można stosować ją tylko do materiałów przewodzących prąd elektryczny.



Rys. 1. Przykłady elementów wykonanych z wykorzystaniem mikroobróbki ECM;
 a) [Scientific Research Institute of Problems Theories and Technologies of
 Electrochemical Machining, Ufa, Rosja], b) [85].



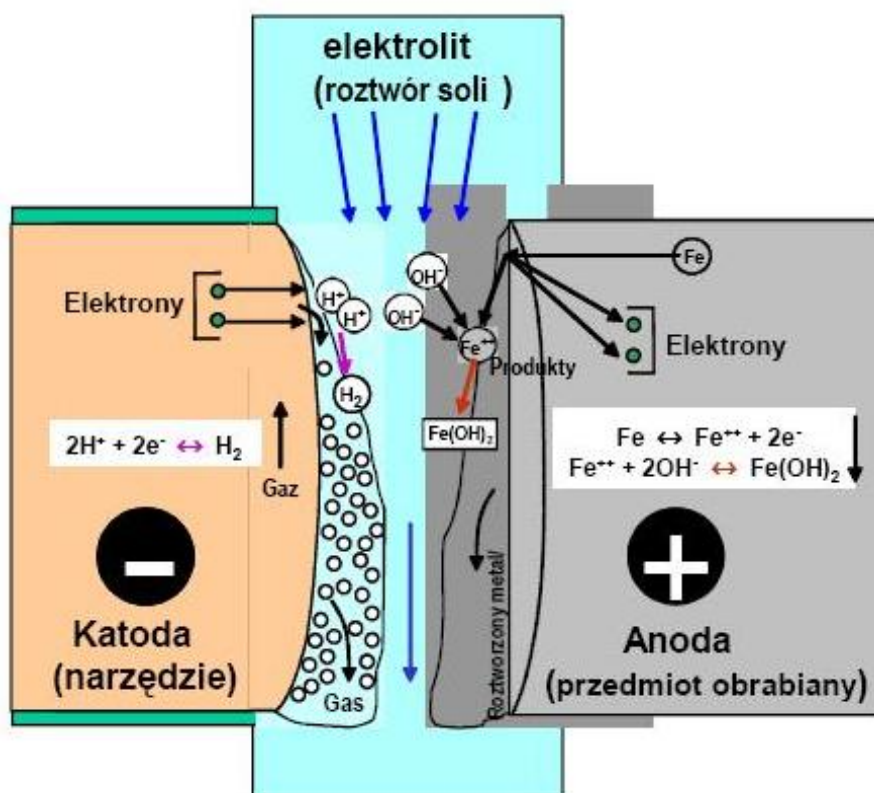
Rys. 2. Przykład zastosowania impulsowej obróbki elektrochemicznej
 (ECMTEC, Niemcy).

W warunkach obróbki elektrochemicznej mikroelementów stosuje się wariant obróbki impulsowej, w której wykorzystuje się ultrakrótkie impulsy napięciowe ($t_i < 100 \text{ ns}$), co pozwala na poprawę lokalizacji procesu [2, 33, 34, 45, 66, 85].

ECM wydaje się być dobrą alternatywą dla innych metod wytwarzania w przypadku produkcji narzędzi, matryc, form czy stempli używanych w mikrowytwarzaniu (rys. 1 i 2) [23, 55, 56, 98].

1.2 Ogólna charakterystyka procesu obróbki elektrochemicznej.

Obróbka elektrochemiczna umożliwia kształtowanie materiałów przewodzących prąd elektryczny (metale i ich stopy), bez względu na ich właściwości mechaniczne. Jest obróbką bezstykową, w której do usuwania warstw materiału wykorzystuje się proces roztrawiania elektrochemicznego, którego przebieg jest zgodny z prawami Faraday'a.



Rys. 3. Schemat procesu roztrawiania elektrochemicznego.

W procesie tym przedmiot obrabiany jest elektrodą dodatnią (anodą), zaś narzędziem jest elektrodą ujemną (katodą) (rys. 3). W szczelinie między obiema elektrodami znajduje się elektrolit, umożliwiający zachodzenie reakcji elektrochemicznych. Obróbka elektrochemiczna wykorzystuje proces roztrawiania anodowego w trakcie przepływu prądu między elektrodami zanurzonymi w

elektrolizie. Z przepływem prądu związany jest przepływ masy, który może być wykorzystany do obróbki ubytkowej (usuwanie materiału z elektrody) lub przyrostowej (osadzanie materiału na elektrodzie) [73].

Podstawowe reakcje elektrochemiczne to:

- zachodząca w warstwie przyanodowej jonizacja atomów metalu (anody):



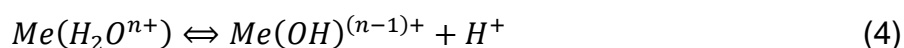
- zachodząca na powierzchni katody wydzielania się wodoru:



- elektroliza wody:



Ponadto zachodzą reakcje związane z dyfuzją jonów metalu w głąb szczeliny międzyelektrodowej, w wyniku których dochodzi do powstania nierozpuszczalnych w wodzie wodorotlenków:



Na powierzchni obrabianego materiału możliwa jest również reakcja wydzielania się tlenu:



Proces roztwarzania elektrochemicznego opisuje zależność:

$$dm = \frac{AI}{zF} dt \quad (6)$$

gdzie:

m – masa roztworzonego materiału (lub osadzonego),

A – masa atomowa,
 z – wartościowość jonów,
 I – natężenie prądu,
 t – czas,
 F – stała Faraday'a.

Wydajność objętościowa usuwania nadmiaru w obróbce elektrochemicznej określona jest zależnością:

$$V_w = \eta k_v I \quad (7)$$

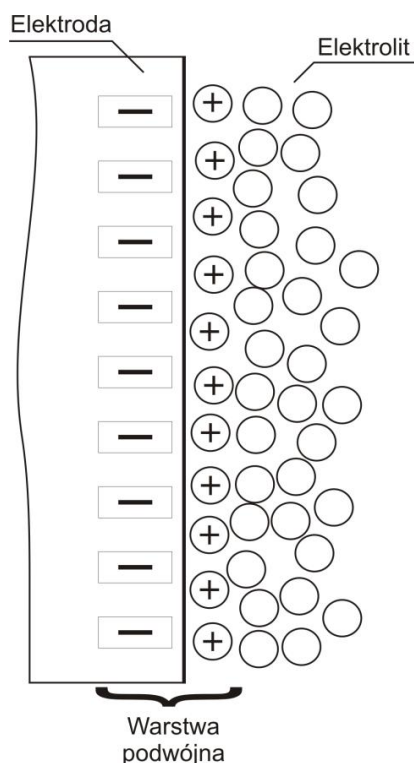
gdzie czynnik

$$k_v = \frac{A}{z\rho F} \quad (8)$$

jest nazywany objętościowym równoważnikiem chemicznym, a η jest wydajnością prądową procesu roztwarzania. Praktycznie oddzielne wyznaczenie η i k_v jest niemożliwe. Z tego powodu w technologiach elektrochemicznych używa się iloczynu tych dwóch wielkości, zwanego współczynnikiem obrabialności elektrochemicznej, który równy jest objętości roztworzonego materiału przy przepływie jednostkowego ładunku elektrycznego.

$$k_{v_{tech}} = \eta k_v \quad (9)$$

Reakcje zachodzące na powierzchni elektrod powodują przemieszczanie się nośników ładunku w elektrodach i w elektrolicie. Prowadzi to do powstania różnicy potencjałów elektrodowych. Gromadzenie się ładunków na powierzchni elektrod powoduje takie same gromadzenie się ładunków o przeciwnym znaku w warstwie elektrolitu przylegającej do elektrod. Obszar, w którym został zgromadzony ładunek, nazywany jest warstwą podwójną (Helmholtza). Zazwyczaj grubość tej warstwy nie przekracza 0,1 – 1 nm (grubość Debay'a) [36]. Jej schemat został przedstawiony na rys. 4.



Rys.4. Schemat warstwy podwójnej [36].

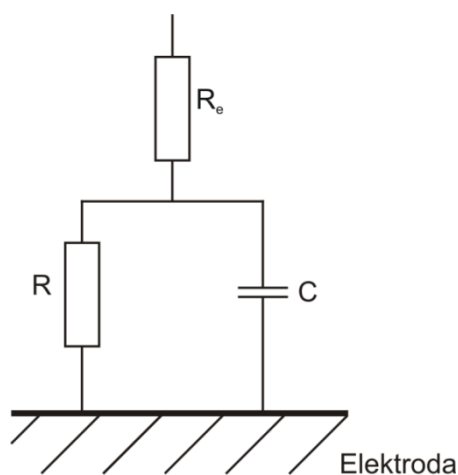
W wyniku przepływu prądu elektrycznego przez szczelinę międzyelektrodową dochodzi do wydzielania się ciepła w elektrolicie. Dodatkowo w obszarze szczeliny generowane są pęcherzyki gazu. Zarówno ciepło, jak i gaz oraz produkty stałe procesu roztwarzania elektrochemicznego, usuwane są z obszaru szczeliny przez przepływający elektrolit. Zmienne warunki panujące w obszarze szczeliny międzyelektrodowej związane z nierównomiernym rozkładem temperatury, fazy gazowej czy produktów reakcji powodują, że takie parametry, jak przewodność właściwa elektrolitu, spadek potencjału w warstwach przyelektrodowych czy współczynnik obrabialności elektrochemicznej, przyjmują zmienne wartości (ich rozkład jest nierównomierny) [68, 94, 95].

Ponieważ gęstość prądu, a tym samym wydajność procesu roztwarzania elektrochemicznego rośnie ze zmniejszaniem się szczeliny międzyelektrodowej S , dąży się do tego, żeby w trakcie procesu była ona jak najmniejsza. Ponadto grubość szczeliny wpływa na dokładność obróbki. Jednakże przy małych grubościach szczelin dochodzi do szybkiego wzrostu temperatury oraz koncentracji fazy gazowej i pogorszenia warunków wymiany elektrolitu, co w rezultacie może prowadzić do przerwania obróbki [39, 44].

Jednym ze sposobów rozwiązania wyżej wymienionych problemów jest zastosowanie obróbki impulsowej, która polega na cyklicznym włączaniu i wyłączeniu impulsów napięcia roboczego [12, 13]. W trakcie przerwy pomiędzy nimi usuwane jest ciepło i produkty reakcji elektrochemicznej ze szczeliny międzyelektrodowej. Z reguły czas przerwy między impulsami jest kilkukrotnie dłuższy od czasu impulsu roboczego. Przy stosowaniu coraz krótszych impulsów roboczych uzyskuje się coraz większą dokładność obróbki [9, 14, 26, 31, 104].

W impulsowej obróbce elektrochemicznej ultrakrótkimi impulsami decydujące znaczenie dla przebiegu i lokalizacji procesu roztwarzania mają zjawiska zachodzące w obszarze przyelektrodowych warstw podwójnych. W trakcie impulsu napięciowego następuje ładowanie warstw podwójnych, czyli zmiana rozkładu ładunków wewnątrz elektrolitu i wewnątrz elektrod oraz transport jonów (masy) przez granicę anoda – elektrolit i elektronów przez granicę katoda – elektrolit.

Analizując zjawiska zachodzące w układzie elektroda – elektrolit stosuje się elektryczny schemat zastępczy pokazany na rys. 5, który reprezentuje fizyczny model tego układu.



Rys. 5. Elektryczny schemat zastępczy układu elektroda – elektrolit [24, 25].

W przedstawionym układzie zastępczym rezystancja R reprezentuje przejście ładunku elektrycznego przez granicę elektroda – elektrolit. Pojemność C reprezentuje warstwę podwójną. R_e charakteryzuje rezystancję elektrolitu.

Impuls napięcia powoduje zajście reakcji elektrochemicznej (przepływ prądu Faraday'a i_f), oraz przepływ prądu przesunięcia i_c , który związany jest z istnieniem warstwy podwójnej.

Rezystancja szczeliny międzyelektrodowej składa się z rezystancji elektrolitu oraz rezystancji R określanej mianem rezystancji Faraday'a lub oporem polaryzacji elektrochemicznej [24]. Nie podlega ona prawu Ohma, a jej wartość jest zmienna w czasie i wynosi $R = \frac{d\varphi}{di}$.

Prąd i_f określa wymianę masy i jest proporcjonalny do szybkości reakcji elektrodowych. Opisuje go równanie Butlera – Volmera:

$$i_f = i_0 \left[\exp\left(\frac{(1-\alpha)nF\varphi}{R\theta}\right) - \exp\left(\frac{-\alpha nF\varphi}{R\theta}\right) \right] \quad (10)$$

gdzie:

α – współczynnik przejścia,

n – liczba ładunków,

F – stała Faradaya,

φ – potencjał elektryczny,

R – stała gazowa,

θ – temperatura,

i_0 – prąd wymiany.

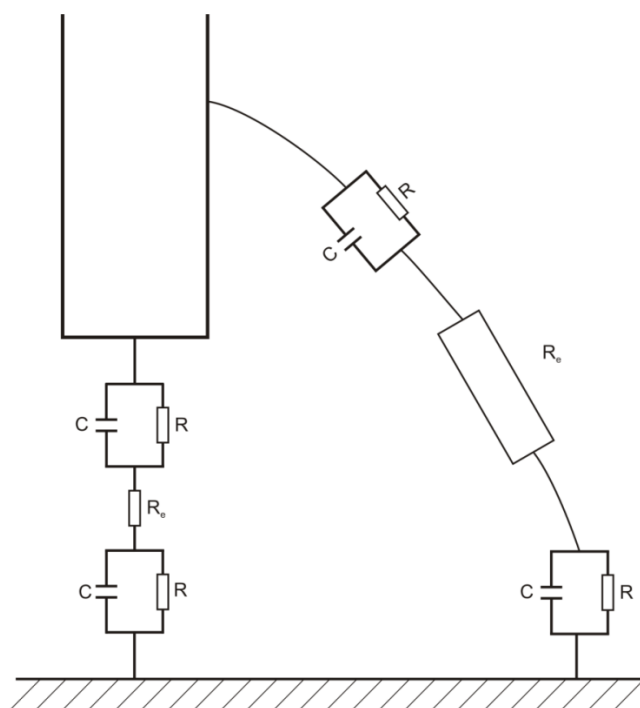
Powyższa zależność pokazuje, że szybkość reakcji elektrochemicznych zachodzących na powierzchni jest zależna od potencjału powstającego w warstwie podwójnej w sposób wykładniczy.

W trakcie procesu, w momencie pojawienia się impulsu napięciowego, zaczyna się ładowanie warstwy podwójnej (warstwa podwójna jest reprezentowana jako pojemność). Ładowanie to trwa z pewną stałą czasową τ , która jest zależna zarówno od rezystancji R (Faraday'a), rezystancji R_e (elektrolitu), jak i od pojemności warstwy podwójnej. Powoduje to, że im mniejsza rezystancja R_e , tym krótszy czas ładowania warstwy podwójnej. Aby proces mógł przebiegać prawidłowo, należy tak dobrać stałą czasową τ , aby była ona tego samego rzędu, co czas impulsu. Jeśli stała będzie zbyt duża, warstwa podwójna nie zdąży się naładować, a co za tym idzie, nie nastąpi przepływ ładunku i nie zajdzie proces roztwarzania. Powoduje to, że stała czasowa, z jaką ładuje się warstwa podwójna, jest proporcjonalna do grubości szczeliny międzyelektrodowej, gdyż jej zmniejszanie lub zwiększanie

pociąga za sobą zmianę rezystancji R_e . Można zatem powiedzieć, że szybkość roztwarzania w strefie warstwy podwójnej, w trakcie impulsowej mikroobróbki ECM, jest zależne od grubości szczeliny międzyelektrodowej, czyli [85]

$$\tau \sim f(S)$$

Powoduje to, że proces roztwarzania zachodzi w obrębie czoła elektrody, gdyż w obszarach bardziej odległych od elektrody roboczej rezystancja elektrolitu gwałtownie rośnie, a co za tym idzie rośnie stała czasowa ładowania warstwy podwójnej. Dlatego też, w obszarach leżących z dala od czoła elektrody, roztwarzanie jest bardzo słabe, albo nie zachodzi wcale. Dzięki temu poprawia się znacznie lokalizacja całego procesu, który zachodzi praktycznie całkowicie w obszarze czoła elektrody roboczej. Opisane zjawiska sprawiają, że impulsowa mikroobróbka ECM daje możliwość uzyskania wysokiego stopnia lokalizacji procesu, co pozwala na jej stosowanie w mikrowytwarzaniu.



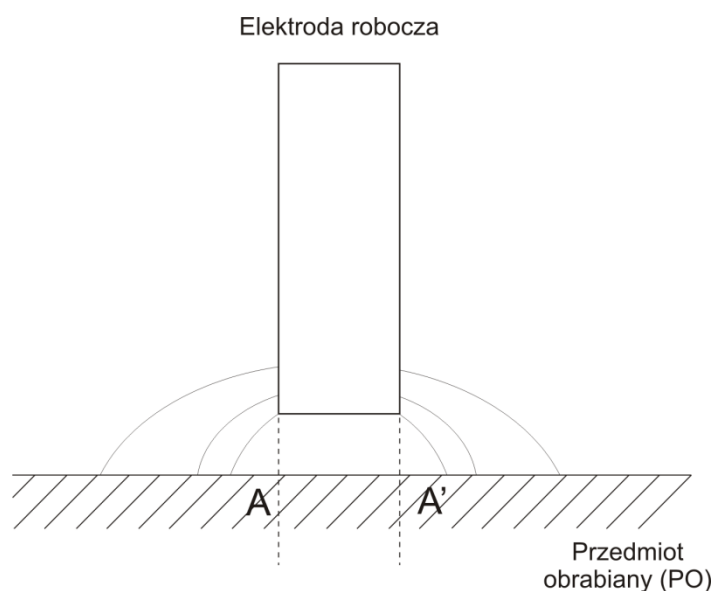
Rys. 6. Schemat szczeliny międzyelektrodowej.

Na rys. 6 przedstawiono schemat szczeliny międzyelektrodowej, z zaznaczonymi obszarami o małej i dużej rezystancji elektrolitu.

Jak wspomniano, w trakcie procesu mikroobróbki elektrochemicznej nie ma bezpośredniego kontaktu między przedmiotem obrabianym a elektrodą roboczą. Jest to szczególnie istotne w przypadku wykonywania bardzo małych elementów (w skali mikro), gdzie sam fakt zetknięcia się narzędzia i materiału może doprowadzić do ich odkształcenia, a w niektórych przypadkach do uszkodzenia. Dodatkowo niska temperatura, w której zachodzi proces powoduje, że w materiale nie obserwuje się żadnego wpływu ciepła, a warstwa wierzchnia nie ulega zmianom termicznym. W porównaniu z takimi metodami jak obróbka elektroerozyjna czy laserowa jest to bardzo dużą zaletą, gdyż w przypadku tamtych metod występowanie zmienionej termicznie warstwy obniża jakość wyrobu.

Mikroobróbka elektrochemiczna pozwala na kształtowanie powierzchni wewnętrznych lub zewnętrznych. Mogą one odtwarzać prosty kształt elektrody roboczej, ale mogą też być skomplikowanymi powierzchniami krzywoliniowymi [32, 69, 72, 81, 86, 96]. Kształtowanie realizowane jest najczęściej za pomocą następujących typów operacji:

- drążenie elektrochemiczne,
- obróbka elektrochemiczna uniwersalną elektrodą w kinematyce frezowania.

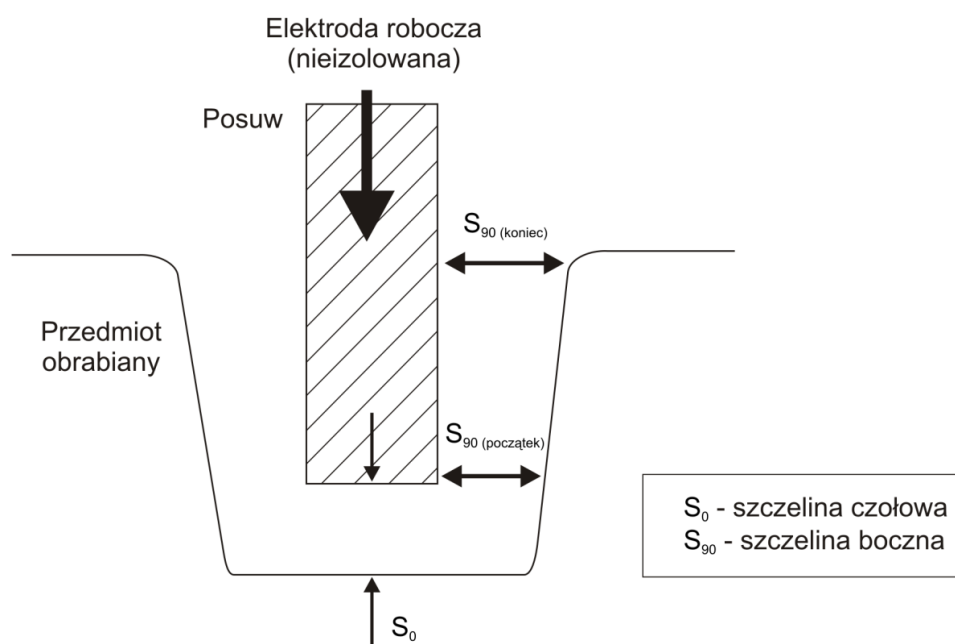


Rys. 7. Schemat rozkładu linii pola elektrycznego w obszarze szczeliny międzyelektrodowej.

W trakcie obróbki elektrochemicznej dąży się do tego, aby proces roztwarzania zachodził tylko w obszarze między przedmiotem obrabianym, a

elektrodą roboczą oraz by grubość szczeliny międzyelektrodowej była cały czas stała. Ponieważ jednak roztwarzanie zachodzi poza obszarem strefy obróbki AA' (rys. 7), powstają błędy kształtu PO, takie jak rozbiecie otworu czy stożkowatość. Jest to związane bezpośrednio ze specyfiką procesu, a dokładnie z rozkładem pola elektrycznego pomiędzy elektrodą roboczą, a przedmiotem obrabianym. Miarą odstępstw od tak postawionych warunków jest stopień lokalizacji, który określa jak bardzo różni się kształt zadany od kształtu otrzymanego.

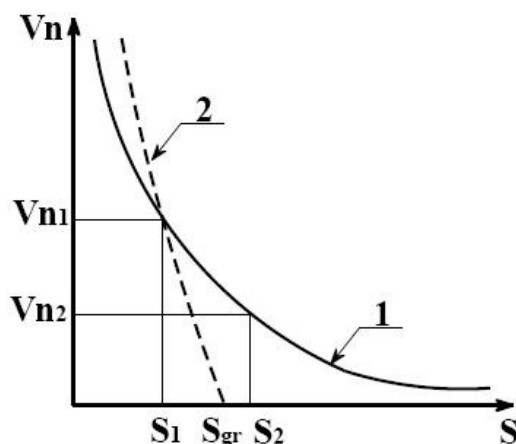
W przypadku obróbki elektrochemicznej lokalizacja procesu stanowi duży problem [40, 42]. Szczególnie trudno jest zapewnić warunek, by roztwarzanie zachodziło jedynie w obszarze czoła elektrody roboczej, co powoduje niedokładności wymiarowe wykonanych detali. Dodatkowo, w przypadku materiałów charakteryzujących się heterogenicznością elektrochemiczną, może dojść do nierównomiernego roztwarzania faz strukturalnych materiału.



Rys. 8. schemat przedstawiający zaburzenia w odwzorowaniu kształtu elektrody w materiale.

Może to doprowadzić do wystąpienia lokalnych błędów kształtu, niejednorodności powierzchni, trudności w uzyskaniu ostrych krawędzi (rys. 8). Wyeliminowanie tych problemów jest kluczowe dla całego procesu, dlatego w obu odmianach obróbki ECM najważniejszą kwestią jest zapewnienie jak najwyższego stopnia lokalizacji procesu roztwarzania elektrochemicznego, co w rezultacie może pozwolić na

prawidłowe odtworzenie kształtu w obrabianym materiale. Jest to szczególnie istotne w trakcie wytwarzania mikronarzędzi lub części mikrouządzeń [8].

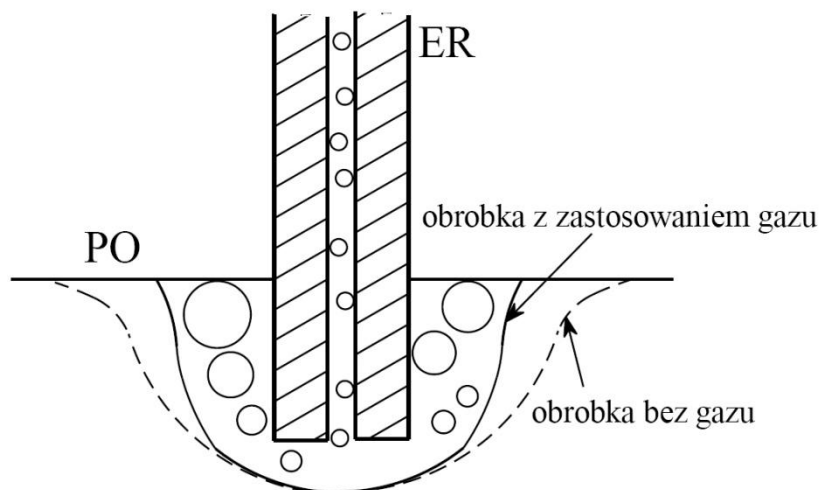


Rys. 9. Wykres zależności prędkości rozpuszczania $V_n(S)$ [24].

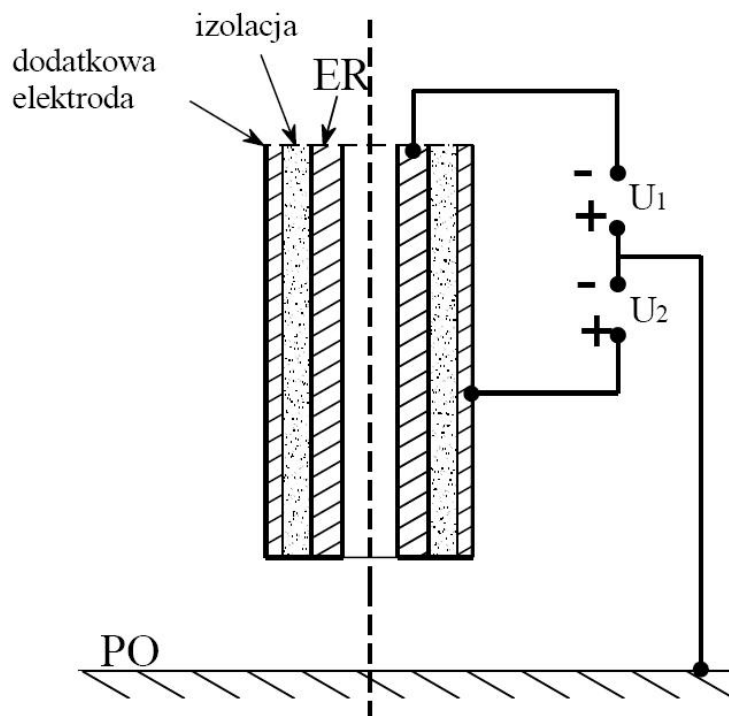
W procesie obróbki elektrochemicznej stopień lokalizacji jest związany z kształtem zależności $V_n=f(S)$. Na rys. 9 krzywa 1 reprezentuje zależność $V_n = \frac{const}{S^n}$, a krzywa 2 - przypadek wysokiej lokalizacji, gdzie istnieje pewna wartość graniczna grubości szczeliny międzyelektrodowej S_{gr} , powyżej której proces rozpuszczania nie zachodzi.

Najczęściej stosowanymi rozwiązaniami, mającymi na celu zwiększenie dokładności mikroobróbki elektrochemicznej są [3, 16, 43, 47, 48, 64, 79, 80, 83, 90]:

- zmniejszenie grubości szczeliny międzyelektrodowej,
- dobór odpowiedniego elektrolitu (stosuje się elektrolity o małej koncentracji oraz elektrolity, których współczynnik obrabialności elektrochemicznej k_v rośnie ze wzrostem gęstości prądu i – tzw. elektrolity pasywne (rys. 13)),
- stosowanie małych napięć międzyelektrodowych, rzędu kilku woltów,
- prowadzenie obróbki w ośrodkach wielofazowych (np. dwufazowych gaz - ciecz) (rys. 10),
- stosowanie elektrod z izolacją (obróbka jest wykonywana tylko odizolowaną częścią elektrody, np. czołem),
- stosowanie układów wieloelektrodowych z różnymi potencjałami (rys. 11),
- stosowanie układów stabilizujących napięcie na elektrodach,
- stosowanie specjalnej geometrii elektrod.



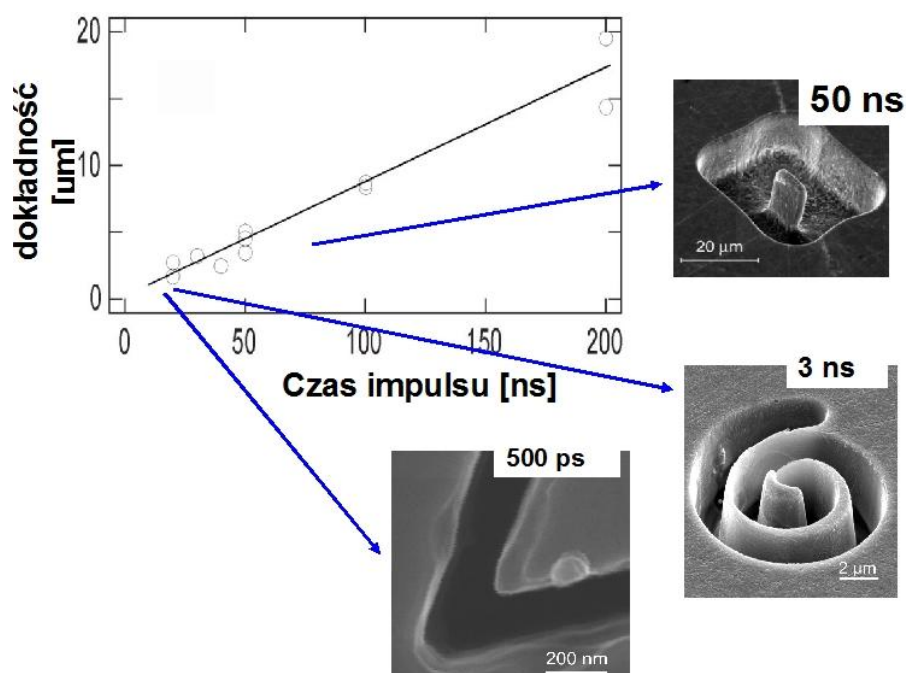
Rys. 10. Obróbka w ośrodku dwufazowym [24, 25].



Rys. 11. Układ z dodatkową elektrodą podłączoną do przeciwnego potencjału [15, 24].

Jednak największy postęp w tym zakresie osiągnięto stosując obróbkę z bardzo krótkimi czasami impulsu od 2 do 60 ns przy okresie 1 – 2 μ s (rys. 12). Stosunkowo duży czas przerwy umożliwia przepłukanie szczeliny oraz usunięcie ciepła i produktów roztwarzania. Dzięki zastosowaniu nanosekundowych impulsów napięcia, istotnie poprawiła się lokalizacja procesu i nastąpił dynamiczny wzrost

możliwych zastosowań procesu μ - ECM oraz rozwój rozwiązań konstrukcyjnych obrabiarek do mikroobróbki elektrochemicznej [74, 75].

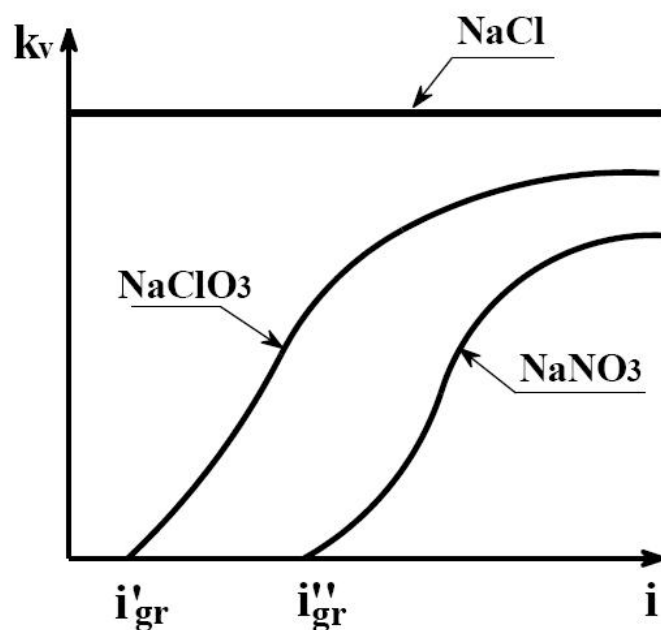


Rys. 12. Zależność rozdzielczości procesu mikroobróbki ECM od czasu impulsu napięciowego [75].

W przypadku stosowania impulsowej mikroobróbki bardzo ważną kwestią jest zapewnienie stabilności kształtu impulsu napięciowego oraz jego stałej wartości. Zarówno długości impulsów, jak i przerwy między nimi muszą być powtarzalne, co zapewnia stałe warunki w trakcie procesu obróbki. Aby zagwarantować stabilny poziom napięcia, stosuje się często specjalne układy stabilizacyjne wyposażone w dodatkowe elektrody referencyjne. Pozwala to na wyeliminowanie zaburzeń związanych z niestabilnym zasilaniem.

Następną ważną kwestią jest unipolarność impulsów. Ma ona decydujący wpływ na żywotność elektrody roboczej, gdyż przy braku zapewnienia unipolarności impulsów może dojść do roztwarzania elektrochemicznego elektrody roboczej. Bardzo często w mikroobróbce elektrochemicznej stosuje się kilka z wyżej wymienionych technik w celu poprawienia lokalizacji procesu.

W obróbce elektrochemicznej istotny jest dobór odpowiedniego elektrolitu. Jak wspomniano, stosuje się elektrolity pasywne, o małej koncentracji.



Rys. 13. Zależność współczynnika obrabialności od gęstości prądu dla różnego rodzaju elektrolitów [75].

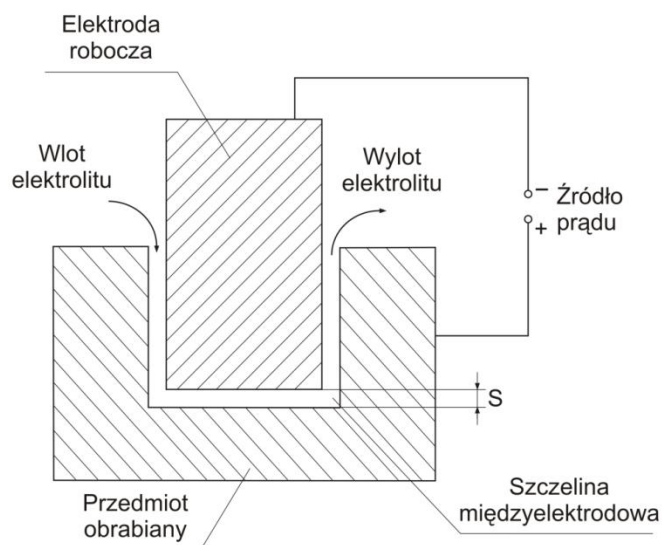
Ponieważ środowisko elektrolitów jest bardzo agresywne, dlatego zawsze należy zwracać uwagę na to, jak są używane, przechowywane i utylizowane. Dodatkową kwestią jest ich negatywny wpływ na elementy obrabiarki (przy złym układzie obiegu elektrolitu może dojść do szybkiej korozji części obrabiarki i ich nadmiernego zużywania się).

Najczęściej używa się elektrolitów na bazie kwasów i soli. Są to z reguły bardzo słabe roztwory (np. 15% roztwór NaNO_3). W przypadku roztworów słabych kwasów należy zdawać sobie sprawę, że powodują one dodatkowe zużywanie się elektrody roboczej.

1.3 Drażnienie elektrochemiczne

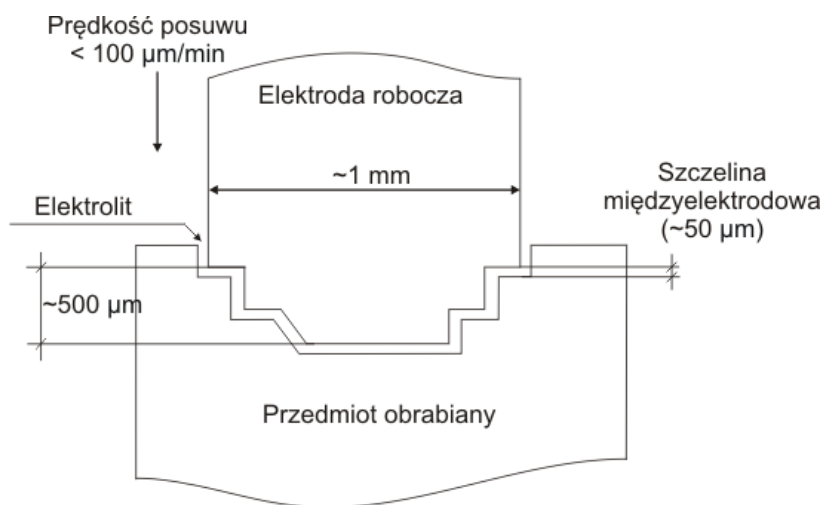
W trakcie drażenia elektrochemicznego elektroda robocza przesuwa się w kierunku przedmiotu obrabianego. Należy pamiętać, że wymiary powierzchni obrabianej zależą od wymiarów elektrody oraz od grubości szczeliny międzyelektrodowej. Im mniejsza grubość szczeliny międzyelektrodowej, tym mniejsze elementy mogą być obrabiane.

Drażenie elektrochemiczne można wykonywać elektrodą uniwersalną, lub elektrodą kształtową. Na rys. 14 przedstawiony jest schemat obróbki elektrodą uniwersalną. Taki sposób obróbki jest stosowany w przypadku wykonywania prostych otworów, z reguły o bardzo małych średnicach.

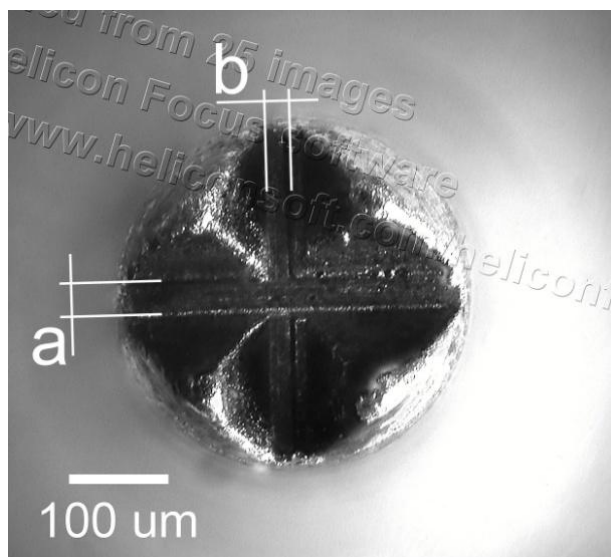


Rys. 14. Schemat drążenia elektrochemicznego.

W przypadku, gdy istnieje potrzeba uzyskania otworu lub zagłębienia o bardziej skomplikowanym kształcie, wykorzystuje się elektrody kształtowe, których czoło jest uformowane w odpowiedni sposób. W trakcie projektowania procesu drążenia należy odpowiednio korygować kształt elektrody ze względu na grubość szczeliny międzyelektrodowej. Poniżej przedstawiono schemat drążenia elektrodą kształtową (rys. 15) oraz elektrodą kształtową (rys 16).

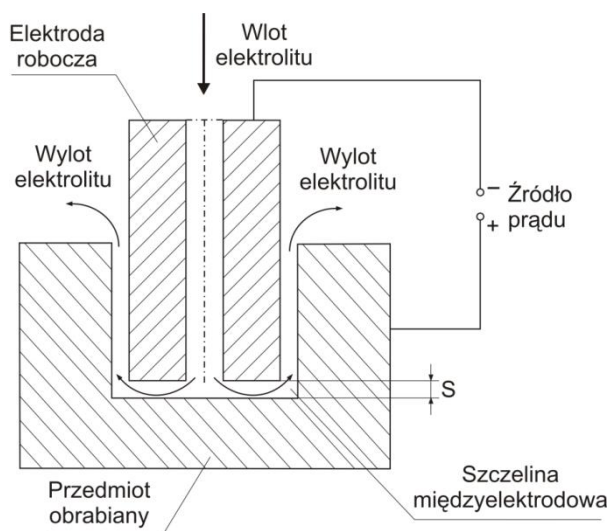


Rys. 15. Drążenie elektrodą kształtową.



Rys. 16. Elektroda kształtowa.

Drażenie elektrochemiczne wykorzystuje się do wykonywania otworów przelotowych i zagłębień [27]. W tego typu obróbce problemem jest dostarczenie elektrolitu do strefy obróbki. W celu poprawienia efektywności przepłukiwania szczeliny międzyelektrodowej można stosować elektrody z wydrążonym w środku kanałem, którym podaje się elektrolit (rys. 17) [86].



Rys.17. Schemat drażenia z otworem w elektrodzie.

Przy małych średnicach elektrod roboczych ciśnienie elektrolitu musi być duże, co wymaga zbudowania skomplikowanego systemu dostarczania elektrolitu.

Przy bardzo małych elektrodach problemem staje się wykonanie odpowiednio małego otworu. Z reguły nie wykonuje się tego typu otworów w elektrodach o średnicy poniżej 0,2 mm. Stosowanie kanału dostarczającego elektrolit w przypadku elektrod kształtowych bardzo często jest niemożliwy ze względu na konieczność zachowania ciągłości kształtu czoła elektrody. Dlatego w takim przypadku należy go dostarczać w strefę obróbki przez szczelinę boczną. Jest to możliwe jedynie dla płytkich wgłębień, w przypadku głębokich - jedynym rozwiązaniem jest ruch drgający jednej z elektrod.

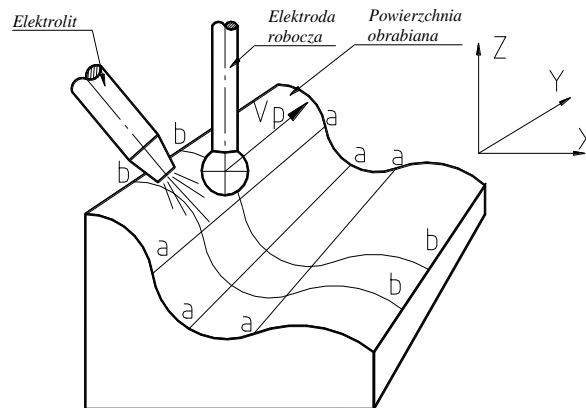
Następną ważną kwestią w trakcie drążenia jest usuwanie produktów roztwarzania. Ze względu na małe gabaryty elektrody, małą szczelinę, sposób dostarczania elektrolitu, który dodatkowo przepłukuje szczelinę, produkty roztwarzania bardzo szybko mogą zapchać szczelinę, doprowadzając do przerwania procesu, a nawet do uszkodzenia elektrody roboczej w wyniku zwarć. Aby temu zapobiec można stosować następujące techniki:

- okresowe przerwanie procesu, podniesienie elektrody i przepłukanie lub przedmuchiwanie sprężonym powietrzem szczeliny,
- podawanie elektrolitu pod dużym ciśnieniem,
- wprowadzenie obrotu elektrody roboczej.

Najbardziej obiecujący wydaje się pierwszy sposób, gdyż jest w miarę bezpieczny dla elektrody i materiału obrabianego i pozwala na kontrolowanie całego procesu. Drugi - podlega ograniczeniom związanym z wielkością podawanego ciśnienia. Gdy jest ono zbyt duże, może doprowadzić do wygięcia elektrody, co może spowodować zaburzenia w drążonym kształcie, a nawet do uszkodzenia elektrody. Dodatkowo nie daje pewności, że szczelina zostanie oczyszczona. Trzeciego sposobu nie można zastosować do elektrod kształtowych, Również nie daje pewności, że szczelina zostanie oczyszczona

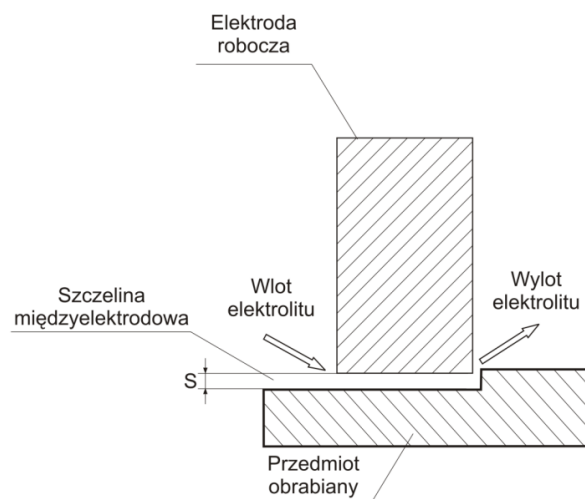
1.4 Obróbka elektrochemiczna elektrodą uniwersalną w kinematyce frezowania.

W trakcie frezowania elektrochemicznego elektroda robocza porusza się równoległe (w danym punkcie) do powierzchni obrabianej. Ostateczny kształt przedmiotu jest odwzorowaniem trajektorii elektrody w przestrzeni 3D (rys. 18) [49, 70].



Rys. 18. Przykład trajektorii elektrody w przestrzeni 3D [73].

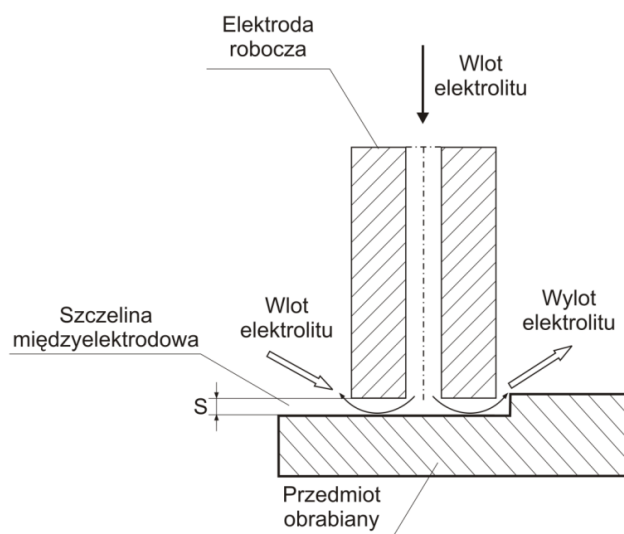
Na rys.19. przedstawiony jest schemat procesu frezowania elektrochemicznego.



Rys. 19. Obróbka elektrodą uniwersalną.

W trakcie tego typu obróbki zarówno warunki panujące w szczelinie międzyelektrodowej, jak i sama kinematyka procesu jest odmienna niż w przypadku drążenia. Ze względu na to, że nawet w przypadku frezowania głębokich profili, wymiar elektrody jest mały w stosunku do wielkości zagłębienia, nie występują tu problemy związane z dostarczaniem elektrolitu do szczeliny. W tym przypadku

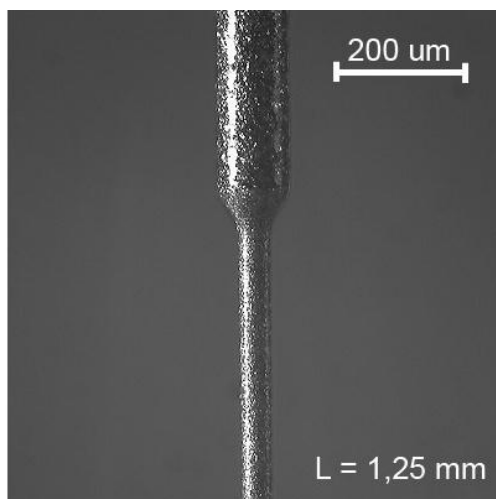
również można stosować elektrody z kanałem dostarczającym elektrolit, co znacznie poprawia proces przepłukiwania szczeliny międzyelektrodowej (rys. 20).



Rys. 20. Frezowanie elektrodą z kanałem doprowadzającym elektrolit.

W mikroobróbce frezowaniem elektrochemicznym istotną kwestią staje się prędkość strugi elektrolitu. Przy małej średnicy elektrody roboczej, a co za tym idzie małej jej sztywności, przy zbyt dużej prędkości strugi może dojść do odkształcenia się elektrody, a co za tym idzie do zaburzenia frezowanego kształtu. Dlatego w tej obróbce stosuje się bardzo małe prędkości przepływu elektrolitu. Może to powodować zmniejszenie efektywności przepłukiwania szczeliny i prowadzić do obniżenia wydajności obróbki, a nawet do jej przerwania. Aby temu zapobiec można wprowadzić ruch obrotowy albo drgający elektrody roboczej. Stosuje się również okresowe podnoszenie elektrody w celu oczyszczenia szczeliny.

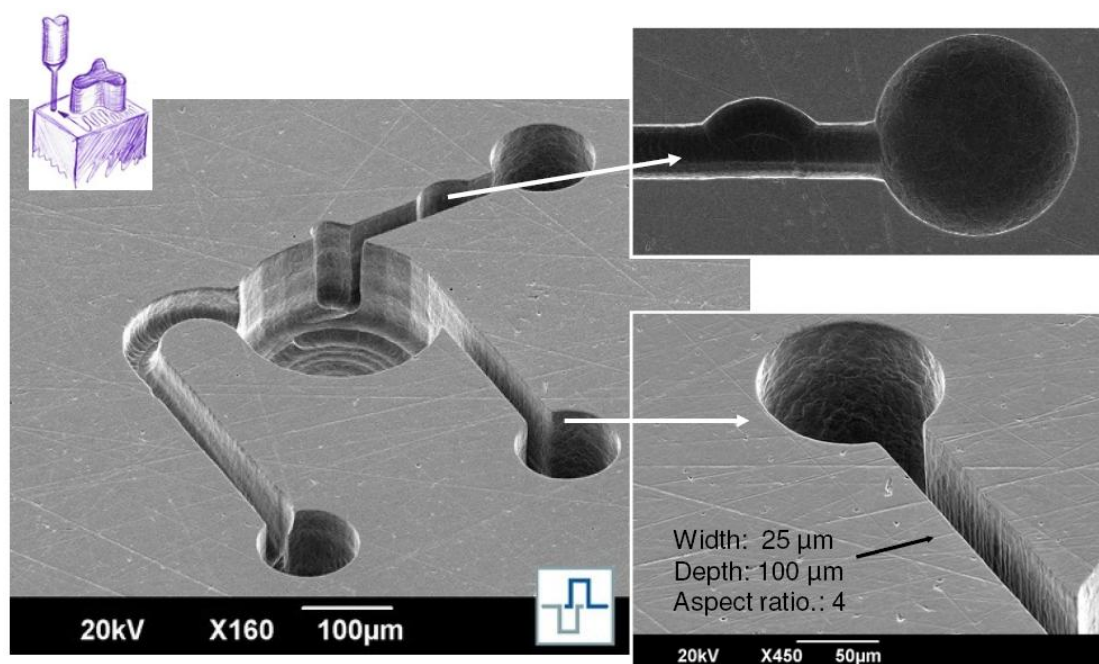
Podobnie jak w przypadku drążenia, wymiary przedmiotu obrabianego zależą od wymiarów elektrody roboczej i grubości szczeliny międzyelektrodowej. Szczególnie grubość szczeliny jest ważna, gdyż jej nieuwzględnienie powoduje, że wykonany kształt jest większy o wymiar szczeliny.



Rys. 21. Elektroda uniwersalna.

W trakcie pracy elektrodą uniwersalną (rys. 21) obróbka może być wykonywana zarówno czołem, jaki i powierzchnią boczną, zwłaszcza powierzchni pionowych.

Obróbka elektrochemiczna w kinematyce frezowania może być wykorzystana w trakcie wytwarzania elektrod kształtowych, które są używane do drążenia elektrochemicznego. W ten sposób można wytwarzać matryce, wykrojniki, stemple itp.(rys. 22). Często ten rodzaj obróbki wykorzystuje się do usuwania zadziorów w obróbce wykończeniowej.



Rys. 22. Przykład kształtów wykonanych elektrodą uniwersalną (ECMTEC, Niemcy).

1.5 Wnioski z analizy literatury i wstępnych badań własnych.

W analizie stanu zagadnienia uwzględniono ponad 100 pozycji krajowych i zagranicznych (w tym własnych [57, 58, 59]).

Przeprowadzony przegląd literatury pozwolił na sformułowanie następujących wniosków:

- badania procesu mikroobróbki elektrochemicznej nadal znajdują się w fazie wstępnej,
- większość prac dotyczy przede wszystkim badań doświadczalnych,
- najczęściej w procesie mikroobróbki elektrochemicznej do obróbki trójwymiarowych powierzchni wykorzystuje się elektrodę uniwersalną,
- tylko nieliczne prace dotyczą modelowania matematycznego procesu mikroobróbki, które pozwoliłyby na powiązanie parametrów technologicznych z zależnościami opisującymi zjawiska fizyczne zachodzące w obszarze obróbki (dominują tu prace zespołu prof. J. Kozaka),
- istnieje niewiele prac przedstawiających ilościowy wpływ parametrów procesu na jego lokalizację,
- prowadzone badania dotyczą obróbki z wykorzystaniem impulsów napięciowych rzędu dziesiątek nanosekund, ale prowadzone są sporadyczne badania z zastosowaniem impulsów pikosekundowych.

Analiza stanu badań wykazała, że stopień poznania procesu obróbki elektrochemicznej mikroelementów jest niewystarczający i należy badania te kontynuować, co uzasadnia celowość realizacji niniejszej pracy.

1.6 Cel i zakres pracy.

Celem pracy jest dalsze poznanie procesu mikroobróbki elektrochemicznej i stworzenie podstaw teoretycznych i doświadczalnych do projektowania procesów technologicznych i ich zastosowania w przemyśle. Zakres prac obejmował:

- analizę zjawisk w strefie obróbki oraz ich uproszczony opis matematyczny (głównie na podstawie danych z literatury),
- opracowanie matematycznego modelu dedukcyjnego oraz oprogramowania do symulacji komputerowej procesu obróbki,

- opracowanie koncepcji stanowiska do badań,
- dobór, opracowanie i uruchomienie podstawowych zespołów stanowiska (układ napędowy, układ sterowania, oprogramowanie sterujące, układ obiegu elektrolitu),
- przeprowadzenie badań i opracowanie matematycznego modelu statystycznego procesu,
- opracowanie wytycznych do projektowania procesów technologicznych.

Cel ten został zrealizowany przez:

- opracowanie uproszczonego modelu matematycznego na podstawie danych literaturowych procesu mikroobróbki, a następnie zbudowanie na jego podstawie modelu numerycznego pozwalającego na przeprowadzenie symulacji komputerowej procesu,
- zaprojektowanie, wykonanie i uruchomienie stanowiska do badań,
- przeprowadzenie badań doświadczalnych oraz opracowanie na ich podstawie matematycznego modelu statystycznego,
- weryfikacja dedukcyjnego modelu matematycznego na podstawie przeprowadzonych badań,
- opracowanie wytycznych do projektowania procesów technologicznych obróbki elektrochemicznej mikroelementów,
- opracowanie wytycznych do projektowania urządzeń do obróbki elektrochemicznej mikroelementów.

Wyżej wymienione prace zostały samodzielnie wykonane przez autora niniejszej rozprawy.

W modelowaniu matematycznym oparto się na pracach prof. J. Kozaka i jego zespołu.

Tak zrealizowana praca pozwoliła na dalsze poznanie procesu mikroobróbki ECM, a opracowany model matematyczny oraz bazujące na nim oprogramowanie umożliwi precyzyjniejsze i szybsze projektowanie procesów technologicznych związanych z omawianym zagadnieniem.

2 MODELOWANIE MATEMATYCZNE – MATEMATYCZNY MODEL DEDUKCYJNY

2.1 Cele i założenia matematycznego modelowania procesu elektrochemicznego kształtowania mikroelementów.

Podstawowym celem matematycznego modelowania procesu elektrochemicznego kształtowania mikroelementów jest wyznaczenie związków funkcyjnych między otrzymanym w trakcie obróbki kształtem przedmiotu obrabianego (PO), a parametrami charakteryzującymi przebieg procesu. Prowadzi to do podzielenia problemu na dwa podstawowe zadania:

- wyznaczenie charakterystycznych wielkości geometrycznych PO, takich jak rozkład grubości usuwanego naddatku, rozkład objętości usuniętego naddatku,
- zidentyfikowania procesów fizycznych zachodzących w obszarze szczeliny międzyelektrodowej w trakcie procesu, znalezienia ich charakterystyk oraz odnalezienia związków między nimi i zmianą kształtu PO (temperatury elektrolitu T , koncentracji wodoru β , konduktywności elektrolitu κ , ciśnienia p i prędkości w elektrolitu, oraz rozkładu pola elektrycznego u).

Znajomość tych rozkładów pozwala nie tylko znaleźć model prawidłowo opisujący zjawisko roztwarzania elektrochemicznego, ale także daje możliwość odpowiedniego doboru parametrów procesu, a co za tym idzie lepszą kontrolę nad nim. Dzięki temu wynik obróbki jest lepiej przewidywalny i bardziej zgodny z założeniami, a także zoptymalizowany. Zastosowanie modelowania matematycznego do procesu mikroobróbki ECM pozwala na zmniejszenie energochłonności procesu, obniżenie kosztów, a także uzyskanie większej powtarzalności i stabilności.

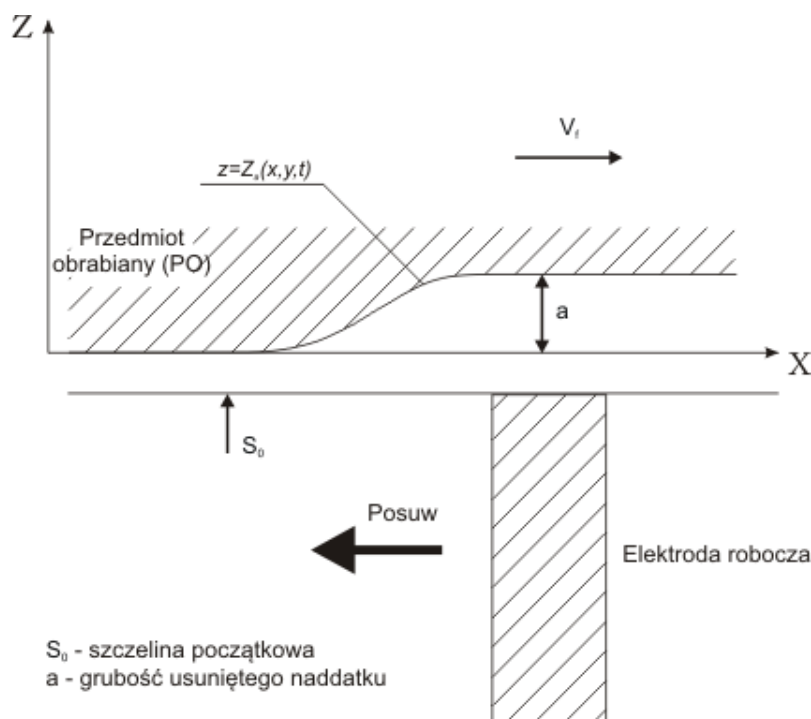
Matematyczne modelowanie procesu impulsowej obróbki elektrochemicznej, ze względu na swoją złożoność, sprowadza się do tworzenia modeli cząstkowych, które w zadowalający sposób opisują jedynie wybrane aspekty ogółu występujących zjawisk.

W modelach uproszczonych rozkłady poszczególnych wielkości są uśredniane wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej. Jest to spowodowane zarówno bardzo trudnym opisem matematycznym tych zjawisk, jak i trudnościami związanymi z próbami ich doświadczalnej weryfikacji. W rzeczywistości rozkłady wielkości

opisujących proces ECM są rozkładami przestrzennymi, losowymi i niestacjonarnymi i nie ma obecnie możliwości teoretycznego ich wyznaczenia.

Matematyczne modelowanie procesu elektrochemicznego można podzielić na dwa etapy:

- znalezienie zmiany kształtu PO: $z = Z_a(x,y,t)$ w trakcie obróbki (rys. 23) (z uwzględnieniem własności elektrolitu, materiału obrabianego oraz parametrów obróbki),
- wyznaczenie przebiegów podstawowych parametrów elektrycznych w trakcie impulsu roboczego (potencjał anody $\varphi_a(t)$, gęstość prądu $i_a(t)$ anodowego, gęstość ładunku elektrycznego przepływającego przez anodę $q_a(t)$) [24, 25, 38, 42, 47, 75].



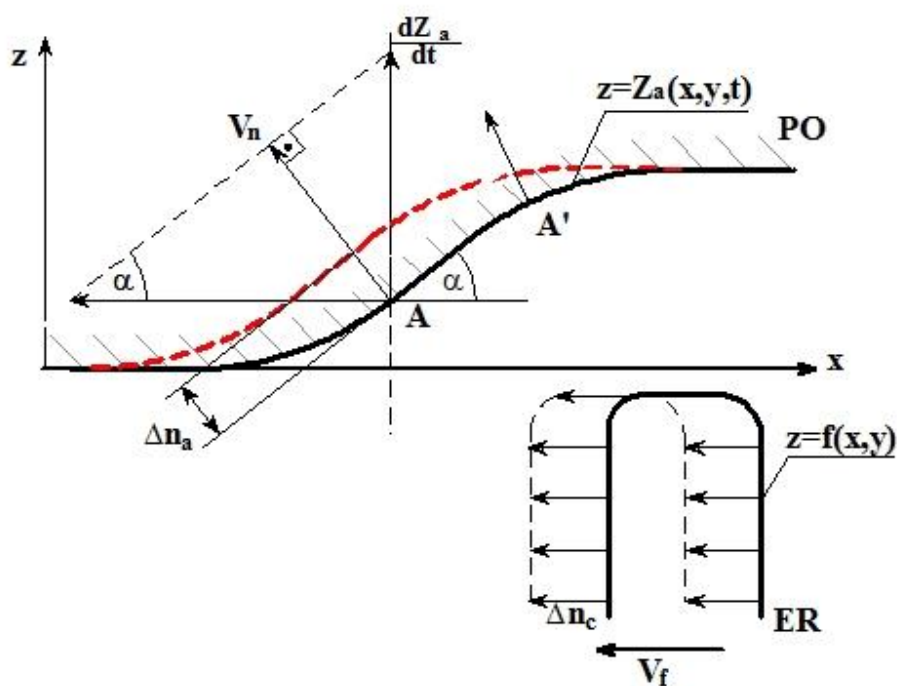
Rys. 23. Schemat elektrochemicznego kształtowania mikroelementów [13].

W trakcie analizy zjawisk zachodzących w obszarze szczeliny międzyelektrodowej trzeba pamiętać o stanach krytycznych, które prowadzą do przerwania procesu obróbki elektrochemicznej i które w sposób decydujący wpływają na dobór parametrów procesu. Mowa tu przede wszystkim o wypełnieniu szczeliny międzyelektrodowej pęcherzykami gazu, których graniczna koncentracja objętościowa prowadzi do całkowitego lub częściowego przerwania procesu obróbki. Następnym parametrem jest prędkość przepływu elektrolitu. Przy bardzo małej jej

wartości, w połączeniu z niewielką grubością szczeliny międzyelektrodowej (rzędu 30 μm) może dojść do powstawania stref zastoju elektrolitu, co może prowadzić do wzrostu temperatury i jego wrzenia (sytuacja ta ma miejsce dla impulsów roboczych, których długość jest większa od 1 μs). W przypadku impulsów krótszych (rzędu setek nanosekund) przyrost temperatury elektrolitu jest nieznaczny.

2.2 Uproszczony model matematyczny geometrii powierzchni w trakcie procesu roztwarzania elektrochemicznego.

Proces kształtowania anodowego uzyskiwany jest w wyniku przemieszczania się elektrody roboczej nad powierzchnią PO z zadaną prędkością V_f . Przyjmuje się, że elektroda robocza ma prosty kształt walca. Z prostych rozważań geometrycznych wynika, że wyznaczenie zmiany kształtu anody wiąże się z wyznaczeniem składowej prędkości normalnej do powierzchni obrabianej V_n , tak jak przedstawiono na rys. 24.



Rys. 24. Rozkład prędkości roztwarzania na powierzchni anody [24, 75].

Jak pokazano w [24, 25, 37, 75] przemieszczenie punktów profilu przedmiotu obrabianego (PO) wynosi:

$$\Delta n_a = V_n \cdot \Delta t \quad (11)$$

elektroda robocza (ER) przemieszcza się w tym samym czasie wzdłuż osi x o odcinek:

$$\Delta n_c = V_f \cdot \Delta t \quad (12)$$

Uwzględniając I prawo Faradaya, gęstość strumienia roztwarzanego na anodzie materiału przedstawia się zależnością:

$$i_m = \eta k i_a \quad (13)$$

Korzystając z tych zależności, można wyrazić prędkość roztwarzania w kierunku normalnym do anody w następujący sposób:

$$V_n = \frac{i_m}{\rho_m} = \eta k_v i_a \quad (14)$$

gdzie:

$$k_v = \frac{k}{\rho_m} \quad \text{objętościowy równoważnik elektrochemiczny.}$$

W rozpatrywanym przypadku obróbki impulsowej zasadne jest uśrednienie prędkości roztwarzania w czasie jednego cyklu napięciowego T [46], co prowadzi do zależności:

$$\bar{V}_n = \frac{\eta k_v \int_0^T i_a dt}{T} = \frac{\eta k_v q}{T} = \eta k_v q f \quad (15)$$

Zależność tę można zapisać w następujący sposób:

$$\bar{V}_n = k_w k_v i_a \quad (16)$$

gdzie:

$$i_a = \frac{q}{t_p} \quad \text{średnia gęstość prądu w czasie } t_p$$

$$k_w = \frac{t_p}{T} \quad \text{współczynnik wypełnienia.}$$

Specyfika procesu powoduje, że czasy narastania i opadania zboczy impulsów prądowych i napięciowych są różne. O ile kształt impulsu napięciowego jest znany i w modelu można uwzględnić czas jego trwania i amplitudę, to kształt impulsu prądowego jest z założenia nieznan.

W ogólnym przypadku proces kształtowania anody $F(x,y,z,t) = 0$ jest opisany równaniem:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \bar{V}_n \cdot \nabla F = 0 \quad (17)$$

Uwzględniając

$$\frac{\partial F}{\partial t} + k_v \cdot k_w \cdot i_a \cdot \nabla F = 0 \quad (18)$$

z warunkiem początkowym $F(x,y,z,0) = F_0(x,y)$.

Przechodząc do opisu anody w postaci $z = Z_a(x,y,t)$, mamy

$$F(x, y, z, t) = -z + Z_a(x, y, t) = 0 \quad (19)$$

$$|\nabla F| = \sqrt{1 + \left(\frac{\delta Z_a}{\delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta Z_a}{\delta y}\right)^2} \quad (20)$$

co prowadzi do równania

$$\frac{\partial Z_a}{\partial t} = k_v \cdot k_w \cdot |i_a| \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\partial Z_a}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_a}{\partial y}\right)^2} \quad (21)$$

Dla pojedynczego impulsu równanie przyjmuje postać:

$$\frac{\partial Z_a}{\partial t} = k_v \cdot q \cdot f \sqrt{1 + \left(\frac{\partial Z_a}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_a}{\partial y}\right)^2} \quad (22)$$

dla $t = 0$, $z = Z_0(x,y)$.

Dla warunków stanu quasi-stacjonarnego w układzie współrzędnych związanych z elektrodą roboczą, prędkość przemieszczania się profilu anody wzdłuż osi x równa jest prędkości względnej elektrod V_f , stąd:

$$\bar{V}_n = V_f \cdot \sin \alpha \quad (23)$$

gdzie:

$$\sin \alpha = \frac{\frac{\partial Z_a^S}{\partial \bar{x}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial Z_a^S}{\partial \bar{x}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_a^S}{\partial \bar{y}}\right)^2}} \quad (24)$$

Kształt anody $Z_a^S(\bar{x}, \bar{y})$ opisuje równanie:

$$V_f \cdot \frac{\partial Z_a^S}{\partial \bar{x}} = k_v \cdot q \cdot f \sqrt{1 + \left(\frac{\partial Z_a^S}{\partial \bar{x}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_a^S}{\partial \bar{y}}\right)^2} \quad (25)$$

Dla przekroju płaszczyzny przechodzącej przez oś elektrody, quasi-ustalony profil anody wyznaczony jest z warunku quasi-stacjonarności o postaci:

$$i_a = \frac{q \cdot f}{k_w} = \frac{V_f}{k_w \cdot k_v} \frac{\frac{\partial Z_a^S}{\partial \bar{x}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial Z_a^S}{\partial \bar{x}}\right)^2}} \quad (26)$$

Pamiętając, że gęstość ładunku q , jest funkcją grubości szczeliny międzyelektrodowej S , którą najczęściej przedstawia się w postaci zależności:

$$q = \frac{A}{S^n} \quad (27)$$

równanie (22) przyjmie postać:

$$\frac{\partial Z_a}{\partial t} = k_v \cdot \frac{A}{S^n} \cdot f \sqrt{1 + \left(\frac{\partial Z_a}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_a}{\partial y}\right)^2} \quad (28)$$

Znalezienie $Z_a^S(\bar{x}, \bar{y})$ związane jest z poznaniem rozkładu pola elektrycznego między elektrodami w warunkach obróbki. Powoduje to konieczność poznania przebiegu

i rozkładu gęstości prądu na anodzie oraz wyznaczenia ładunku elektrycznego przepływającego przez powierzchnię anody [24, 25, 38, 42].

2.3 Uproszczony model pola elektrycznego w szczelinie międzyelektrodowej.

W przypadku impulsowego roztwarzania elektrochemicznego duży wpływ na zjawiska fizyczne zachodzące w szczelinie międzyelektrodowej ma długość impulsu. W przypadku impulsów milisekundowych i mikrosekundowych istotne znaczenie ma nagrzewanie się elektrolitu i wpływ temperatury na cały proces. Z drugiej strony wpływ warstwy podwójnej jest zaniebawiany. Odwrotnie jest w przypadku impulsów nanosekundowych. W tym przypadku główną rolę zaczynają odgrywać zjawiska związane z występowaniem warstwy podwójnej, a dokładniej z jej ładowaniem i rozładowaniem.

W procesie obróbki elektrochemicznej, w wyniku reakcji elektrodowych, dochodzi do przemieszczania się jonów w elektrolicie i elektronów w metalu. Jest ono spowodowane następującymi czynnikami:

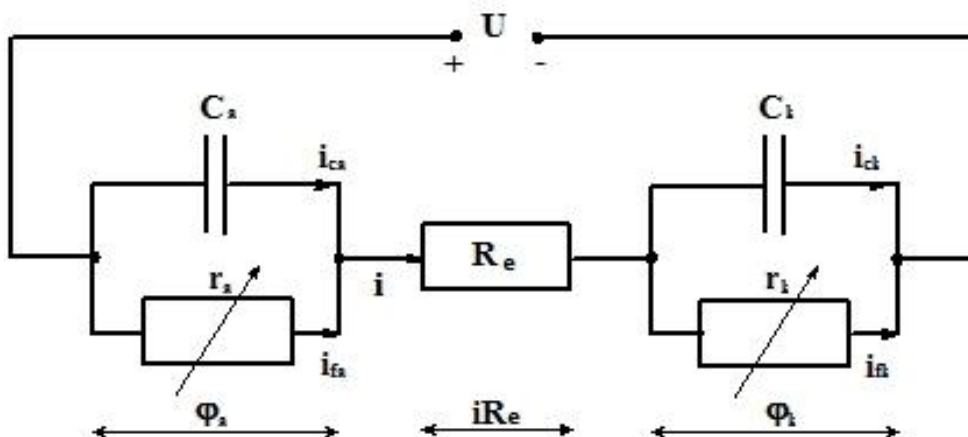
- polem elektrycznym,
- konwekcją,
- dyfuzją.

Efektom tego jest zgromadzenie się ładunków elektrycznych na powierzchniach elektrod, co prowadzi do powstania warstwy podwójnej. Rozciąga się ona na grubość Debay'a, która wynosi od 0,1 do 1 nm. W wyniku przyłożonego napięcia pojawiają się dwa zjawiska: po pierwsze zaczyna się reakcja roztwarzania elektrochemicznego, a co za tym idzie przepływ prądu Faraday'a i_f , po drugie następuje przepływ prądu przesunięcia, czyli prądu pojemnościowego i_c , który jest związany z istnieniem warstwy podwójnej. Ponieważ zachowuje się ona jak kondensator, i tak jest traktowana w elektrycznym układzie zastępczym opisującym szczelinę międzyelektrodową, dlatego powstaje w niej prąd przesunięcia.

Z pierwszym zjawiskiem związany jest transport masy przez granicę anoda – elektrolit i elektronów przez granicę katoda – elektrolit. Mówiąc inaczej przepływ prądu Faraday'a określa roztwarzanie anodowe.

Drugie zjawisko jest odpowiedzialne za ładowanie i rozładowywanie warstwy podwójnej (w ujęciu elektrycznego układu zastępczego w którym pełni ona rolę

kondensatora). Fizyczną interpretacją tego zjawiska jest przebudowa przestrzenna ładunków w elektrolicie i na elektrodzie.



Rys. 25. Elektryczny schemat zastępczy szczeliny międzyelektrodowej z uwzględnieniem warstwy podwójnej [24, 25].

W układzie zastępczym, przedstawionym na rys. 25 [24], rezystancja R reprezentuje przejście ładunku elektrycznego przez granicę elektroda – elektrolit. Pojemność C reprezentuje warstwę podwójną. R_e charakteryzuje rezystancję elektrolitu.

Rezystancja szczeliny międzyelektrodowej składa się z rezystancji elektrolitu oraz rezystancji R określanej mianem rezystancji Faradaya lub oporem polaryzacji elektrochemicznej. Nie podlega ona prawu Ohma, a jej wartość jest zmienna w czasie i wynosi $R = \frac{d\varphi}{di}$.

Prąd związany z przepływem ładunku elektrycznego przez granicę elektroda – elektrolit i_f opisany jest równaniem Butlera – Volmera:

$$i_f = i_0 \left[\exp\left(\frac{(1-\alpha)nF\varphi}{R\theta}\right) - \exp\left(\frac{-\alpha nF\varphi}{R\theta}\right) \right] \quad (29)$$

gdzie:

α – współczynnik przejścia,

n – liczba ładunków,

F – stała Faradaya,

φ – potencjał elektryczny,

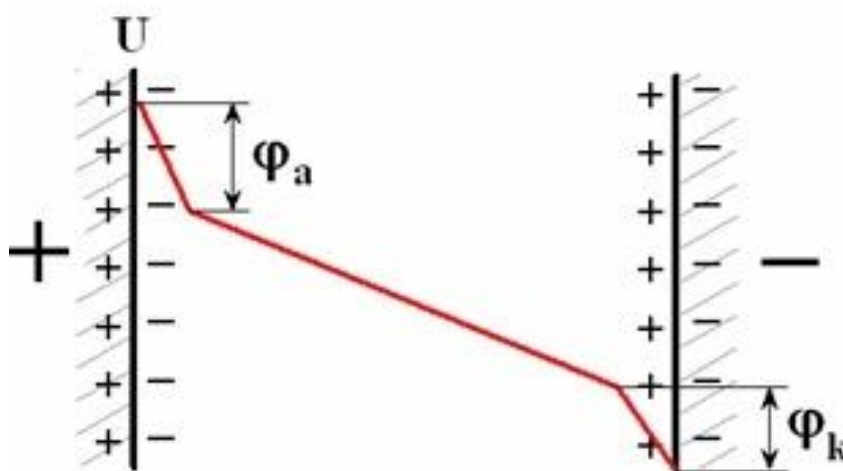
R – stała gazowa,

θ – temperatura,

i_0 – prąd wymiany.

W przypadku reakcji anodowej i_f odpowiada za szybkość wymiany masy, a co za tym idzie prędkość roztwarzania.

Zależność (29) pokazuje, że szybkość reakcji elektrochemicznych zachodzących na powierzchni, jest zależna od potencjału powstającego w warstwie podwójnej w sposób wykładniczy [24, 25]. Rozkład potencjału w szczelinie międzyelektrodowej przedstawiony jest na rys. 26.



Rys. 26. Rozkład potencjału elektrycznego w szczelinie międzyelektrodowej przy przyłożonym napięciu U [24, 73].

Gęstość prądu opisywana jest przez różniczkowe prawo Ohma:

$$j = -\kappa \nabla U \quad (30)$$

Co prowadzi do:

$$\nabla \cdot (\kappa \nabla U) = 0 \quad (31)$$

Ponieważ w warstwach podwójnych zgromadzone są swobodne nośniki ładunków elektrycznych, pole elektryczne w szczelinie międzyelektrodowej opisuje równanie Poissona. Biorąc pod uwagę, że grubość warstwy podwójnej jest kilka rzędów wielkości mniejsza niż grubość szczeliny międzyelektrodowej, wprowadza się

do warunków brzegowych potencjały elektrodowe φ_a i φ_k , które reprezentują ładunki swobodne oraz zaniedbuje się grubość warstwy podwójnej.

Stosując takie uproszczenie, a także zakładając w pierwszym przybliżeniu brak zmian konduktywności elektrycznej elektrolitu ($\kappa = const$), można opisać rozkład potencjału pola elektrycznego w szczeliny międzyelektrodowej za pomocą równania Laplace'a:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (32)$$

z warunkami brzegowymi:

na anodzie $u = U - \varphi_a$

na katodzie $u = \varphi_k$

na powierzchni izolowanej $z = G_{iz} \quad \frac{\partial u}{\partial n} |_{G_{iz}} = 0$

Spadki potencjału φ_a i φ_k na granicach anoda – elektrolit i katoda – elektrolit są zależne od gęstości prądu przepływającego przez daną powierzchnię.

Równania opisujące pole elektryczne w obszarze szczeliny międzyelektrodowej przyjmują postać [24]:

$$\nabla^2 = 0 \quad (33)$$

$u|_A = U - \varphi_a$

$u|_K = \varphi_k$

$\frac{\partial u}{\partial n} |_{G_{iz}} = 0$

Warunki brzegowe na granicy Helmholtza mają postać:

$$\kappa \cdot \frac{du}{dn} |_A = C_a \cdot \frac{d\varphi_a}{dt} + 2 \cdot i_{0a} \sinh\left(\frac{Fn\varphi_a}{2R\theta}\right) \quad (34)$$

$$\kappa \cdot \frac{du}{dn} |_K = C_k \cdot \frac{d\varphi_k}{dt} + 2 \cdot i_{0k} \sinh\left(\frac{Fn\varphi_k}{2R\theta}\right)$$

Przy rozwiązywaniu powyższego układu równań stosuje się metodę linearyzacji rozkładu potencjału wzdłuż grubości szczeliny międzyelektrodowej S czyli zakłada się, że pole elektryczne jest lokalnie jednowymiarowe [47]. W przybliżeniu tym

rozkład potencjału wzdłuż S jest równomierny, co daje następującą postać rozwiązania równania Laplace'a [24, 37, 75]:

$$u = \frac{U - (\varphi_a + \varphi_k)}{S} \xi \quad (35)$$

Gdzie:

u – potencjał pola elektrycznego w szczelinie międzyelektrodowej,

φ_a, φ_k – potencjały anody i katody,

U – napięcie zasilające,

ξ – współrzędna wzdłuż normalnej do elektrody roboczej.

Gradient potencjału na elektrodach:

$$\frac{du}{dn} \Big|_{A,K} = \frac{U - (|\varphi_a| + |\varphi_k|)}{S} \quad (36)$$

Podstawiając powyższą zależność do warunków brzegowych i odpowiednio je przekształcając otrzymuje się równania opisujące pole elektryczne w szczelinie międzyelektrodowej [24, 25]:

$$R_e \cdot \left(C_a \cdot \frac{d\varphi_a}{dt} + 2i_{0a} \sinh \left(\frac{Fn\varphi_a}{2R\theta} \right) \right) + \varphi_a + \varphi_k = U \quad (37)$$

$$C_a \cdot \frac{d\varphi_a}{dt} + 2i_{0a} \sinh \left(\frac{Fn\varphi_a}{2R\theta} \right) = C_k \cdot \frac{d\varphi_k}{dt} + 2i_{0k} \sinh \left(\frac{Fn\varphi_k}{2R\theta} \right) \quad (38)$$

gdzie $R_e = \frac{S}{\kappa}$

z warunkiem początkowym:

dla $t=0$ $\varphi_a=0$ i $\varphi_k=0$

Prąd Faraday'a dla anody wynosi:

$$i_{fa} = i_{0a} \sinh \left(\frac{nF\varphi_a}{2R\theta} \right) \quad (39)$$

a ładunek elektryczny q przyptywający w czasie jednego impulsu t_i wynosi:

$$q = \int_0^{t_i} i_{fa} dt \quad (40)$$

W powyższych równaniach zakłada się, że zarówno temperatura jak i przewodność elektrolitu w trakcie impulsu nie zmienia się.

Aby określić przyrost temperatury $\Delta\theta = \theta - \theta_0$ w czasie pojedynczego impulsu można skorzystać z równania [37]:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\kappa \cdot U^2}{\rho \cdot C \cdot S^2} \quad (41)$$

$$\theta(t = 0) = 0$$

Przy założeniu, że κ nie zmienia się wraz ze zmianą temperatury oraz, że wartość S nie zmienia się dla pojedynczego impulsu, dla czasu t_i przyrost temperatury wynosi:

$$\theta = \frac{\kappa \cdot U^2}{\rho \cdot C \cdot S^2} t_i$$

dla wartości:

$$\kappa = 13 \text{ A/Vm},$$

$$\rho = 998 \text{ kg/m}^3$$

$$C = 4189 \text{ J/kgK}$$

$$t_i = 100 \text{ ns}$$

$$U = 20 \text{ V}$$

$$S = 30 \text{ }\mu\text{m}$$

Przyrost temperatury w trakcie jednego impulsu wynosi:

$$\Delta\theta = 0,15 \text{ K}$$

W przypadku jednowymiarowego modelu bez wymiany ciepła przez elektrody temperatura zależy od intensywności wydzielania ciepła Joule'a, co przedstawia równanie (41) [75]. Dodatkowo zakłada się stałą prędkość ośrodka wzdłuż szczeliny S , co znaczy, że temperatura, lepkość oraz konduktywność nie zmienia się dla danego przekroju szczeliny, a ich wartości są uśredniane dla danej współrzędnej ξ , będącej współrzędną wzdłuż normalnej do elektrody roboczej.

Dodatkowo zakłada się, że przepływ w szczelinie podczas impulsu roboczego jest laminarny ($Re < 2000$).

Pominięcie przewodnictwa cieplnego elektrolitu wzdłuż szczeliny daje możliwość traktowania współrzędnej ξ jako parametr.

W przypadku, gdy $t_i < \frac{L}{w}$, gdzie L – długość szczeliny wzdłuż przepływu, w – rozkład prędkości elektrolitu, nie dochodzi do całkowitej wymiany elektrolitu w strefie obróbki, co prowadzi do wzrostu temperatury [39].

Warunek na przyrost temperatury dla kolejnego impulsu:

$$\theta(\xi, t = (n - 1)(t_i + t_p)) = \theta(\xi, t = (n - 1)(t_i + t_p) - t_0) \quad (42)$$

dla $t_i > \frac{L}{w}$

warunek przyjmuje postać:

$$\theta(\xi, t = (n - 1)(t_i + t_p)) = 0 \quad (43)$$

Tego typu model opisuje z dostateczną dokładnością procesy, w których liczba Strouhala dla impulsu roboczego $S_{t_i} = \frac{L}{wt_i} \gg 1$. W przypadku obróbki impulsami $t_i = 100 \text{ ns}$, długości szczeliny $L = 200 \text{ }\mu\text{m}$ prędkości przepływu $w t_i = 5 \text{ m/s}$ liczba Strouhala $S_{t_i} = 400$.

Kolejnym, istotnym zjawiskiem towarzyszącym procesowi obróbki elektrochemicznej krótkimi impulsami jest wydzielanie się wodoru w postaci pęcherzyków gazu [99, 100]. Czas powstawania pęcherzyków gazu w obszarze szczeliny międzyelektrodowej w trakcie procesu roztwarzania elektrochemicznego jest rzędu milisekund, a czas impulsu roboczego rzędu mikrosekund i nanosekund [62]. To powoduje, że analizując zjawiska w obszarze szczeliny w trakcie jednego impulsu napięciowego można pominąć wpływ fazy gazowej na proces, zwłaszcza na przewodność elektrolitu. Jednak w trakcie obróbki używa się pakietów impulsów, których sumaryczny czas trwania jest wystarczający do powstania pęcherzyków gazu.

Wyznaczenie koncentracji wodoru w obszarze szczeliny międzyelektrodowej jest niezmiernie trudne. Jest to związane z faktem, że panują tam zmienne warunki,

zarówno w czasie jak i przestrzeni. Dodatkowo mechanizmy rządzące powstawaniem wodoru w elektrolicie, a następnie jego wydzielaniem na katodzie w postaci gazu są bardzo skomplikowane. Powoduje to, że bardzo trudno jest oszacować koncentrację fazy gazowej w trakcie obróbki elektrochemicznej i jej wpływu na proces obróbki. W przypadku obróbki impulsowej zjawiska te są jeszcze bardziej skomplikowane.

W szczelinie międzyelektrodowej można zidentyfikować trzy obszary [38]:

- obszar w którym jest tylko elektrolit;
- obszar zawierający mieszaninę dwufazową elektrolitu i pęcherzyków gazu o grubości $h < S$, w którym koncentracja fazy gazowej jest stała i równa β^* . Typowa wartość $\beta^* = 0,5$;
- obszar zawierający obie fazy o zmiennej koncentracji fazy gazowej $\beta (\beta > \beta^*)$.

Upraszczając, zakłada się, że szczelina wypełniona jest mieszaniną gazu i cieczy, a koncentracja fazy gazowej jest uśredniana wzdłuż szczeliny [38, 41]:

$$\beta = \beta^* \frac{h}{S} \quad (44)$$

gdzie:

$$0 < h < S$$

W takim przypadku konduktywność κ jest funkcją temperatury i koncentracji fazy gazowej. Wyraża to zależność Brugemana:

$$\kappa = \kappa_0 (1 + \alpha_t (T - T_0)) (1 - \beta)^{\frac{3}{2}} \quad (45)$$

Uwzględniając (45) w równaniach (37), (38) zarówno temperatura jak i przewodność przestają być wartościami stałymi.

Równania (37), (38) rozwiązuje się numerycznymi metodami iteracyjnymi najczęściej za pomocą metody Runge – Kutta. Dla uproszczenia zakłada się, że przyrost temperatury $\Delta\theta$ dla objętości kontrolnej V_k jest taki sam w każdym impulsie. Dodatkowo przyjmuje się, że nie następuje wymiana ciepła między elektrolitem a elektrodami. W każdym kolejnym kroku iteracji w obszarze szczeliny pojawia się nowa porcja elektrolitu o temperaturze T_0 i równocześnie taka sama porcja elektrolitu opuszcza szczelinę. Aby obliczyć przyrost temperatury, należy określić prędkość przepływu elektrolitu. Następnie na podstawie prędkości przepływu, długości impulsu

roboczego i przerwy oraz długości wzdłuż szczeliny określa się ilość iteracji k przyrostów temperatury.

$$k = \frac{L}{t_i + t_p} \cdot \frac{1}{w} \quad (46)$$

gdzie:

w – prędkością elektrolitu,

L – długość szczeliny wzdłuż przepływu.

Przy takich założeniach wzrost temperatury $\Delta\theta$ w szczelinie jest liniowy. Do obliczeń uśrednia się jej wartość wzdłuż szczeliny.

2.4 Symulacje komputerowe.

Do przeprowadzenia symulacji komputerowych użyto oprogramowania wykonanego w Politechnice Krakowskiej służącego do modelowania obróbki elektrochemicznej elektrodą walcową. W programie wykorzystano zaprezentowany powyżej matematyczny model procesu, opracowany przez prof. J. Kozaka i jego zespół, z dodatkowymi zmianami wprowadzonymi przez autora, które uwzględniają wpływ temperatury i koncentracji gazowej na proces obróbki elektrochemicznej.

Oprogramowanie zostało napisane w środowisku Matlab. Danymi wejściowymi niezbędnymi do symulacji procesu są:

- kształt i wymiary powierzchni obrabianej,
- średnica elektrody walcowej,
- długość i kierunek trajektorii elektrody roboczej,
- niezbędne do wykonania symulacji parametry elektryczne procesu,
- temperatura elektrolitu i koncentracja fazy gazowej,
- prędkość przepływu elektrolitu.

Kształt powierzchni obrabianej może zostać wprowadzony, jako:

- chmura punktów,
- powierzchnia zdefiniowana w formacie STL,
- płaszczyzna (zorientowana równolegle do płaszczyzny XY).

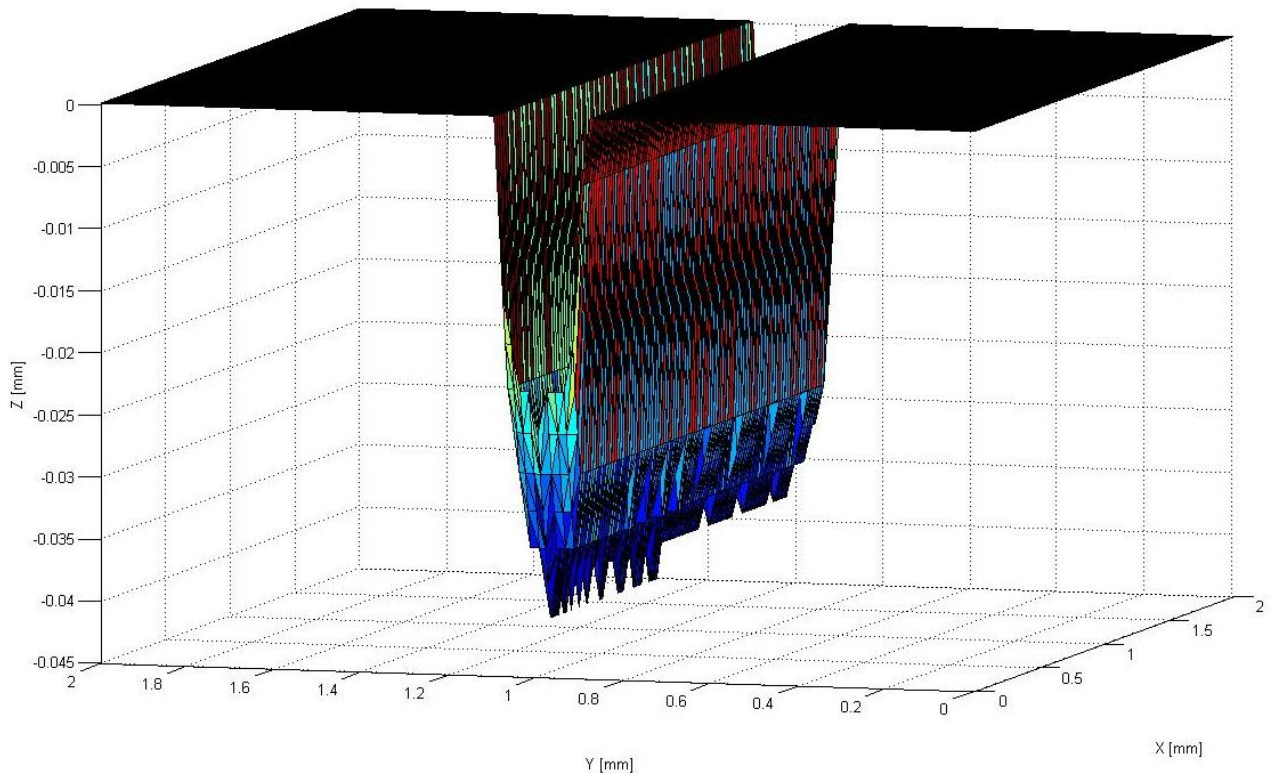
Trajektoria elektrody roboczej może być zdefiniowana w następujący sposób:

- jako współrzędne wierzchołków krzywej,
- jako współrzędne końców odcinka.

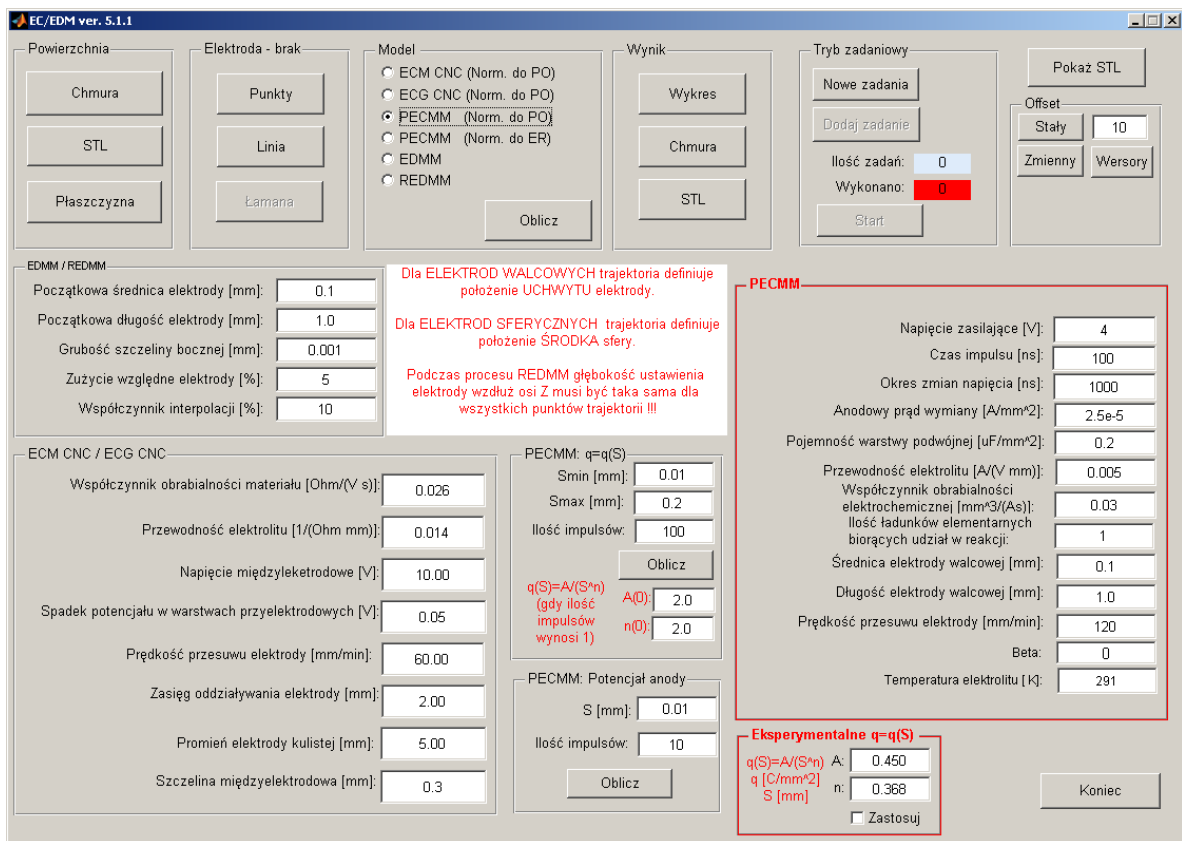
Wyniki symulacji mogą być przedstawione, jako:

- wykres przestrzenny,
- chmury punktów,
- pliku formatu STL.

Na rys. 27 pokazano przykładowy trójwymiarowy model wykonanego kształtu, natomiast rys. 28 przedstawia główne okno programu, w którym definiuje się powierzchnię obrabianą, trajektorię elektrody oraz ustala się parametry wejściowe procesu.



Rys. 27. Przykładowa symulacja wykonanej struktury.



Rys. 28. Okno główne programu symulacyjnego.

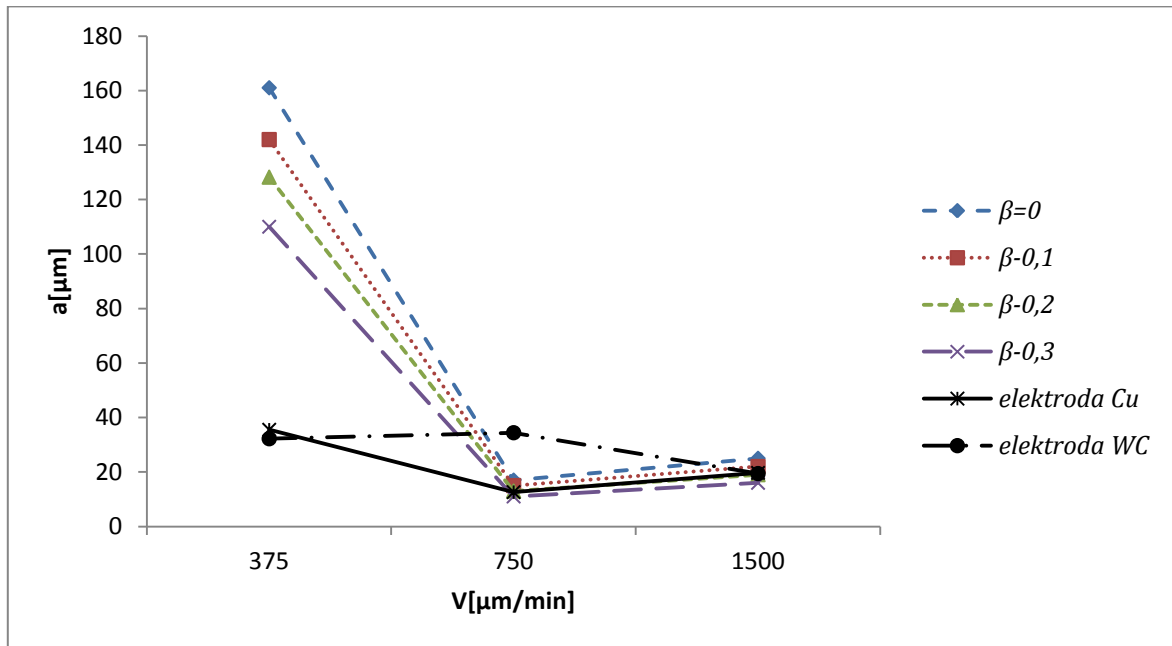
Przeprowadzono symulację dla parametrów, które zostały użyte w trakcie wstępnych badań doświadczalnych wg. tego samego planu badań. W celu zbadania wpływu koncentracji fazy gazowej na proces roztwarzania elektrochemicznego przeprowadzono symulacje, w których użyto zmiennej wartości przewodności elektrycznej elektrolitu zgodnie ze wzorem (45). W tab. 1 zamieszczono wartości κ i β użytych do symulacji.

Tab.1. Wartości przewodności elektrolitu κ dla różnych wartości współczynnika β .

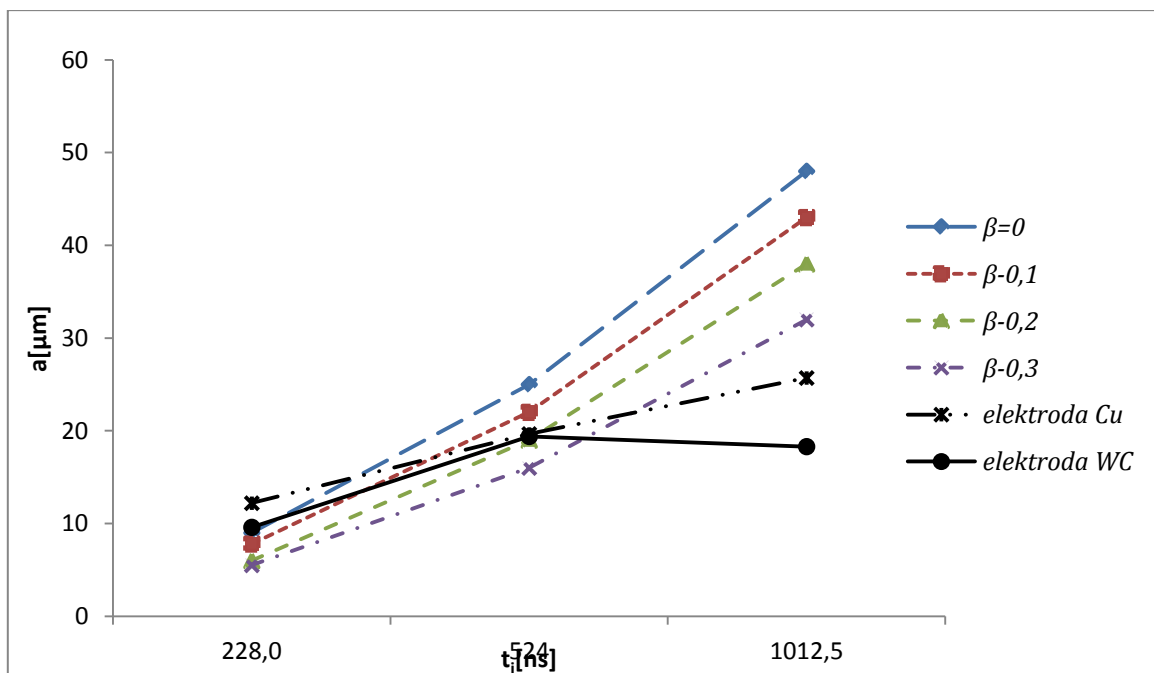
κ [A/(Vmm)]	κ_0 [A/(Vmm)]	β
0,000797	0,00136	0,3
0,000973	0,00136	0,2
0,00116	0,00136	0,1

Następnie wyniki uzyskanych symulacji porównano z wynikami otrzymanymi z badań doświadczalnych. Na poniższych rysunkach przedstawiono porównanie wyników symulacji, uzyskanych dla poszczególnych wartości β . Pozostałe wartości

parametrów są wartościami z centrum planu: $S_0 = 30 \mu\text{m}$, $U = 20 \text{ V}$, $t_i = 540 \text{ ns}$, $V_f = 1500 \mu\text{/min}$.

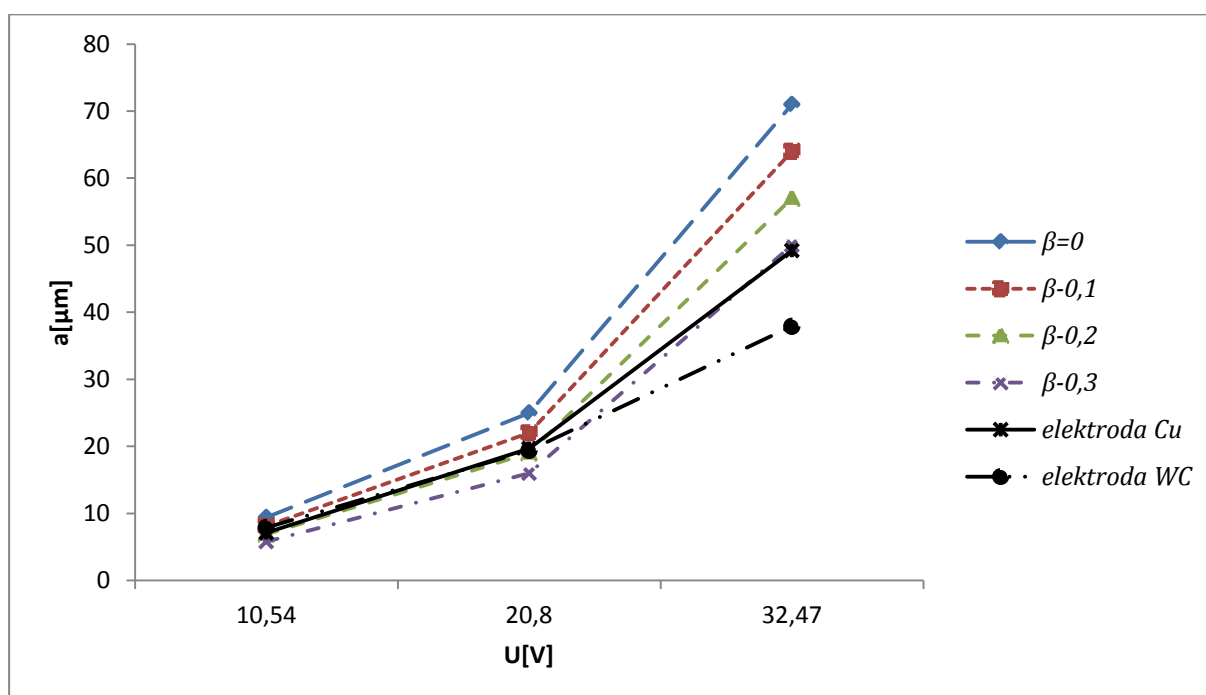


Rys. 29. Zależność grubości usuniętego naddatku a od prędkości posuwu elektrody V_f , dla różnych wartości β . Porównanie wyników symulacji z danymi doświadczalnymi.



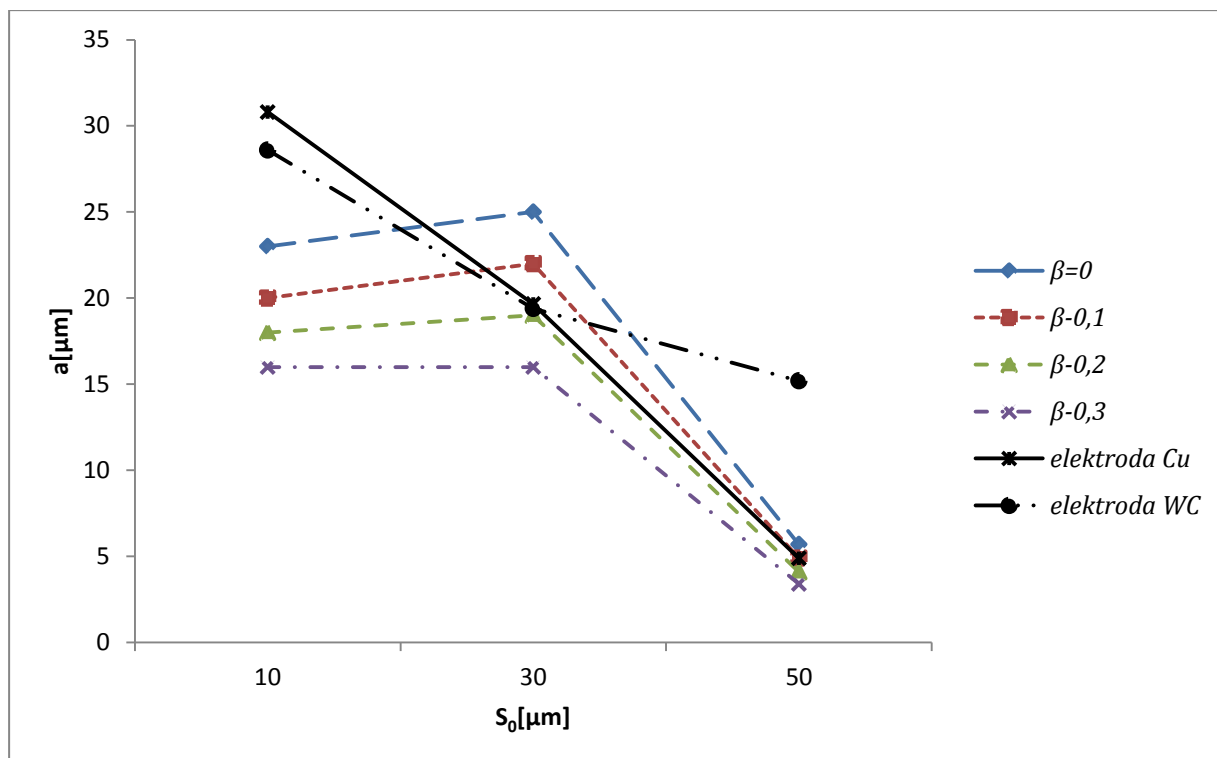
Rys. 30. Zależność grubości usuniętego naddatku a od czasu impulsu t_i , dla różnych wartości β . Porównanie wyników symulacji z danymi doświadczalnymi.

Z wykresu przedstawionego na rys. 30 można stwierdzić, że rozbieżność między modelem a danymi doświadczalnymi (dla dużych czasów impulsów rzędu 1 μ s) pokazuje, że procesy przejściowe związane z ładowaniem i rozładowaniem warstwy podwójnej mają coraz mniejsze znaczenie. Dla krótkich czasów impulsów roboczych (rzędu 200 ns), rozbieżność między wynikami symulacji a doświadczalnymi świadczy o tym, że wpływ fazy gazowej jest praktycznie zaniedbywalny. Można przypisać to powstawaniu na tyle małej ilości fazy gazowej, że nie opuszcza ona strefy przykatodowej, a co za tym idzie jej wpływ na przewodność jest znikomy.



Rys. 31. Zależność grubości usuniętego naddatku a od napięcia roboczego U , dla różnych wartości β . Porównanie wyników symulacji z danymi doświadczalnymi.

W przypadku zależności grubości usuniętego naddatku a od napięcia międzyelektrodowego U , dla ustalonych pozostałych parametrów (rys. 31) widać, że koncentracja fazy gazowej, a co za tym idzie przewodność, wpływa na grubość usuniętego naddatku. Wynika to z tego, że większa ilość fazy gazowej (mniejsza przewodność) powoduje w obszarze warstwy podwójnej zmniejszenie ilości nośników ładunku, co z kolei wpływa na obniżenie potencjału i zmniejszenie pojemności warstwy podwójnej. W efekcie końcowym prowadzi to do zmniejszenia ilości usuniętego materiału, wynikiem czego jest mniejszy prąd i_f .



Rys. 32. Zależność grubości usuniętego naddatku a od grubości szczeliny początkowej S_0 , dla różnych wartości β . Porównanie wyników symulacji z danymi doświadczalnymi.

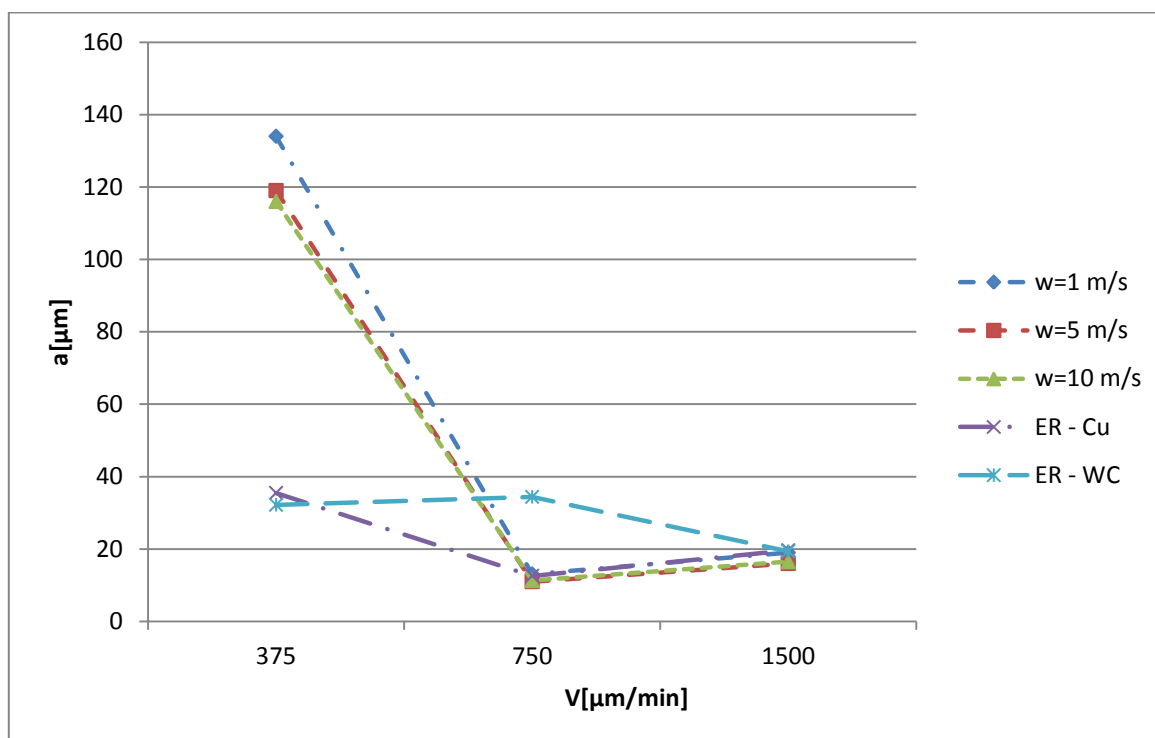
Rozbieżność między wynikami symulacji, a danymi z badań dla małych wartości szczeliny międzyelektrodowej sugeruje, że w tym przypadku przybliżenie rozkładu potencjału u wzdłuż szczeliny S , jako lokalnie równomiernego, jest zbyt dużym uproszczeniem (rys. 32). W przypadku większych szczelin (powyżej $20 \mu\text{m}$), równomierny rozkład potencjału jest zasadny. Symulacja pokazuje, że zwiększanie koncentracji fazy gazowej (zmniejszanie przewodności) prowadzi to do zmniejszania usuniętego naddatku.

W celu zbadania wpływu temperatury elektrolitu na proces roztwarzania elektrochemicznego przeprowadzono symulacje, w których użyto zmiennej wartości przewodności elektrycznej elektrolitu zgodnie ze wzorem (45). Symulacje zostały wykonane dla różnych wartości prędkości przepływu elektrolitu w , a co za tym idzie, zgodnie z przedstawionym modelem, dla różnych wartości temperatury θ (tab. 2).

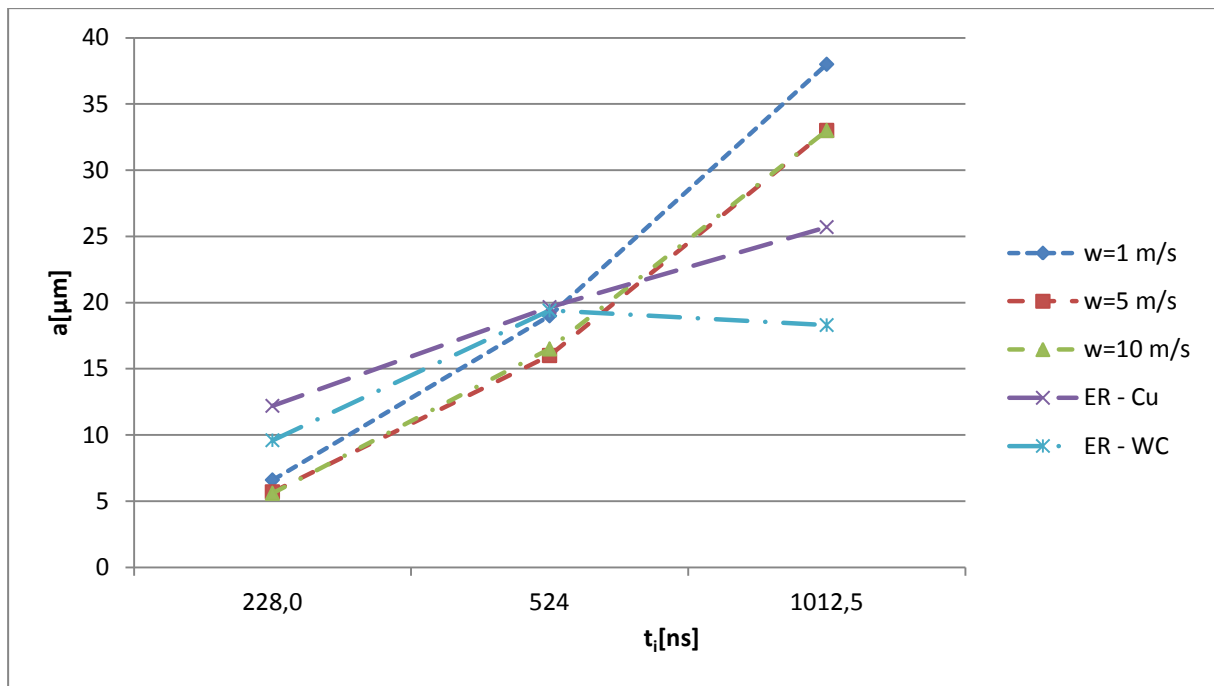
Tab.2. Wartości przewodności elektrolitu κ dla różnych wartości prędkości elektrolitu w i przyrostu temperatury θ .

κ [A/(Vmm)]	κ_0 [A/(Vmm)]	w [m/s]	$\Delta\theta$ [K]
0,00098	0,00136	1	20
0,00083	0,00136	5	4
0,00082	0,00136	10	2

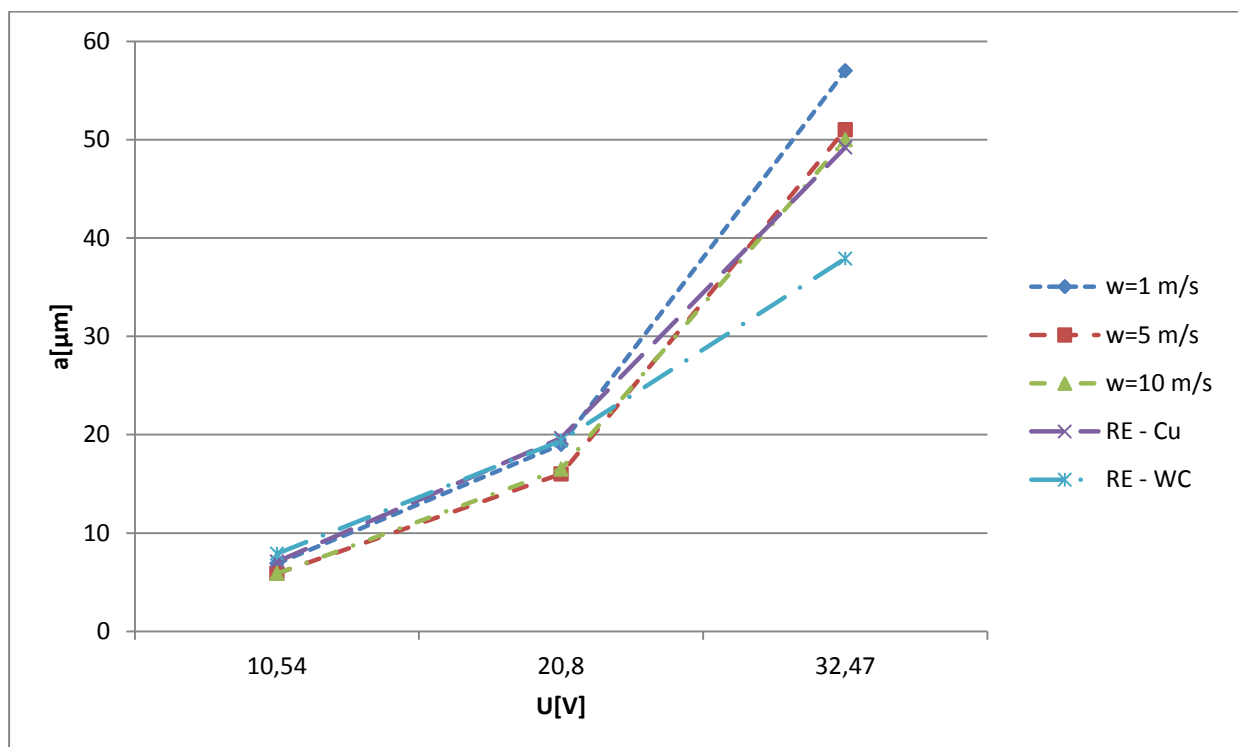
Wyniki symulacji porównano z wynikami uzyskanymi podczas badań. Poniżej przedstawiono porównanie wyników symulacji uzyskanych dla poszczególnych wartości w (rys. 33 – 36). Pozostałe wartości parametrów są wartościami z centrum planu: $S_0 = 30 \mu\text{m}$, $U = 20 \text{ V}$, $t_i = 540 \text{ ns}$, $V_f = 1500 \mu/\text{min}$, $\beta = 0,3$.



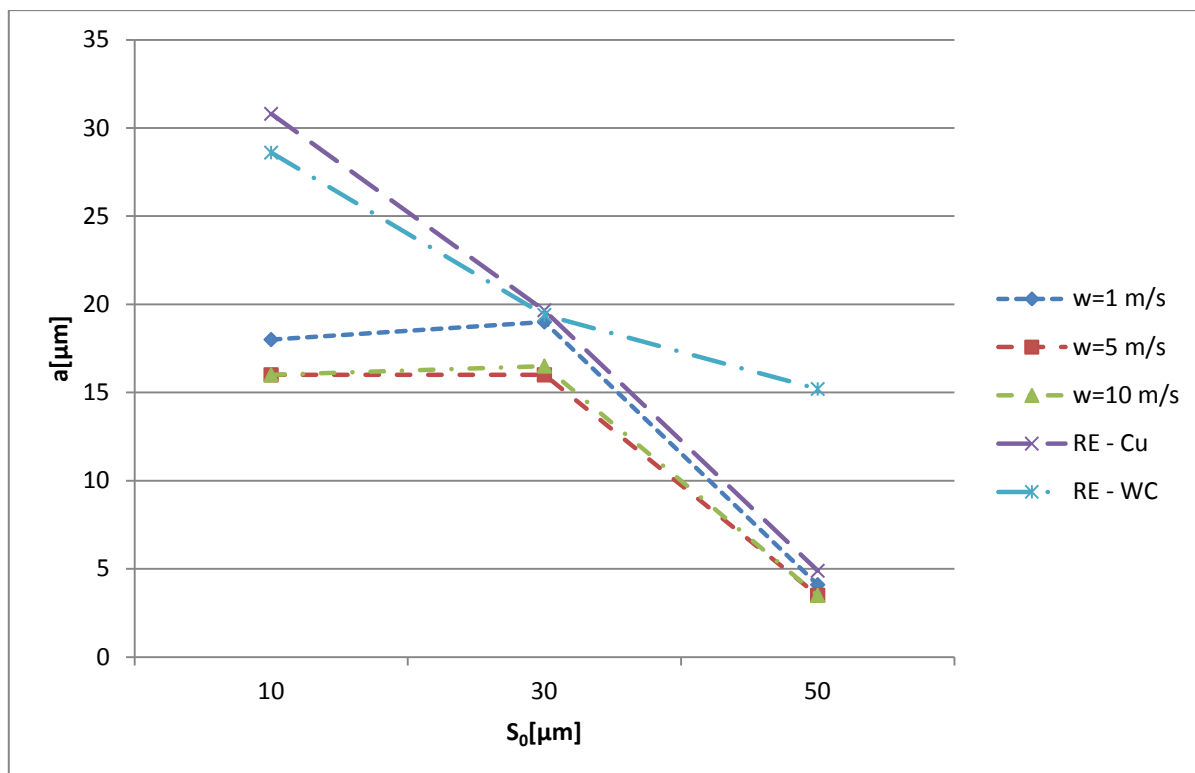
Rys. 33. Zależność grubości usuniętego nadkładu a od prędkości posuwu elektrody V_f , dla różnych wartości β . Porównanie wyników symulacji z danymi doświadczalnymi.



Rys. 34. Zależność grubości usuniętego naddatku a od czasu impulsu t_i , dla różnych wartości β . Porównanie wyników symulacji z danymi doświadczalnymi.



Rys. 35. Zależność grubości usuniętego naddatku a od napięcia roboczego U , dla różnych wartości β . Porównanie wyników symulacji z danymi doświadczalnymi.



Rys. 36. Zależność grubości usuniętego naddatku a od grubości szczeliny początkowej S_0 , dla różnych wartości β . Porównanie wyników symulacji z danymi doświadczalnymi.

Przy prędkości przepływu elektrolitu 1 m/s wzrost temperatury elektrolitu w obszarze szczeliny międzyelektrodowej jest w granicach 20 K. Wyższa temperatura powoduje zwiększenie przewodności elektrolitu w strefie obróbki. Zwiększa się ilość nośników w warstwie podwójnej, a co za tym idzie rośnie jej pojemność. W rezultacie prowadzi to do zwiększenia ilości usuniętego naddatku i wzrostu prądu i_f .

Przy prędkości 5 m/s wzrost temperatury wynosi 4 K, a w przypadku prędkości 10 m/s, są to 2 K. Można stwierdzić, że wzrost temperatury przy powyższych prędkościach jest nieistotny i można go zaniedbać. Tak małe zmiany temperatury są efektem szybkiej wymiany elektrolitu w obszarze szczeliny międzyelektrodowej, uniemożliwiającej podgrzanie się go.

3 STANOWISKO BADAWCZE

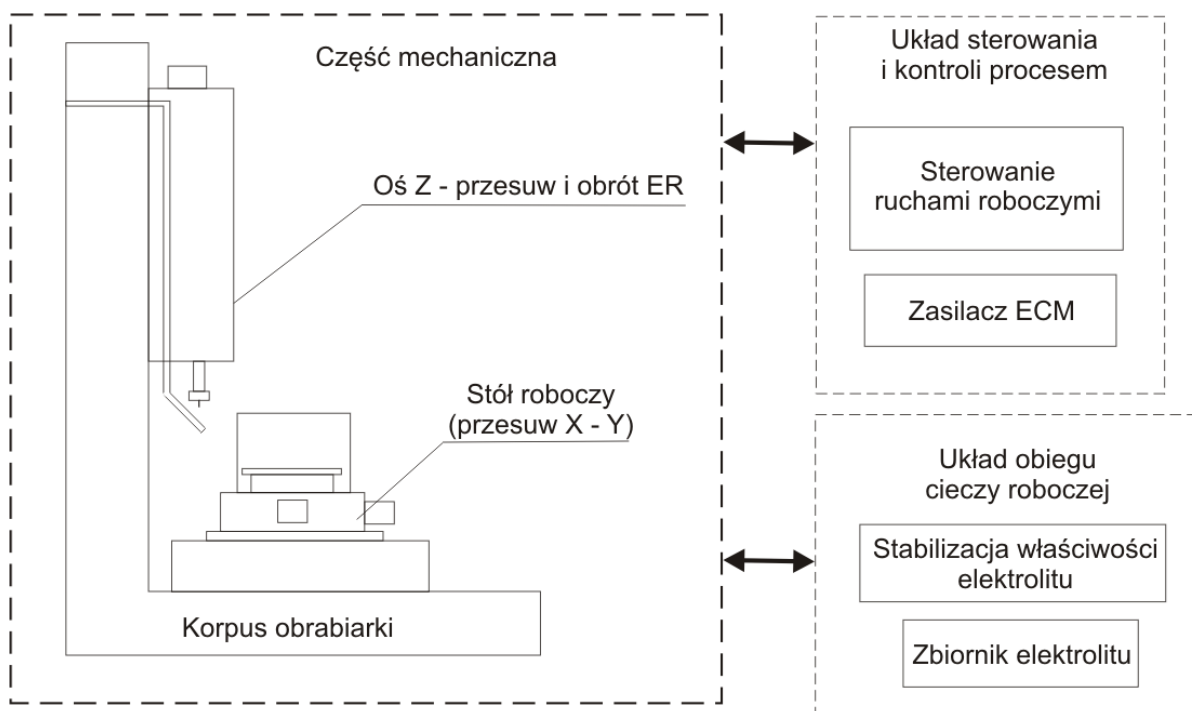
3.1 Opis stanowiska badań.

Badania doświadczalne zostały przeprowadzone na stanowisku badawczo – dydaktycznym do mikroobróbki ECM. Zostało ono zaprojektowane i wykonane w Instytucie Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej. Koncepcję i częściowy projekt opracował autor, który równocześnie nadzorował wykonanie stanowiska. Powstało ono jako prototyp obrabiarki do mikroobróbki elektrochemicznej. Jednym z kluczowych elementów stanowiska jest generator nanosekundowych impulsów roboczych. Jego budowa i parametry pracy miały bardzo duży wpływ na wynik obróbki. Generowane impulsy były z zakresu od 100 ns do 1500 ns. Na rys. 37 przedstawiono schemat funkcjonalny stanowiska badawczego.

W jego budowie można wyróżnić kilka istotnych elementów składowych niezbędnych do prowadzenia mikroobróbki elektrochemicznej [76, 77, 78]. Najważniejsze z nich, zarówno z punktu widzenia funkcjonalnego, jak i konstrukcyjnego, to:

- część mechaniczna obrabiarki,
- układ generowania impulsów roboczych,
- układ sterowania ruchami roboczymi,
- układ obiegu elektrolitu,
- układ kształtowania elektrody roboczej.

Istotnym problemem w obróbce elektrochemicznej mikroelementów jest zapewnienie takiego samego zamocowania przedmiotu obrabianego i elektrody roboczej w trakcie realizacji całego procesu. Kolejny - to agresywne środowisko panujące w strefie obróbki, które stawiało wysokie wymagania materiałom użytym do budowy obszaru obróbki. Ponadto należało zapewnić izolację elementów mechanicznych obrabiarki od wpływu elektrolitu.



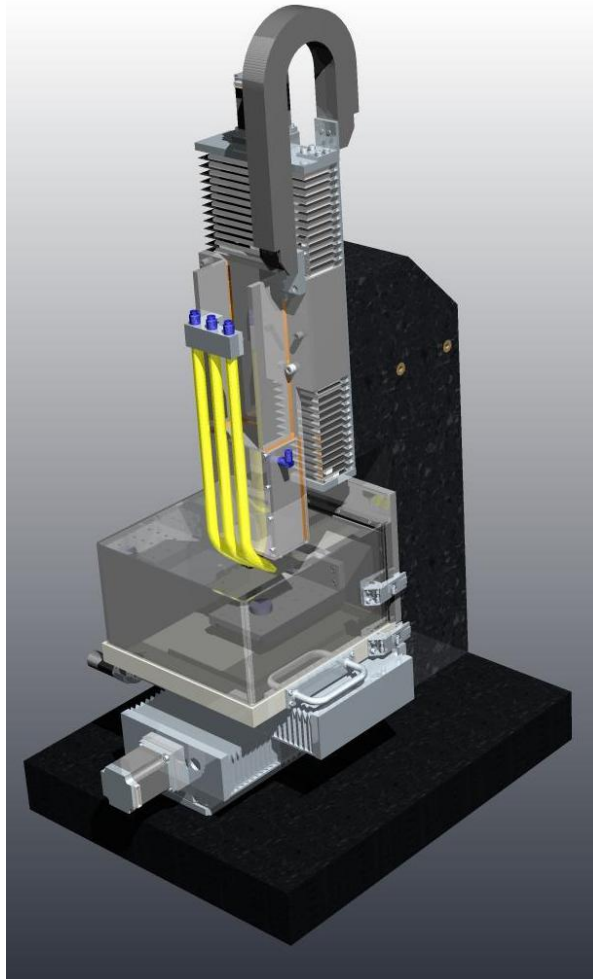
Rys. 37. Schemat funkcjonalny stanowiska badawczego.

Urządzenia do wytwarzania mikroelementów muszą spełniać bardzo wysokie wymagania związane z dokładnością wykonania, powtarzalnością ruchów i odporność na drgania. Są one podobne do stawianych urządzeniom do pomiaru wielkości geometrycznych. Dlatego w obrabiarkach, na których wykonywane są procesy mikroobróbki stosuje się rozwiązania sprawdzone w precyzyjnych urządzeniach pomiarowych. Również w stanowisku do mikroobróbki elektrochemicznej można zauważyć podobne rozwiązania. Jest to np.: granitowy korpus, czy wibroizolatory.

W części mechanicznej można wyróżnić kilka głównych zespołów:

- granitowy korpus,
- stół ustawczy XY, wraz z przymocowanym do niego stolikiem roboczym przeznaczonym do mocowania próbek,
- oś Z z precyzyjnym uchwytem elektrody roboczej.

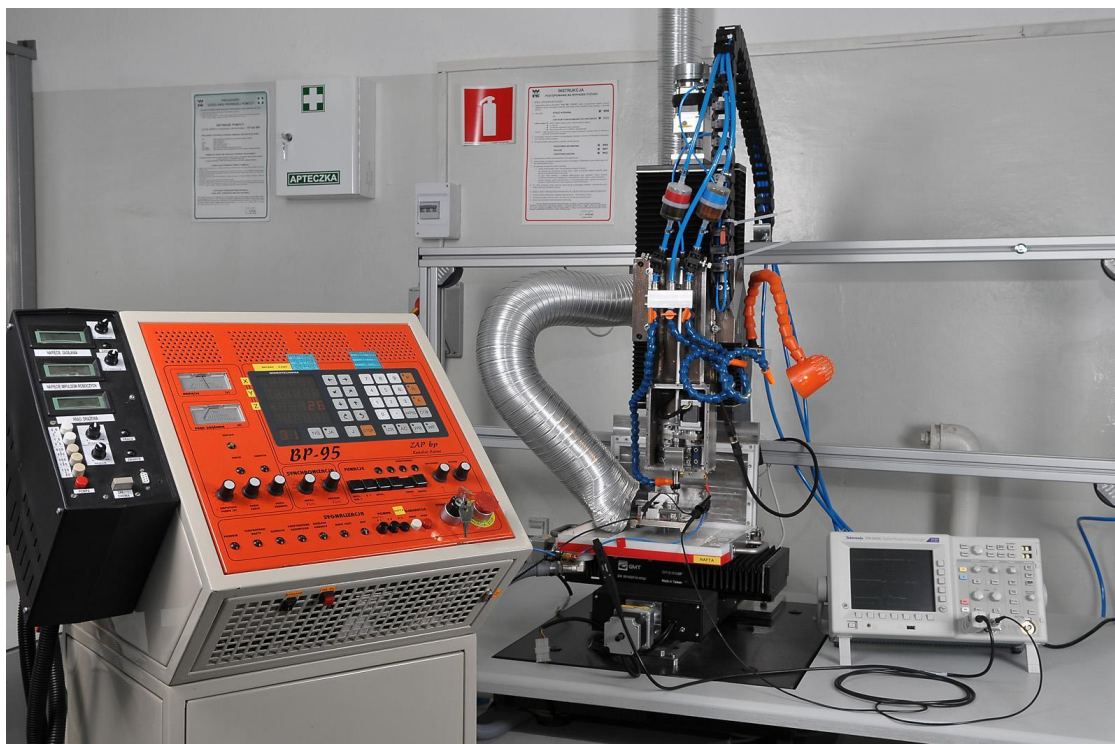
Na rys.38. przedstawiono model części mechanicznej.



Rys. 38. Model części mechanicznej stanowiska do mikroobróbki ECM.

Korpus obrabiarki umieszczono na konstrukcji wykonanej z profili aluminiowych. Uzyskano w ten sposób przestrzeń pozwalającą na montowanie dodatkowych elementów wyposażenia, np. dodatkowego systemu sterującego napędami, a także na swobodne podłączanie aparatury kontrolno – pomiarowej (oscyloskop, miernik wielofunkcyjny) czy używanie dodatkowych zasilaczy.

Na rys. 39 przedstawiono widok stanowiska do mikroobróbki ECM, na którym przeprowadzono badania doświadczalne procesu obróbki mikroelementów.



Rys. 39. Stanowisko do mikroobróbki ECM.

3.1.1 Układ napędów

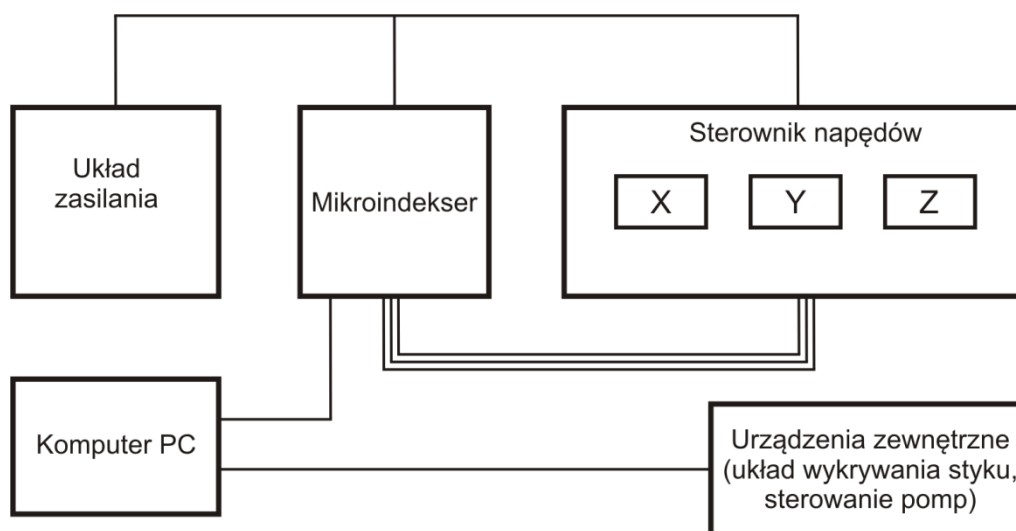
Małe wymiary oraz wymóg zachowania bardzo wysokiej precyzji przemieszczeń spowodowały konieczność zastosowania układów napędowych dających możliwość wykonywania ruchów z zachowaniem bardzo wysokiej dokładności, rzędu mikrometrów. Ruchy w osiach X i Y są wykonywane przez precyzyjny stół roboczy, a ruch w osi Z - przez głowicę roboczą. Przesuw w poszczególnych osiach jest realizowany przez zastosowanie dwufazowych silników krokowych, połączonych jednostronną przekładnią planetarną o przełożeniu 1:8. Układ ten pozwala na uzyskanie rozdzielczości ruchów $1,5625 \mu\text{m}$, którą można poprawić przez zastosowanie dodatkowego podziału kroku z wykorzystaniem odpowiedniego programu sterującego. Ponadto stolik ma możliwość regulacji nachylenia w zakresie $\pm 7,5^\circ$. Układ osi Z zbudowano na bazie stolika zamontowanego na granitowej kolumnie korpusu obrabiarki. Do niego przymocowane zostały końcówki układu obiegu elektrolitu oraz wrzeciono realizujące ruch obrotowy narzędzia.

Sterowanie ruchami roboczymi jest realizowane za pomocą programowalnego sterownika elektrodrażarek ZAP-BP, który pozwala na realizację następujących trybów pracy:

- sterowanie ręczne,
- pracę w trybie automatycznym,
- realizację funkcji pomocniczych (automatyczne centrowanie w otworze, podrywanie elektrody, drgania elektrody),
- współpracę z zewnętrznym programem CAD/CAM.

Zaprojektowano i wykonano również niezależny układ sterowania napędami w osiach X, Y i Z, którego głównym zadaniem jest kontrola pracy napędów w trakcie mikroobróbki elektrochemicznej. W tym celu wykorzystano podzespoły firmy Wobit, umożliwiające stworzenie kompletnego systemu sterowania. Do jego realizacji użyto wieloosiowego sterownika silników bipolarnych STC 102, który pozwalał na kontrolę trzech silników krokowych pracujących w trzech osiach.

Zadawania trajektorii ruchu realizowane jest z wykorzystaniem trzyosiowego mikroindeksera MI 389, który bezpośrednio steruje układem STC 102. Całość pracuje pod kontrolą komputera PC. System sterujący uzupełnia układ zasilania stałoprądowego, który zasila mikroindekser i sterownik napędów (rys. 40).



Rys. 40. Schemat systemu sterującego napędami w trzech osiach.

3.1.2 Oprogramowanie sterujące.

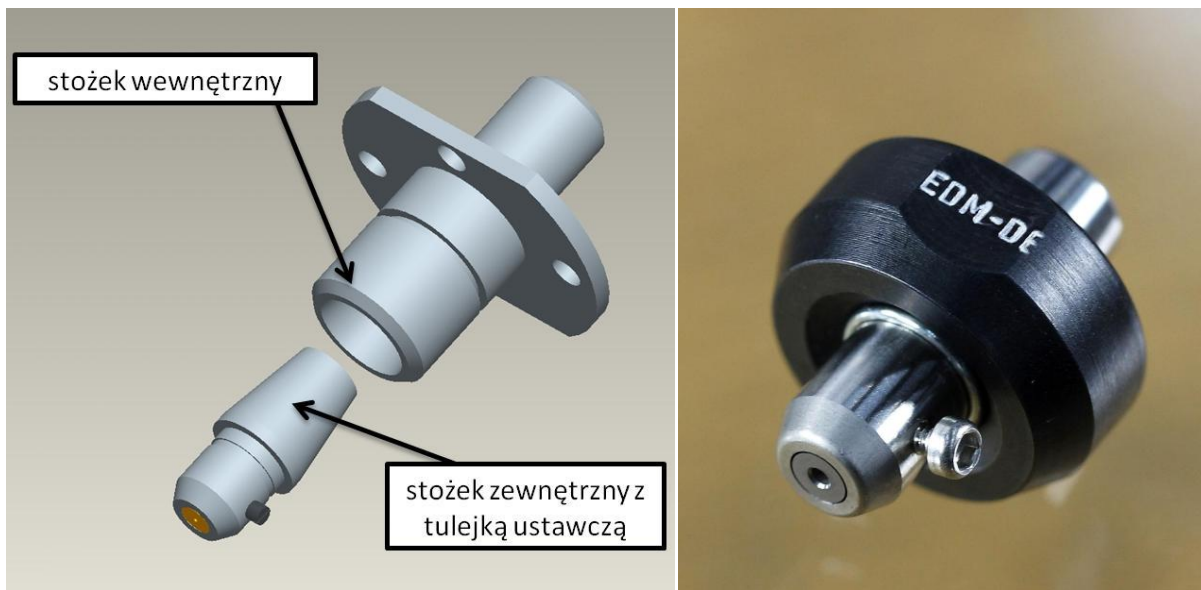
W ramach realizacji rozprawy doktorskiej opracowano i wykonano program do sterowania procesem obróbki elektrochemicznej. Pozwala on na zaprojektowanie trajektorii elektrody roboczej, a następnie wykonanie tak zaprojektowanego kształtu. Dzięki oprogramowaniu można sterować ruchem napędów we wszystkich trzech osiach, zarówno niezależnie, jak i zależnie. Program umożliwia ustawienie parametrów ruchu elektrody: prędkości posuwu, długość drogi, przyspieszenie. Dzięki niemu można wykonywać również ruchy ustawcze. Zastosowanie układu wykrywania styku i sprzęgnięcie go z programem sterującym pozwoliło, w łatwy i wygodny sposób, bardzo dokładnie ustawiać szczelinę międzyelektrodową na początku procesu obróbki, nie narażając przy tym elektrody na uszkodzenie.

Oprogramowanie automatycznie uruchamia generator impulsów równocześnie z ruchem napędów i wyłącza go w momencie, gdy elektroda skończy obróbkę. Dzięki temu można w łatwy sposób sterować pracą całego urządzenia. W trakcie procesu cały czas były monitorowane parametry pracy napędów (posuw).

Zastosowanie komputera PC pozwoliło na podłączenie i sterowanie innymi urządzeniami wchodzącymi w skład stanowiska, tj. pomp dozujących, układu wykrywania styku, układu załączania napięcia roboczego. Połączenie w logiczny system sygnałów sterujących z tych układów z systemem układem sterowania trajektorią pozwolił na zautomatyzowanie całego procesu obróbki oraz odpowiednią jego kontrolę.

3.1.3 Mocowanie elektrody roboczej.

Jednym z krytycznych elementów całego stanowiska jest system mocowania elektrody roboczej. Od tego czy spełnia on stawiane mu wymagania zależy końcowy wynik obróbki. System taki powinien zapewniać możliwość bezpiecznego przenoszenia elektrody pomiędzy stanowiskiem badawczym, a stanowiskiem do wytwarzania elektrod. Poniżej (rys. 41) zaprezentowano budowę uchwyty elektrody roboczej.



Rys. 41. Budowa i zdjęcie uchwytu elektrody roboczej.

Po analizie dostępnych na rynku rozwiązań, w stanowisku zastosowano uchwyt stosowany w obrabiarkach elektroerozyjnych firmy SARIX. Stanowisko zostało wyposażone w uchwyty elektrod o średnicach: 0,2 mm, 0,4 mm, 1 mm i 1,2 mm (rys. 42).



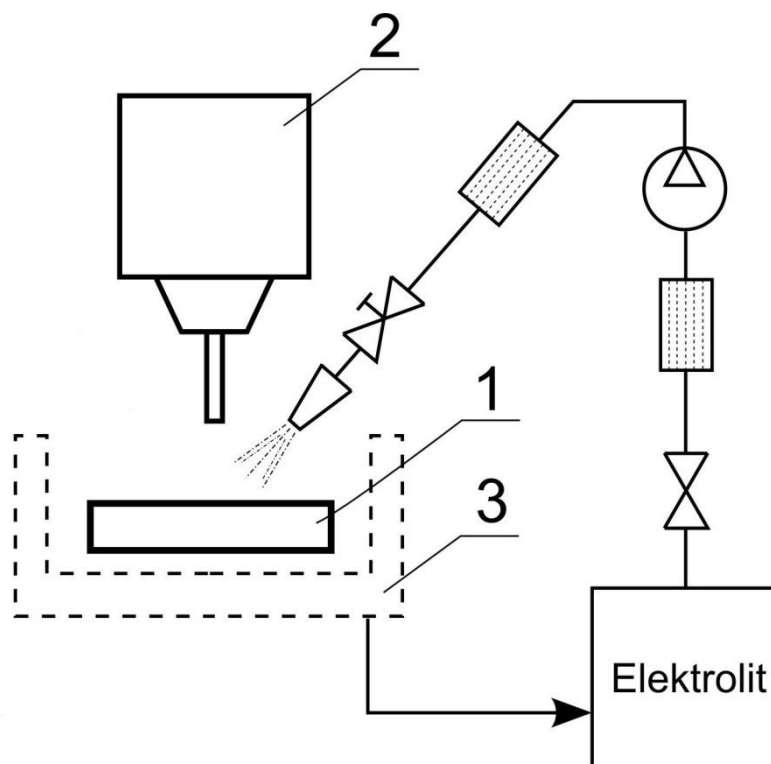
Rys. 42. Uchwyt z elektrodą zamontowany na stanowisku roboczym.

3.1.4 Układ obiegu cieczy roboczej.

Następnym istotnym elementem stanowiska badawczego jest układ obiegu elektrolitu (rys. 43). Zapewnia on dostarczenie elektrolitu do szczeliny międzyelektrodowej pod odpowiednim ciśnieniem i o odpowiedniej, stałej temperaturze. Jest to układ o obiegu zamkniętym, w którym elektrolit po obróbce jest filtrowany i ponownie wprowadzany do obiegu.

Układ został przystosowany do następujących rodzajów elektrolitów:

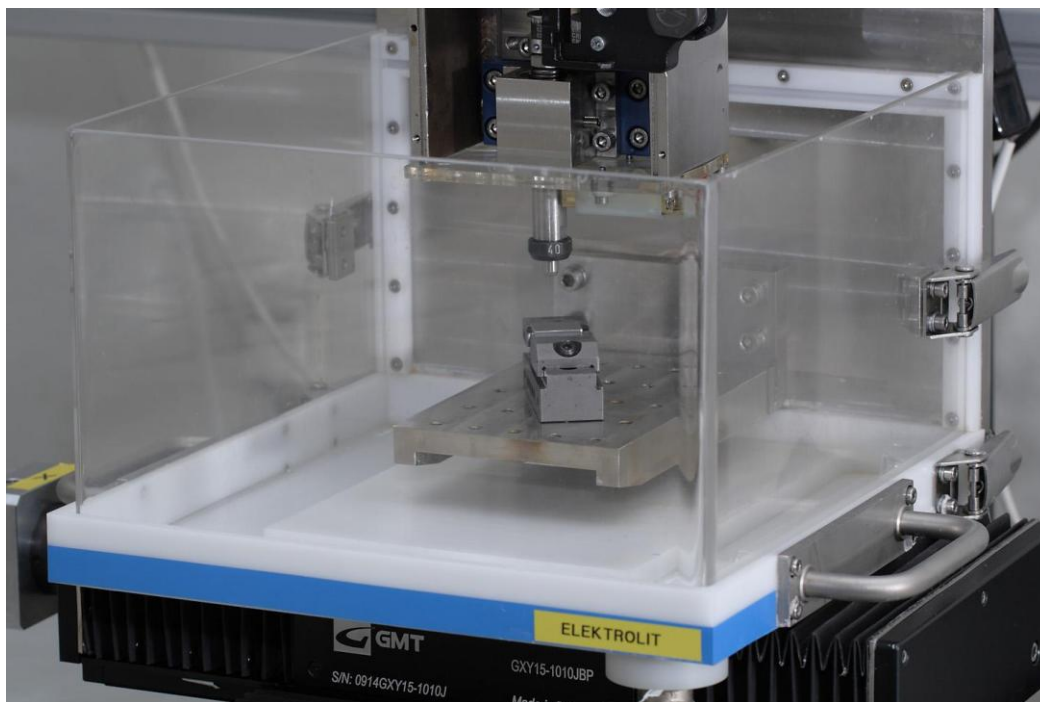
- wodny roztwór NaNO_3 , o stężeniu nie przekraczającym 20%,
- wodny roztwór NaCl , o stężeniu nie przekraczającym 20%,
- wodny roztwór kwasu HCl , o stężeniu nie przekraczającym 2%,
- wodny roztwór kwasu H_2SO_4 , o stężeniu nie przekraczającym 2%.



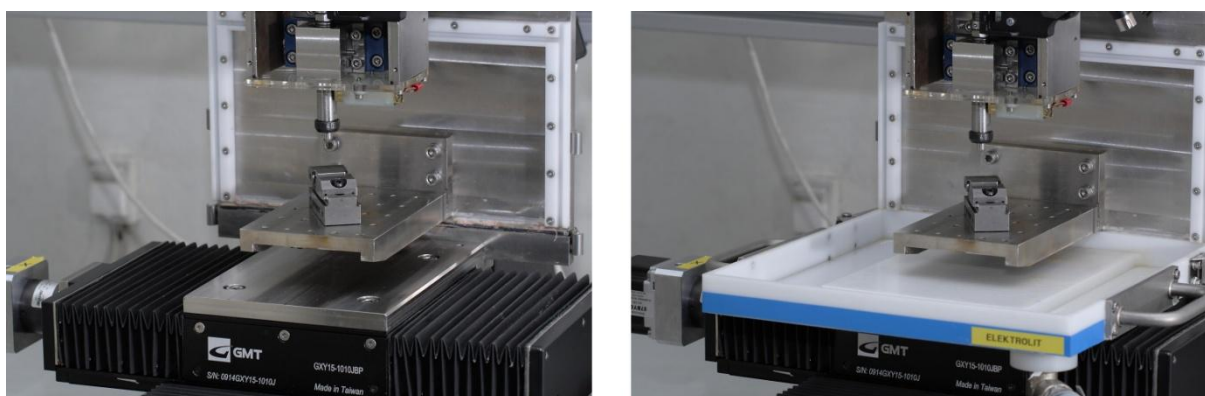
Rys. 43. Układ obiegu cieczy roboczej.

Parametry techniczne zespołu zasilającego elektrolitem:

- objętość zbiorników 10 dm^3 ,
- ciśnienie elektrolitu ok. 4,3 bar,
- wydatek ok. $8 \text{ dcm}^3/\text{min}$ w zamkniętym obiegu z filtrowaniem.



Rys. 44. Wanna spływowa wraz z osłoną.



Rys. 45. Sposób mocowania wanny spływowej.

Ciecz spływa grawitacyjnie ze zbiornika do pompy cyrkulacyjnej ze sprzężeniem magnetycznym, co pozwala na całkowite oddzielenie części „mokrej” pompy od jej części napędowej. Dzięki temu tego typu pompy można stosować do cieczy łatwopalnych lub silnie korodujących roztworów (elektrolit). Nastawianie wydatku elektrolitu dopływającego do strefy obróbki realizowane jest za pomocą zaworu umieszczonego przy dyszy wylotowej. Ciecz wypływająca dyszą do strefy obróbki spływa następnie do wanienki (rys. 44 i 45), a następnie grawitacyjnie do zbiornika.

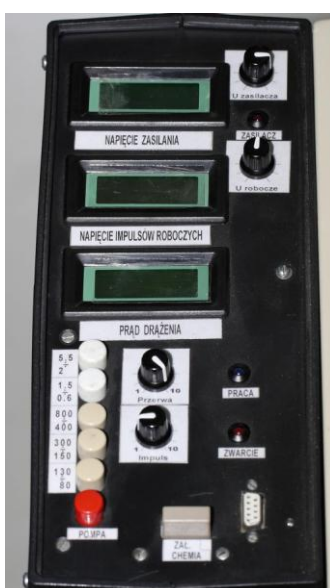
3.1.5 Zasilacz impulsowy.

Kluczowym elementem stanowiska badawczego do mikroobróbki ECM jest zasilacz impulsowy (generator krótkich impulsów napięciowych) [84]. Aby można było wykonywać obróbkę ECM w skali mikro konieczna jest bardzo duża poprawa lokalizacji procesu. Dokonuje się tego stosując obróbkę impulsową bardzo krótkimi impulsami, przy małej szczelinie międzyelektrodowej. Dlatego przełomem w tego typu obróbce było zastosowanie generatorów o czasach impulsów rzędu 10^{-9} s. Ich zastosowanie pozwoliło na bardzo dużą poprawę dokładności procesu mikroobróbki ECM.

Na potrzeby stanowiska badawczego został zaprojektowany i wykonany przez Zakład Automatyki Przemysłowej B.P. zasilacz impulsowy (rys. 46), którego parametry podano w tab. 3

Tab. 3. Parametry generatora impulsów nanosekundowych.

Zasilanie	230V~
Moc pobierana	max 70W
Napięcie robocze	6V - 30V
Czas impulsu	100ns - 1500ns
Czas przerwy	500ns - 1500ns
Natężenie prądu roboczego w impulsie	max 1A



Rys. 46. Pulpit sterowniczy generatora impulsów nanosekundowych do obróbki elektrochemicznej.

3.1.6 Urządzenia kontrolno – pomiarowe.

Stanowisko badawcze wyposażono w kilka urządzeń kontrolno – pomiarowych służących do monitorowania parametrów jego pracy, bez których poprawna realizacja i analiza wyników badań nie byłaby możliwa. Były to:

- oscyloskop cyfrowy Tektronix TDS3032C (pasmo przenoszenia: 200 MHz) wraz z sondą prądową TCP202 (pasmo przenoszenia: 50 MHz, dokładność $\pm 1\%$, minimalna czułość: 10mA/div, opóźnienie: 17 ns), na którym został oparty tor pomiarowy,
- waga precyzyjna Vibra AJH-620CE (pomiar masy próbek i elektrod),
- konduktometr C-105, do pomiaru przewodności właściwej i temperatury elektrolitu,
- kamera mikroskopowa Motic 2300 wraz z układem optycznym i oprogramowaniem Motic Images Plus, wykorzystywaną do pomiarów wykonywanych na stanowisku badawczym.

3.1.7 Układ obserwacyjny.

W skład układu obserwacyjnego wchodzi mikroskop stereoskopowy K – 401 z optyką typu CMO, z korekcją na nieskończoność oraz kamera cyfrowa Motic MC – 2300.

Głowica mikroskopu zamontowana została na statywie pozwalającym na wygodne przemieszczanie jej nad polem obserwacyjnym. Dzięki temu można go wykorzystywać zarówno do obserwacji wyników obróbki na próbkach, jak też oglądać próbki i elektrody robocze na stanowisku roboczym.

Dzięki zastosowanej optyce uzyskiwany obraz charakteryzuje się bardzo dobrą głębią ostrości, dzięki czemu w łatwy sposób można ocenić wyniki procesu obróbki.

Następnym elementem układu jest kamera cyfrowa wyposażona w matryce 3 MPix. Ponieważ mikroskop jest przystosowany do jej podłączenia i użycia, dlatego z wykorzystaniem odpowiedniego oprogramowania, w łatwy sposób można było zdigitalizować obraz z mikroskopu. Umożliwiło to wykonanie wstępnych, szacunkowych

pomiarów wielkości geometrycznych związanych z próbkami (po wcześniejszej kalibracji) oraz z elektrodami roboczymi. Najczęściej mierzonymi wielkościami były:

- szerokość wykonanego kształtu,
- średnica elektrody roboczej,
- długość wykonanego kształtu,
- średnica wykonanych otworów.

3.1.8 Przygotowanie elektrod.

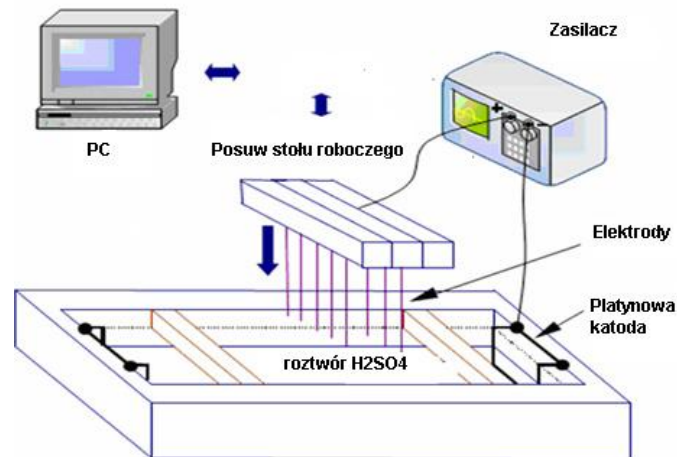
Proces mikroobróbki stawia bardzo wysokie wymagania wszystkim układom obrabiarki, jednak szczególnie wrażliwym i istotnym elementem są elektrody. Będąc narzędziem obrabiającym materiał, od jej kształtu, sposobu zamontowania oraz wymiarów zależy końcowy wynik całego procesu. Ze względu na specyfikę mikroobróbki ECM, przygotowanie oraz zamocowanie elektrod stanowi poważne wyzwanie. Ze względu na konieczność uzyskania jak najlepszej jakości powierzchni obrabianych, a także jak najdokładniejsze odtworzenie zadanego kształtu, elektroda robocza musi charakteryzować się następującymi cechami:

- płaskie, równoległe do powierzchni czoło (w przypadku elektrody uniwersalnej),
- małe wymiary (długość rzędu kilku mm, średnica rzędu setek mikrometrów),
- wysoka sztywność,
- prostoliniowość.

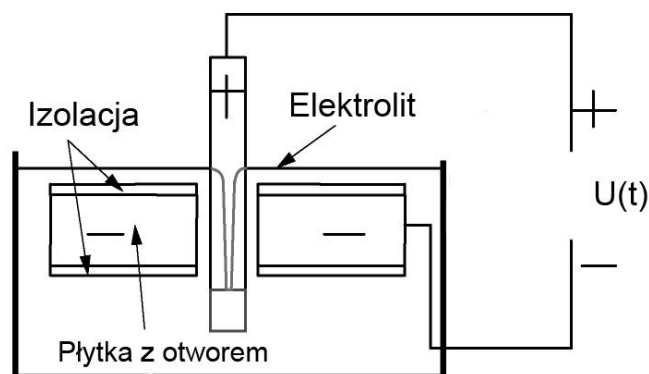
Takie wymagania powodują, że do wykonania elektrod stosuje się mikroobróbkę ECM.

Elektroda, której końcówka będąca właściwym narzędziem, jest narażona na uszkodzenie, powinna być wykonana w tym samym uchwycie mocującym, w którym będzie używana w trakcie mikroobróbki ECM.

Najpopularniejszym sposobem elektrochemicznego kształtowania elektrod walcowych jest trawienie elektrochemiczne polegające na powolnym wyciąganiu końcówki elektrody, będącej w tym przypadku anodą, z elektrolitu, w którym zanurzona jest druga elektroda (platynowa) (rys. 47). Odpowiednie sterowanie prędkością ruchu elektrody pozwala na uzyskanie średnicy nawet poniżej 5 μm [7, 18, 61].



Rys. 47. Schemat przedstawiający wykonywanie elektrod trawieniem elektrochemicznym [61].



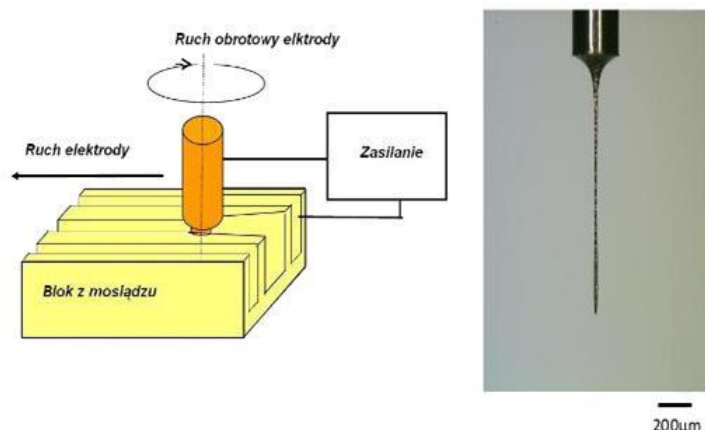
Rys. 48. Schemat elektrochemicznego kształtowania elektrody z zastosowaniem otworu w płytce [97].

Innym sposobem kształtowania elektrod, jest wykorzystanie otworu w podłączonej do ujemnego źródła prądu metalowej płytce (rys. 48) [97]. Również w tym przypadku zmniejszanie średnicy elektrody, a następnie obróbka są wykonywane w tym samym zamocowaniu. Następną metodą jest wprawianie w ruch obrotowy elektrody podczas trawienia [106].

Kolejną grupą metod kształtowania elektrod walcowych, są sposoby wykorzystujące obróbkę elektroerozyjną [51].

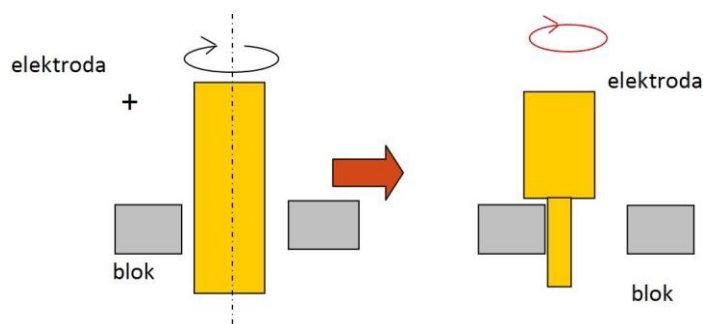
Poniżej (rys. 49) przedstawiono kształtowanie za pomocą bloku, polegające na posuwowym ruchu obracającej się elektrody wzdłuż szczeliny o znanej

szerokości, wykonanej w metalowym bloku. Średnica elektrody zależy od średnicy szczeliny i doboru parametrów obróbki.



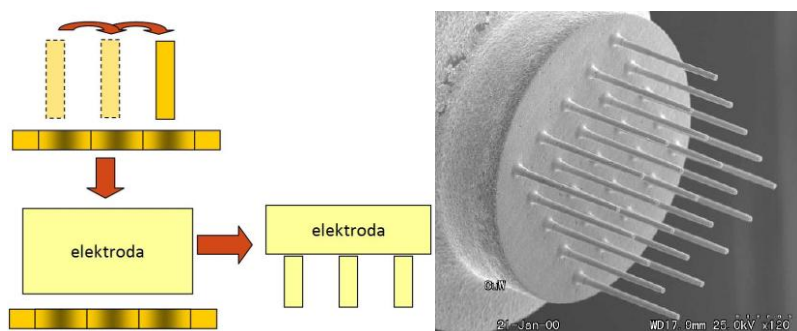
Rys.49. Schemat kształtowania elektrody roboczej z wykorzystaniem szczeliny w bloku metalu.

Odmianą tej metody jest kształtowanie, w którym elektroda wykonuje ruch obrotowy i planetarny (kształtowanie ruchem mimośrodowym) (rys. 50) [53].



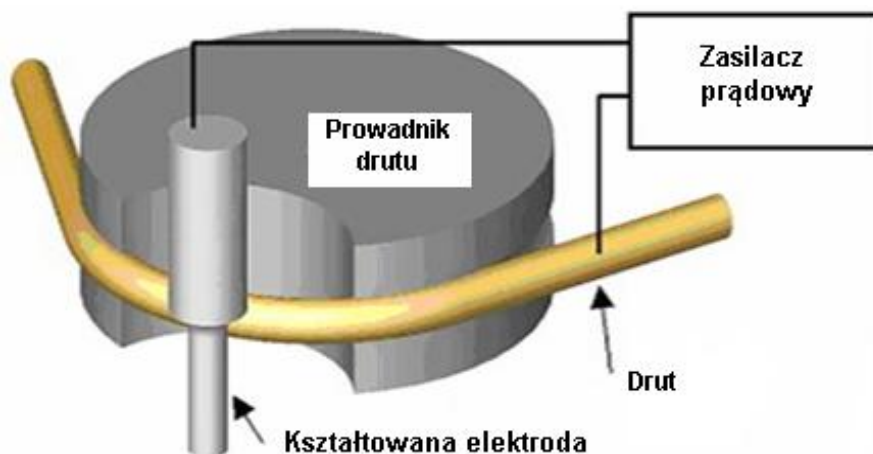
Rys. 50. Schemat kształtowania elektrody roboczej z wykorzystaniem ruchu obrotowego i planetarnego [53, 93].

Kolejna metoda polega na wydrążeniu w płytce matrycy otworów, które następnie służą do elektroerozyjnego kształtowania elektrod roboczych (rys. 51).



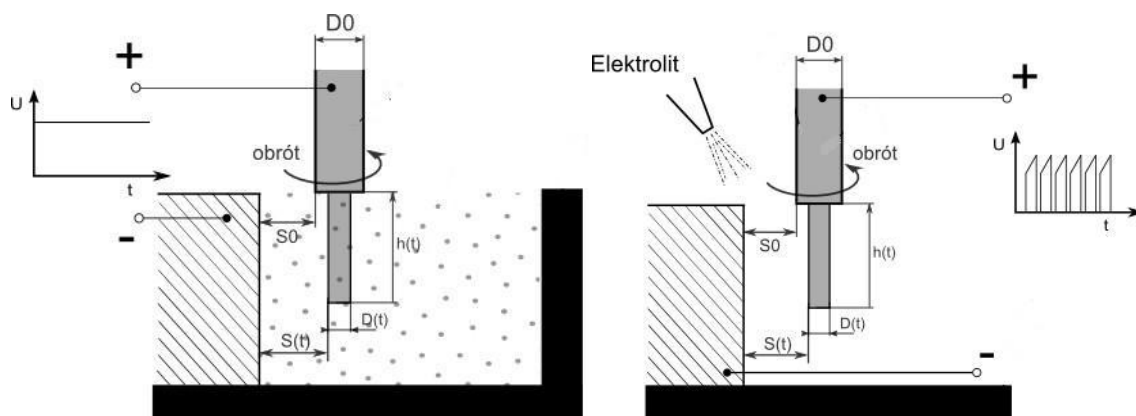
Rys. 51. Schemat kształtowania narzędzia do wykonywania matryc otworów [20].

Metodą, używaną m.in. w rozwiązaniach komercyjnych, jest drutowe szlifowanie elektroerozyjne (rys. 52). W jego trakcie wirująca elektroda robocza jest kształtowana za pomocą drutu przewijanego po specjalnym przewodniku. Ta metoda pozwala na uzyskanie wielu skomplikowanych kształtów elektrody [6, 50, 53, 54].



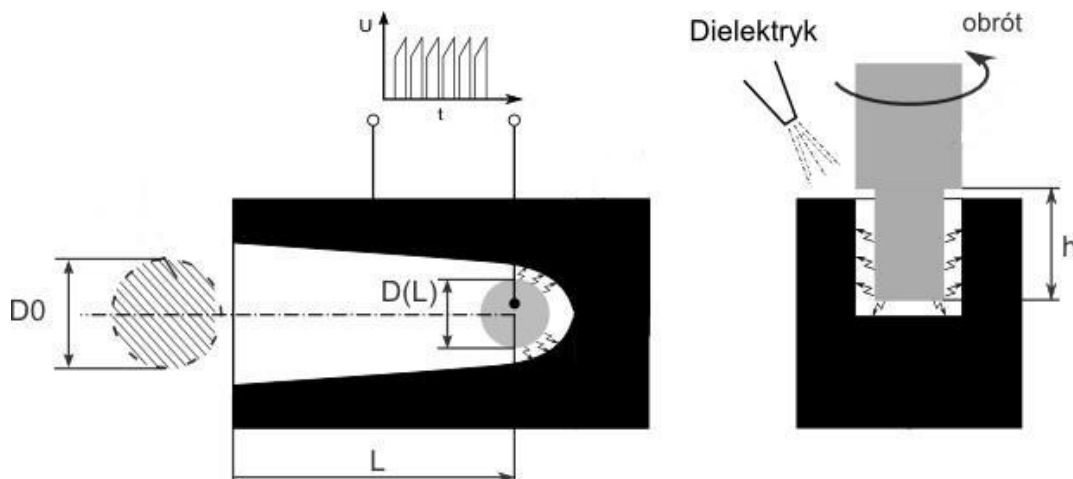
Rys. 52. Schemat kształtowania elektrody roboczej za pomocą drutowego szlifowania elektroerozyjnego [93].

Na stanowisku badawczym wykonywano elektrody robocze w procesie ECM, a także, po wymianie wanny i przełączeniu zasilacza, w procesie EDM. Za pomocą obróbki elektrochemicznej, elektrody były kształtowane z wykorzystaniem bloku metalu, zarówno w zanurzeniu, jak i z dostarczaniem elektrolitu za pomocą dyszy (rys. 53).

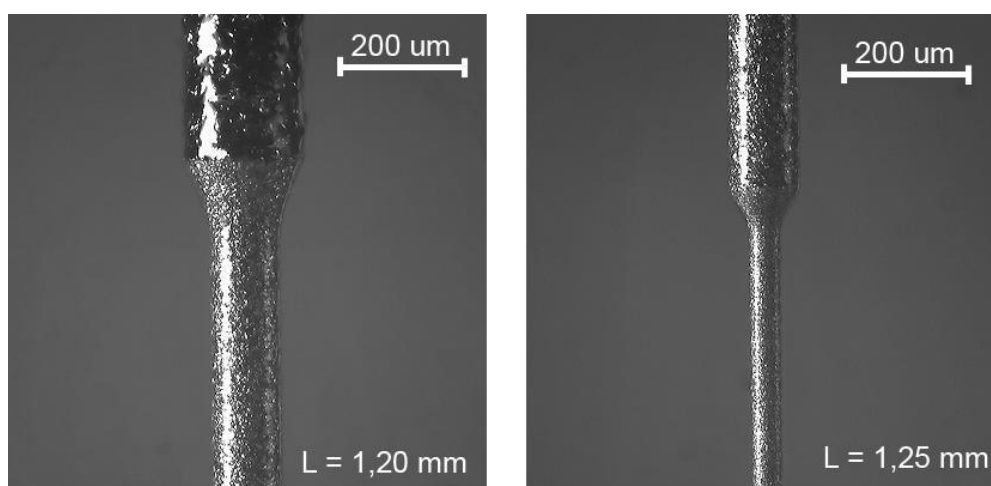


Rys. 53. Schemat elektrochemicznego kształtowania elektrody roboczej w zanurzeniu i z dostarczaniem elektrolitu dyszą [93].

Z wykorzystaniem obróbki elektroerozyjnej, elektrody były kształtowane w ten sposób, że elektroda była dosuwana do metalowego bloku. Wraz z jej zagłębianiem się następowało zmniejszanie średnicy elektrody (rys. 54).



Rys. 54. Schemat elektroerozyjnego kształtowania elektrody roboczej [93].



Rys. 55. Przykładowa elektroda wykonana na stanowisku badawczym.

Autor uczestniczył w projektowaniu stanowiska, doborze elementów handlowych, a także w montażu i uruchomieniu stanowiska. Zaprojektował i wykonał oprogramowanie do sterowania ruchami roboczymi elektrody. W ramach uruchomienia stanowiska wykonał badania wstępne oraz brał udział w projektowaniu i wytwarzaniu elektrod na stanowisku badawczym (rys. 55).

4 BADANIA DOŚWIADCZALNE – MATEMATYCZNY MODEL STATYSTYCZNY

4.1 Metodyka badań i plan eksperymentu.

Głównym celem badań doświadczalnych było wyznaczenie statystycznych zależności funkcyjnych pomiędzy parametrami procesu mikroobróbki ECM, a wskaźnikami technologicznymi (matematyczny model statystyczny). Pozwoliło to na kontrolowanie procesu mikroobróbki oraz zrozumienie i interpretację wyników badań. W większości przypadków matematyczne modele opisujące zjawiska i obiekty fizyczne zawierają w sobie czynniki o charakterze losowym. Powoduje to sytuację, że zarówno wynik pomiaru jak i funkcja obiektu badań mają charakter statystyczny. Proces mikroobróbki ECM jest procesem losowym, dlatego do jego badania zastosowano metody statystyczne.

Ponieważ z dotychczasowych prac, modeli matematycznych i badań doświadczalnych wynika, że związki pomiędzy czynnikami badanymi i wynikowymi mają charakter nieliniowy, dlatego też za funkcję obiektu badań przyjęto wielomian drugiego stopnia:

$$y_i = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1, j=1}^m b_{ij} x_i x_j$$

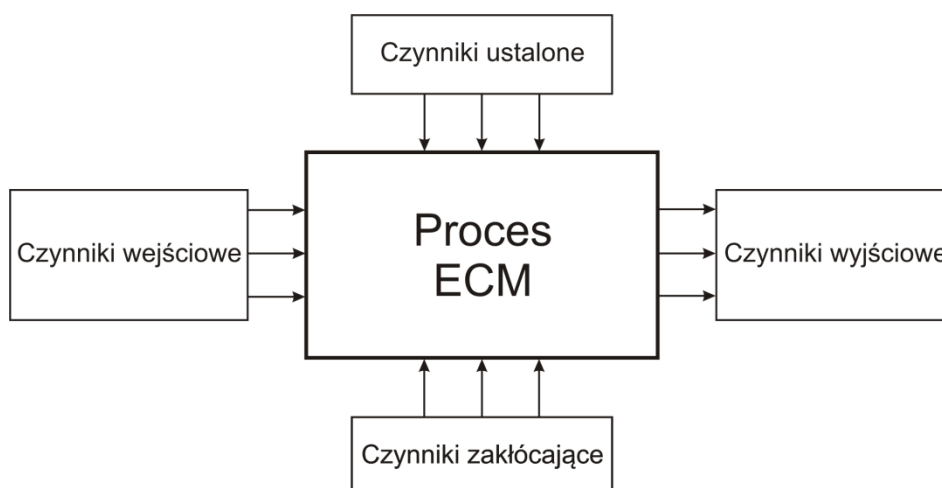
gdzie:

- y_i reprezentuje i – ty czynnik wynikowy,
- b_0, b_i, b_{ij} reprezentują współczynniki wielomianu,
- x_i, x_j są wartościami czynników badanych.

Plan eksperymentu zbudowano na podstawie centralnego, rotatabilnego kompozycyjnego planu drugiego rzędu, z jądrem planu w postaci doświadczenia czynnikowego w oparciu o metodykę planowania eksperymentu. Ten rodzaj planu zapewnia efektywną realizację badań, a sposób obliczania współczynników wielomianu aproksymującego zapewnia niezależność ich ocen, a niedokładności wielomianu nie są uzależnione od wartości wielkości wejściowych [28, 63].

Na podstawie danych literaturowych przyjęto, że rozkład czynników wyjściowych jest normalny.

W ramach analizy wyników badań wyznaczono współczynniki regresji, dokonano oceny ich istotności, a także wykonano ocenę adekwatności funkcji obiektu badań. Do obliczeń wykorzystano pakietu Matlab.



Rys. 56. Schemat blokowy procesu obróbki elektrochemicznej.

Do badań zastosowano czteroczynnikowy plan eksperymentu z ramieniem gwiazdowym $\alpha=2$ (rys. 56).

Badania doświadczalne przeprowadzono:

- na stanowisku badawczym do impulsowej obróbki ECM,
- z zastosowaniem elektrolitu NaNO_3 ,
- na próbkach wykonanych ze stali 0H18N9.

Badanymi czynnikami były:

- napięcie międzyelektrodowe $U = 10 - 30 \text{ V}$,
- prędkość przesuwu elektrody $V_f = 375 - 2250 \text{ } \mu\text{m}/\text{min}$,
- czas impulsu $t_i = 80 - 1000 \text{ ns}$,
- grubość szczeliny początkowej $S_0 = 10 - 50 \text{ } \mu\text{m}$.

Wielkościami wynikowymi były:

- chropowatość powierzchni Ra [μm],
- grubość usuniętego naddatku a [μm],
- objętość usuniętego naddatku V [mm^3],
- gęstość prądu i [A/mm^2].
- obrabialność ηk_v [mm^3/As].

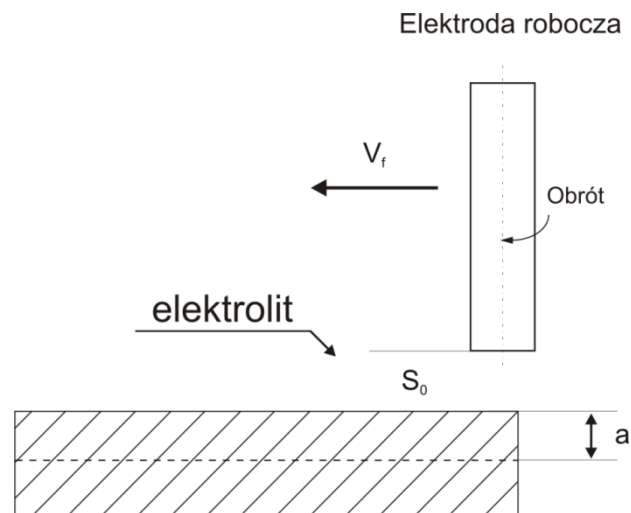
Czynniki stałe:

- rodzaj elektrolitu NaNO_3 o stężeniu $C_e = 1,5 \%$,
- czas przerwy między impulsami $t_{off} = 1 \text{ } \mu\text{s}$,
- temperatura $T_e = 25^\circ \text{ C}$,

- kształt i wymiar elektrod – elektroda walcowa, średnica 200 μ m,
- materiał próbek,
- przewodność właściwa elektrolitu $\kappa = 0,00136 \text{ mS/mm}$.

Czynniki zakłócające:

- niestabilność właściwości elektrolitu,
- niestabilność w czasie parametrów impulsu roboczego (amplituda i czas).



Rys. 57. Schemat realizacji badań doświadczalnych: pojedyncze przejście elektrody wzdłuż całej szerokości próbki. V_f – prędkość posuwu, S_0 – grubość szczeliny początkowej, a - grubość usuniętego naddatku.

Prędkość posuwu była wartością nastawianą, mierzoną przy pomocy układów stanowiących integralną część obrabiarki. Napięcie międzyelektrodowe, prąd, czas impulsu i czas przerwy były mierzone za pomocą oscyloskopu Tektronix TDS3032C. Do pomiaru napięcia wykorzystano sondę napięciową będącą integralną częścią oscyloskopu, a do pomiaru prądu sondę prądową TCP202 firmy Tektronix.

Grubość szczeliny początkowej S_0 była mierzona i ustalana na początku obróbki przez wewnętrzne układy zasilacza stanowiska badawczego.

Na rys. 57. przedstawiono schemat realizacji badań doświadczalnych.

Wykonano dwie serie badań. W pierwszej zastosowano elektrodę Cu, w drugiej elektrodę W.

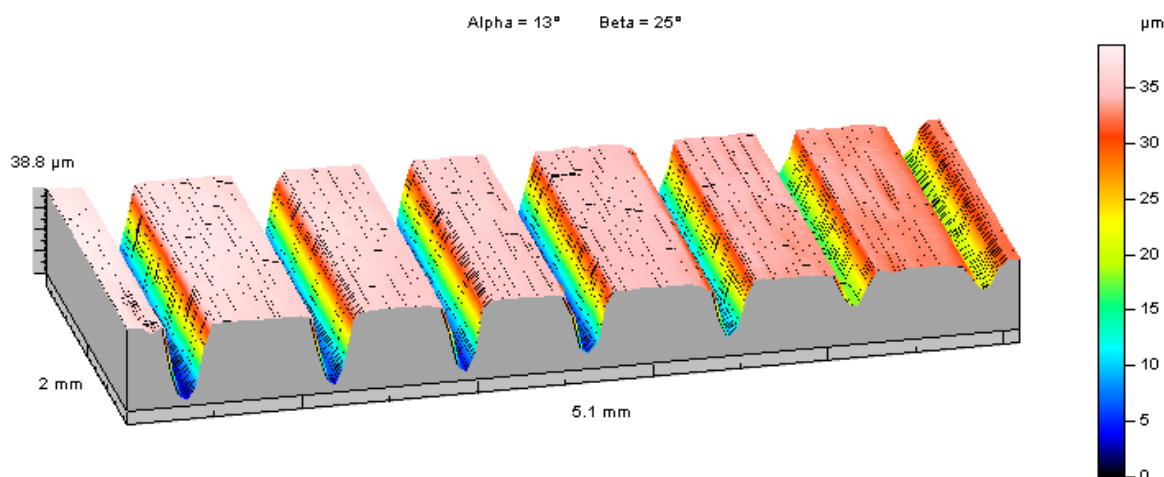
4.2 Metody i technika pomiarów.

Pomiary wielkości geometrycznych powierzchni próbek po obróbce zostały wykonane w Zakładzie Obróbek Wykańczających i Erozyjnych Wydziału Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej, za pomocą laboratoryjnego systemu do pomiaru chropowatości, falistości i kształtu Form Talysurf Series 2 firmy Taylor Hobson. Urządzenie to pozwala na wykonanie kompleksowych pomiarów w zakresie morfologii struktury geometrycznej warstwy wierzchniej.

Dane techniczne urządzenia:

- zakres pomiarowy : 50, 120, 200 mm,
- odcinki pomiarowe: 1, 2 mm,
- prędkości pomiarowe: 0,5, 1 mm/s,
- ostrze odwzorowujące: diament,
- kąt wierzchołkowy stożka 90° ,
- promień wierzchołka: $2\ \mu\text{m}$.

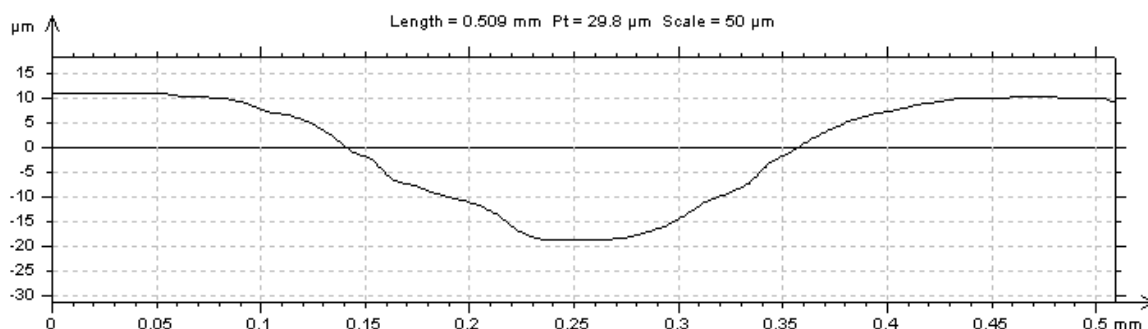
Za pomocą urządzenia Form Talysurf Series 2 wykonano pomiar wielkości geometrycznych powierzchni próbek na długości 2 mm. Tak uzyskane dane poddano następnie obróbce za pomocą specjalistycznego oprogramowania do analizy danych struktury powierzchni.



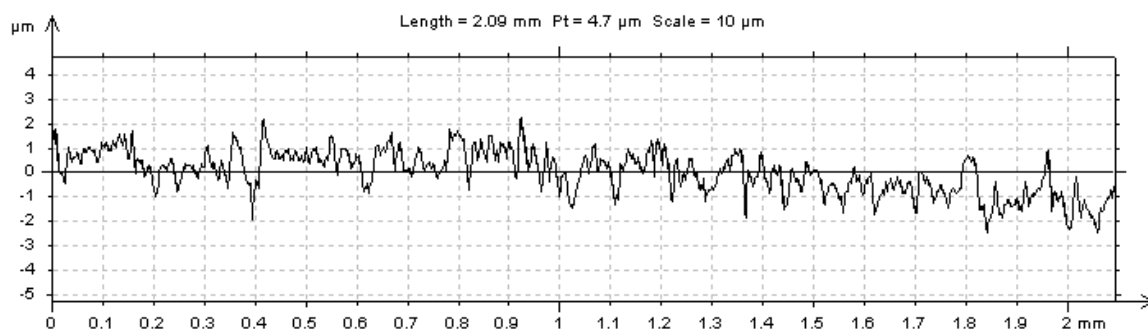
Rys. 58. Trójwymiarowy obraz powierzchni próbki.

Na podstawie obrazów stereometrycznych powierzchni określono głębokości, objętości oraz chropowatości uzyskanych struktur. Na rys. 58 przedstawiono przykładowy zarys poprzeczny uzyskany w wyniku pomiaru badanej próbki.

Rys. 59 i 60 przedstawiają odpowiednio profil chropowatości i profil wzdłużny struktury wykonanej w trakcie badań.



Rys. 59. Przykładowy zarys poprzeczny.



Rys. 60. Przykładowy profil chropowatości (wzdłużny).

Podczas badań dla każdego przejścia elektrody były zapisywane przebiegi prądowe (rys. 61). Znając amplitudę impulsu prądowego i jego czas obliczono, za pomocą pakietu Origin, ładunek elektryczny. Mając tak obliczony ładunek, znając czas obróbki, a także znając objętość materiału usuniętą w danym czasie obliczono obrabialność η_{kv} . Czyli:

$$q = \int_0^{t_i} i dt$$

$$Q = \sum_{j=0}^{j=k} q_i$$

Gdzie Q – sumaryczny ładunek dla k impulsów w czasie obróbki t .

$$k = \frac{t}{t_i + t_p}$$

t – czas obróbki,

t_i – czas impulsu,

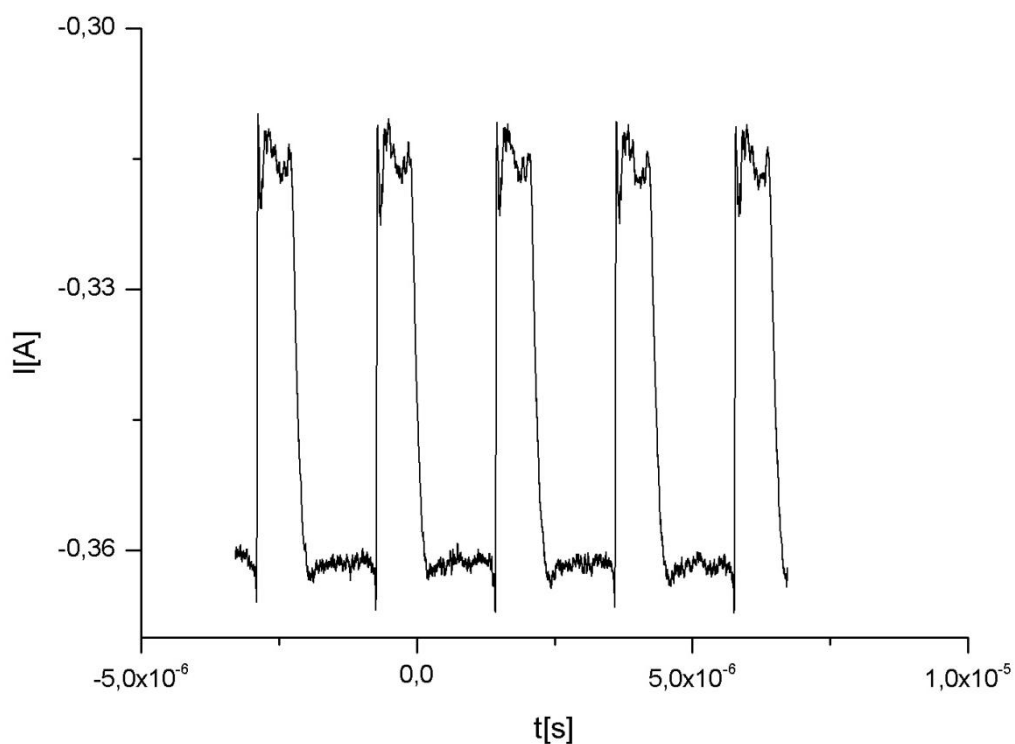
t_p – czas przerwy,

stąd

$$\eta k_v = \frac{Q}{V}$$

gdzie

V – objętość usuniętego materiału w czasie t .



Rys. 61. Przykładowy przebieg prądowy $I(t)$.

W ten sposób zmierzony współczynnik ηk_v jest obarczony błędem związanym głównie z pomiarem prądu. Ze względów technicznych (czas zapisu) liczba zarejestrowanych impulsów dla każdej próby była ograniczona i nie przekraczała 30 impulsów.

4.3 Analiza wyników badań.

Podczas badań doświadczalnych sprawdzano wpływ następujących parametrów impulsowej obróbki elektrochemicznej na wielkości geometryczne wykonanych struktur:

- prędkość przesuwu elektrody roboczej V_f ,
- napięcia impulsu roboczego U ,
- czasu impulsu t_i ,
- grubości szczeliny początkowej S_0 .

Analizę statystyczną przeprowadzono przy założeniu, że wielkości wynikowe podlegają rozkładowi normalnemu.

W wyniku statystycznej analizy wyników badań otrzymano regresyjne modele badanych zależności. Ocenę istotności poszczególnych współczynników wielomianu wykonano za pomocą testu t – Studenta.

Dla poziomu ufności $\alpha=0,05$ wartość krytyczna $I^* = 2,228139$.

W przypadku, gdy wartość statystyki t – Studenta dla danego współczynnika wielomianu spełniała nierówność:

$$I \leq I^*$$

hipoteza o istotnym wpływie danego współczynnika wielomianu była weryfikowana pozytywnie.

Następnie sprawdzono adekwatność modelu za pomocą testu F - Snedeckora. Dla poziomu ufności $\alpha=0,05$ wartość krytyczna $F^*=4,059963$.

Prędkość ER w kierunku materiału – $V_n = 0$ [mm/s].

1. Ze wzrostem napięcia międzyelektrodowego U rośnie gęstość prądu, prędkość roztwarzania, grubość szczeliny międzyelektrodowej, a tym samym grubość usuniętego naddatku.
2. Ze wzrostem szczeliny początkowej S_0 maleje gęstość prądu, prędkość roztwarzania, grubość szczeliny międzyelektrodowej, a tym samym grubość usuniętego naddatku.
3. Ze wzrostem prędkości posuwu elektrody V_f maleje czas jej przesuwu nad próbką t_c , zatem maleje liczba impulsów t_i :

$$n = \frac{t_c}{t_i}$$

czyli należy spodziewać się zmniejszenia ilości usuniętego materiału, a tym samym grubości szczeliny i grubości usuniętego naddatku. W tym przypadku gęstość prądu powinna wzrosnąć, ponieważ proces jest realizowany przy mniejszej grubości szczeliny.

4. Wzrost czasu impulsu t_i przy stałej prędkości posuwu powoduje zmniejszenie liczby impulsów:

$$n = \frac{t_c}{t_i}$$

$t_p = \text{const}$

Całkowity czas obróbki t wynosi $t = n \cdot t_i$. Jeżeli t wzrośnie, to wzrośnie grubość szczeliny S i grubość usuniętego naddatku a , równocześnie gęstość prądu powinna zmaleć.

Jeżeli t_i maleje, wtedy rośnie liczba impulsów a całkowity czas obróbki t maleje.

5. Z badań makro wynika, że ze wzrostem gęstości prądu maleje chropowatość powierzchni. Ra zależy też od polaryzacji E (grubości warstwy dyfuzyjnej δ). Ze wzrostem S_0 rośnie E i δ , czyli Ra powinno rosnać.

Wyniki dla elektrody Cu.

Model regresyjny opisujący grubość usuniętego naddatku a :

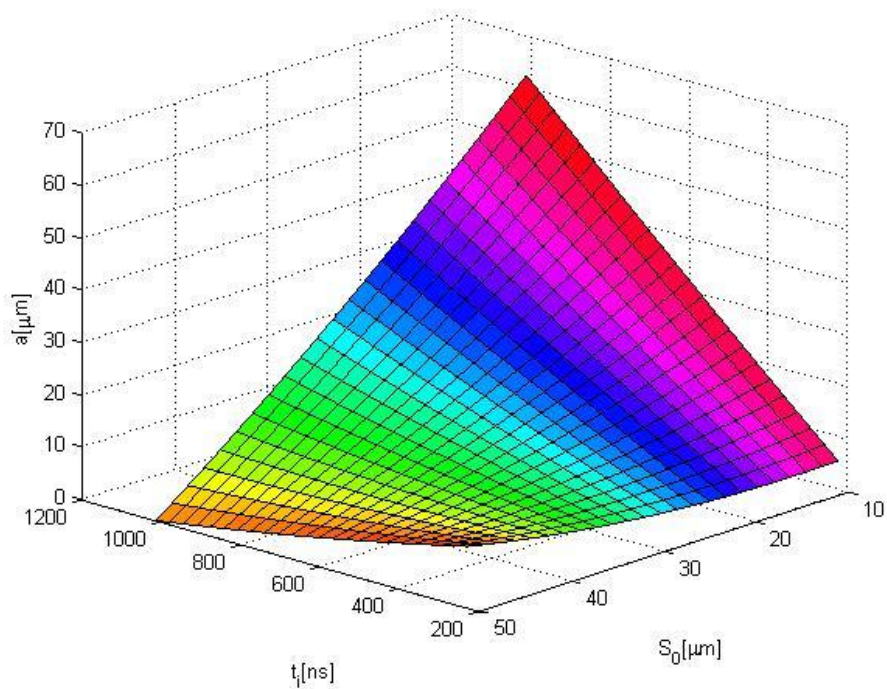
$$a = 51,11 - 0,016 \cdot V_f - 0,383 \cdot U + 0,034 \cdot t_i - 1,902 \cdot S_0 + 7,04 \cdot 10^{-4} \cdot V_f \cdot U - 1,16 \cdot 10^{-5} \cdot V_f \cdot t_i + 8,36 \cdot 10^{-4} \cdot V_f \cdot S_0 - 3,39 \cdot 10^{-5} \cdot U \cdot t_i - 1,7 \cdot 10^{-2} \cdot U \cdot S_0 - 1,46 \cdot 10^{-3} \cdot t_i \cdot S_0 - 7,14 \cdot 10^{-6} \cdot V_f^2 + 0,025 \cdot U^2 + 3,83 \cdot 10^{-5} \cdot t_i^2 + 0,017 \cdot S_0^2$$

W kategoriach statystycznych wszystkie współczynniki wielomianu są istotne.

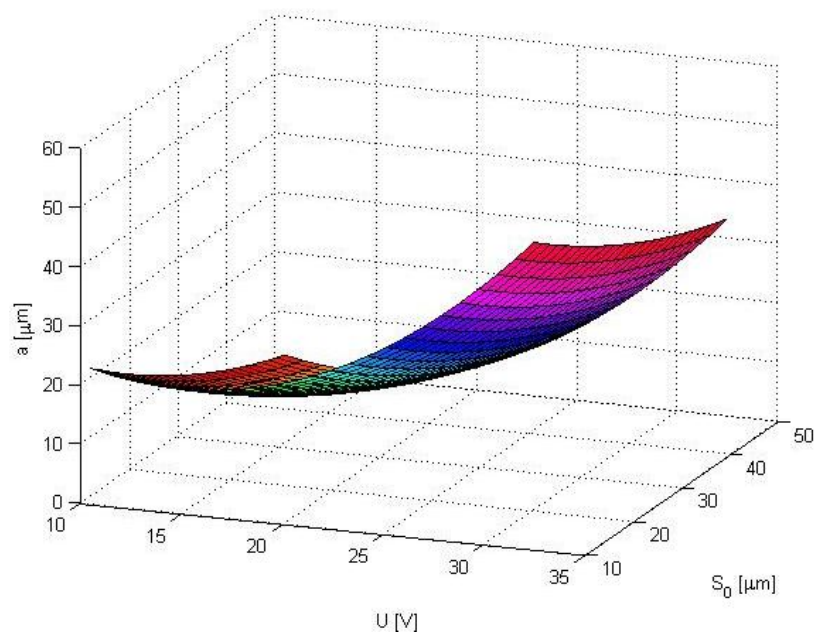
Wartość statystyki $F = 2,37$, $F_k = 4,059963$

$F < F_k$ - a zatem funkcja jest adekwatna.

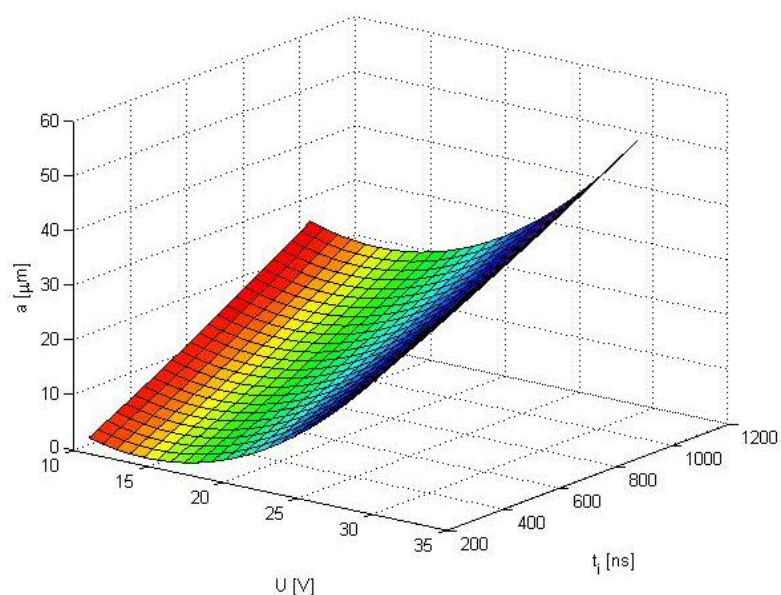
Poniżej przedstawiono wykresy zależności grubości usuniętego naddatku od poszczególnych parametrów procesu (rys. 62 – 65).



Rys. 62. Zależność usuniętego nadkładu a , w pojedynczym przejściu elektrody, od grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 i czasu impulsu t_i ; elektroda Cu, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $U = 20 \text{ V}$.

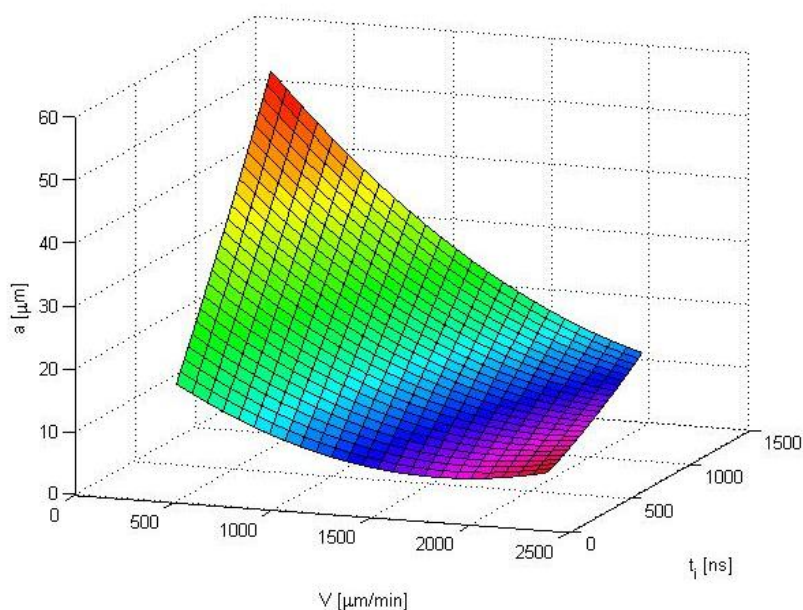


Rys. 63. Zależność usuniętego nadkładu a , w pojedynczym przejściu elektrody, od napięcia międzyelektrodowego U i grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 ; elektroda Cu, $t_i = 550 \text{ ns}$, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$.



Rys. 64. Zależność usuniętego nadkładu a , w pojedynczym przejściu elektrody, od napięcia międzyelektrodowego U i długości czasu impulsu t_i ; elektroda Cu.

$$V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}, S_0 = 30 \mu\text{m}.$$



Rys. 65. Zależność usuniętego nadkładu a , w pojedynczym przejściu elektrody, od prędkości posuwu elektrody V i długości czasu impulsu t_i ; elektroda Cu, $U = 20 \text{ V}$, $S_0 = 30 \mu\text{m}$.

Analiza statystyczna pokazała, że wszystkie badane czynniki mają wpływ na grubość usuniętego nadkładu:

- Grubość usuniętego naddatku a rośnie wraz ze wzrostem długości impulsu t_i , jednocześnie malejąc wraz ze wzrostem grubości szczeliny międzyelektrodowej, czego nie jest w stanie skompensować długość impulsu roboczego. Zależność ta pokazuje, jak duży wpływ na proces ma grubość szczeliny początkowej, przy ustalonym napięciu roboczym i prędkości posuwu elektrody.
- W przypadku zależności grubości usuniętego naddatku a od napięcia międzyelektrodowego U i grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 , można zauważyć, że rośnie ona wraz ze wzrostem napięcia. Zwiększanie grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 jest kompensowane rosnącym napięciem, nie powodując gwałtownego spadku grubości usuwanego materiału.
- W przypadku zależności od napięcia międzyelektrodowego U i grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 , można zauważyć, że a rośnie wraz ze wzrostem napięcia. Zwiększanie grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 jest kompensowane rosnącym napięciem, nie powodując gwałtownego spadku grubości usuwanego materiału.
- Wraz ze wzrostem napięcia międzyelektrodowego U i długości czasu impulsu t_i rośnie grubość usuniętego naddatku przy ustalonych wartościach grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 i prędkości posuwu V_f , co świadczy o dużym wpływie tych parametrów na proces.
- Wzrost prędkości posuwu elektrody V_f powoduje zmniejszenie grubości usuniętego naddatku. Im dłuższy impuls, tym grubość usuniętego naddatku większa.

Model dla usuniętej objętości materiału próbki V :

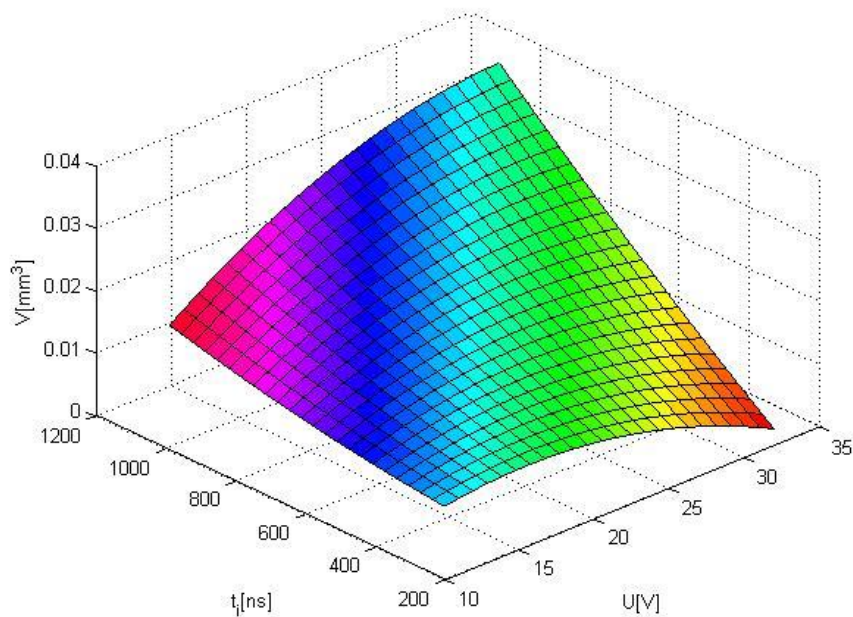
$$V = 0,107 + 3,02 \cdot 10^{-5} \cdot U + 1,65 \cdot 10^{-3} \cdot t_i - 6,1 \cdot 10^{-4} \cdot S_0 - 1,08 \cdot 10^{-8} \cdot V_f \cdot U - 1,3 \cdot 10^{-7} \cdot V_f \cdot t_i + 2,63 \cdot 10^{-7} \cdot V_f \cdot S_0 + 1,72 \cdot 10^{-6} \cdot U \cdot t_i - 1,17 \cdot 10^{-6} \cdot U \cdot S_0 - 2,35 \cdot 10^{-5} \cdot t_i \cdot S_0 + 6,52 \cdot 10^{-9} \cdot U^2 - 3,78 \cdot 10^{-5} \cdot t_i^2 + 1,72 \cdot 10^{-5} \cdot S_0^2$$

W kategoriach statystycznych za nieistotny współczynnik został uznany wyraz b_1 i b_{12} .

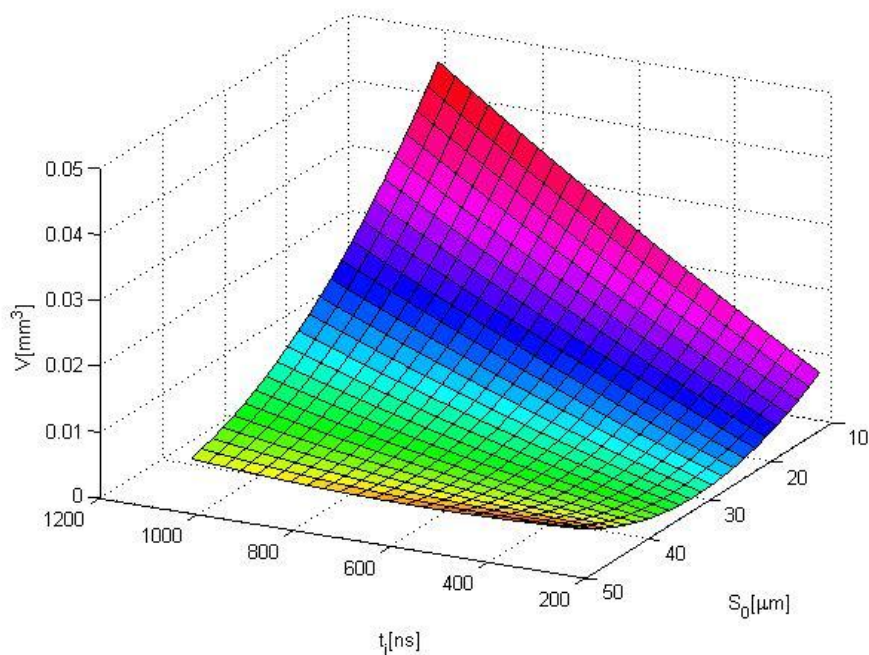
Wartość statystyki $F = 2,44$, $F_k = 4,059963$

$$F < F_k$$

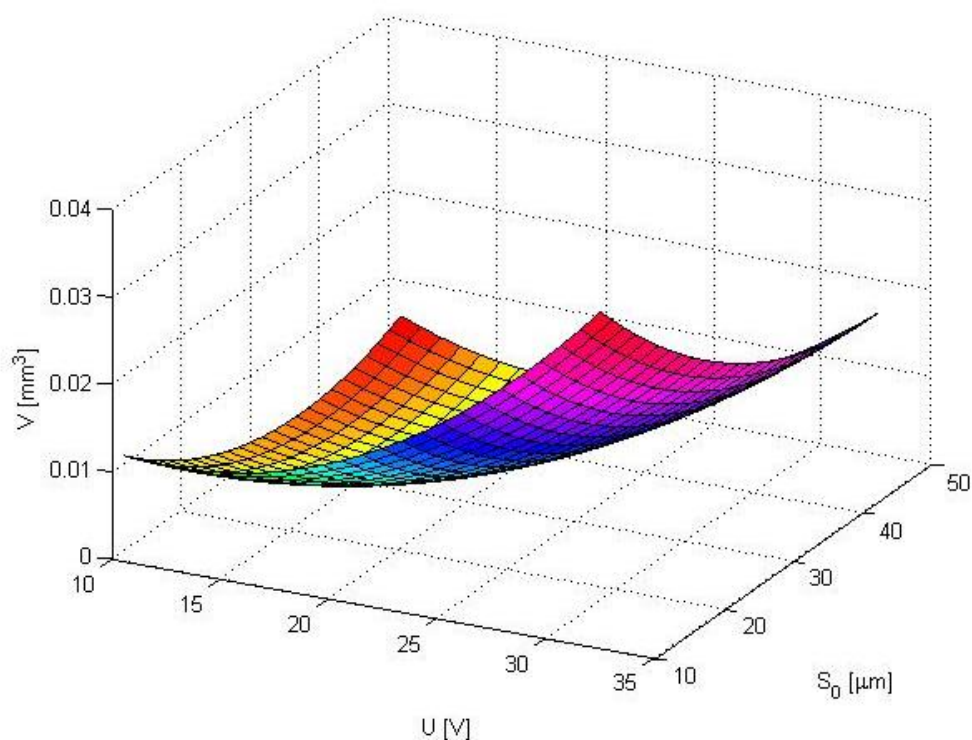
a zatem funkcja jest adekwatna.



Rys. 66. Zależność objętości usuniętego naddatku V , w pojedynczym przejściu elektrody, od napięcia międzyelektrodowego U i czasu impulsu t_i ; elektroda Cu, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $S_0 = 30 \mu\text{m}$.



Rys. 67. Zależność objętości usuniętego naddatku V , w pojedynczym przejściu elektrody, od szczeliny międzyelektrodowej S_0 i czasu impulsu t_i ; elektroda Cu, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $U = 20 \text{ V}$.



Rys. 68. Zależność objętości usuniętego naddatku V , w pojedynczym przejściu elektrody, od grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 i napięcia międzyelektrodowego U ; elektroda Cu, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $t_i = 550 \text{ ns}$.

W przypadku objętości usuniętego naddatku zależności od poszczególnych parametrów mają podobny charakter jak w przypadku grubości usuniętego naddatku (rys. 66 - 68). Dla przypadku objętości usuniętego materiału prędkość posuwu okazała się czynnikiem nieistotnym.

- Z zależności objętości usuniętego naddatku V od napięcia międzyelektrodowego U i czasu impulsu t_i , widać, że wraz ze wzrostem napięcia i wzrostem długości impulsu roboczego rośnie objętość usuniętego naddatku.
- Wraz ze wzrostem długości impulsu roboczego rośnie objętość; wzrost grubości szczeliny powoduje zmniejszenie objętości usuniętego naddatku.
- Analizując zależność objętości usuniętego naddatku V od grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 i napięcia międzyelektrodowego U , można zauważyć, że rośnie ona wraz ze wzrostem napięcia. Zwiększenie grubości szczeliny powoduje zmniejszenie objętości usuniętego naddatku.

Model dla gęstości prądu roztwarzania i_a :

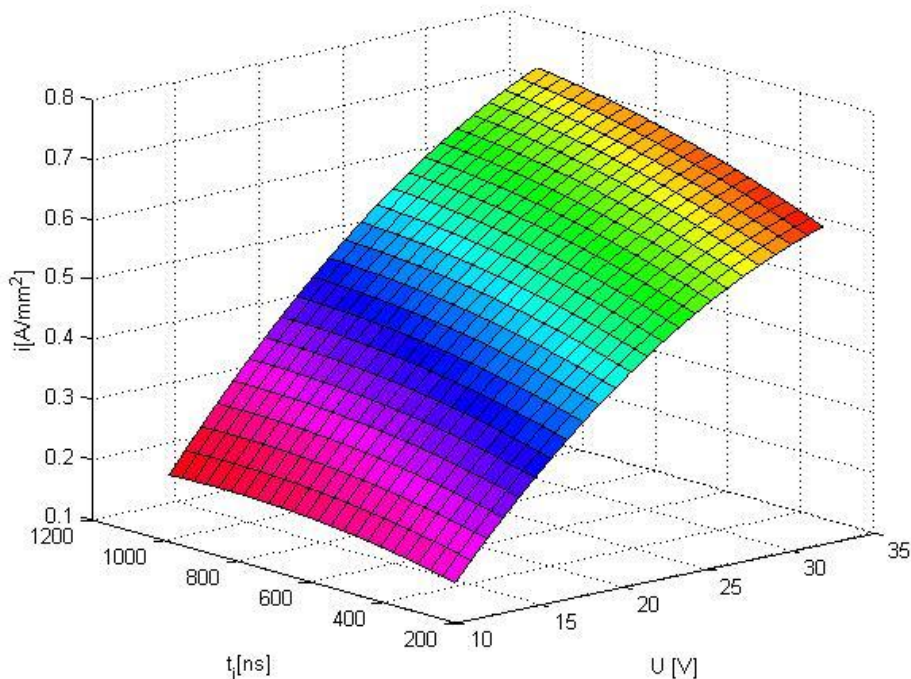
$$i_a = 1,61 - 2,16 \cdot 10^{-4} \cdot V_f + 3,58 \cdot 10^{-2} \cdot U + 9,26 \cdot 10^{-4} \cdot t_i - 0,11 \cdot S_0 - 3,85 \cdot 10^{-6} \cdot V_f \cdot U - 1,79 \cdot 10^{-7} \cdot V_f \cdot t_i + 1,35 \cdot 10^{-5} \cdot V_f \cdot S_0 + 4,98 \cdot 10^{-6} \cdot U \cdot t_i + 8,15 \cdot 10^{-5} \cdot U \cdot S_0 - 1,73 \cdot 10^{-5} \cdot t_i \cdot S_0 - 6,22 \cdot 10^{-8} \cdot V_f^2 - 5,06 \cdot 10^{-4} \cdot U^2 - 1,09 \cdot 10^{-7} \cdot t_i^2$$

W kategoriach statystycznych za nieistotny współczynnik został uznany wyraz b_{15} .

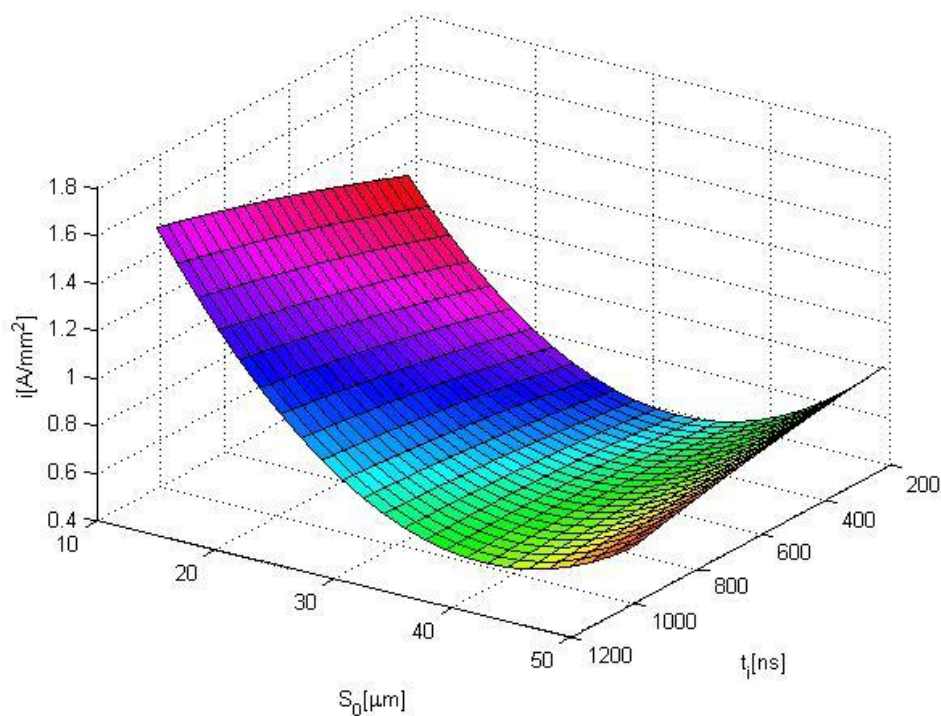
Wartość statystyki $F = 1,86$, $F_k = 4,059963$

$F < F_k$

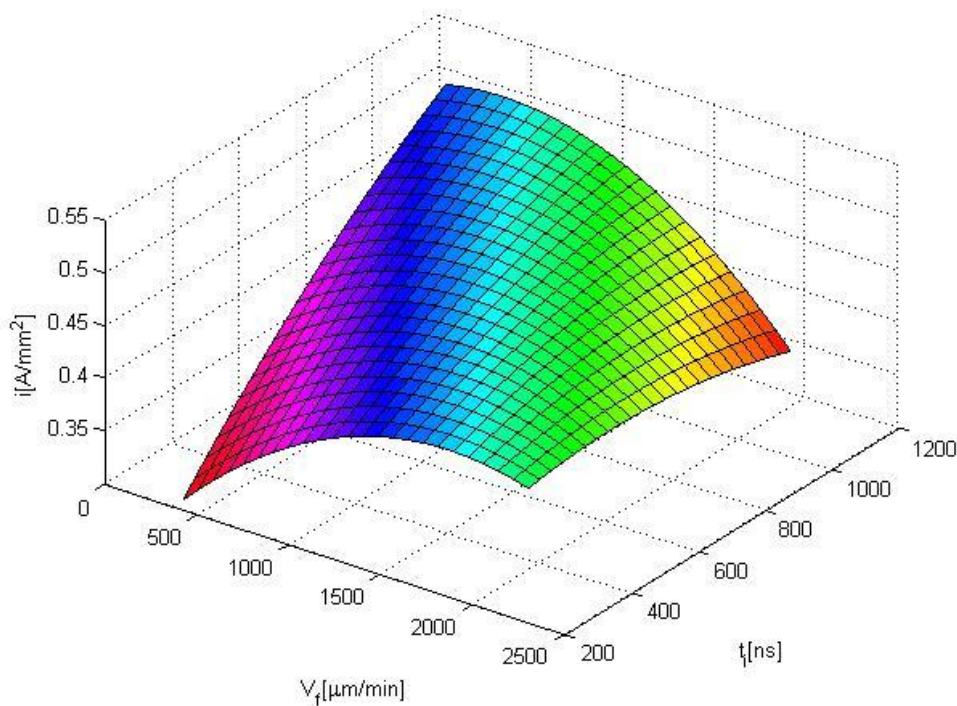
a zatem funkcja jest adekwatna.



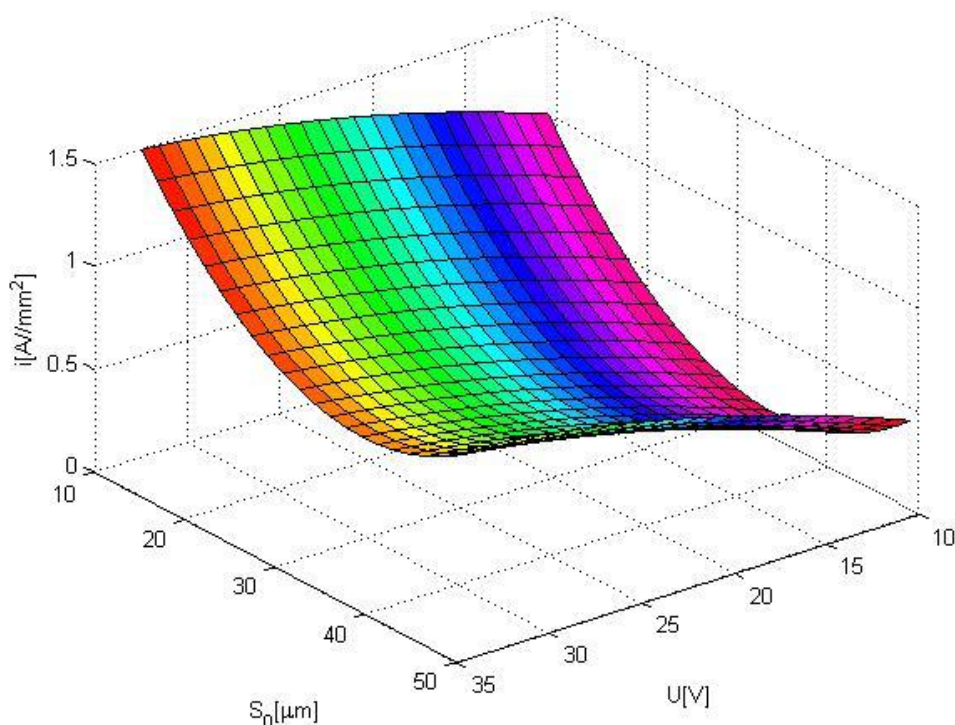
Rys. 69. Zależność średniej gęstości prądu i od czasu impulsu t_i i napięcia międzyelektrodowego U ; elektroda Cu, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $S_0 = 30 \mu\text{m}$.



Rys. 70. Zależność średniej gęstości prądu i od czasu impulsu t_i i szczeliny międzyelektrodowej S_0 ; elektroda Cu, $V_f = 1500$ μm/min, $U = 20$ V.



Rys. 71. Zależność średniej gęstości prądu i od czasu impulsu t_i i prędkości posuwu elektrody V_f ; elektroda Cu, $U = 20$ V, $S_0 = 30$ μm.



Rys. 72. Zależność średniej gęstości prądu i od napięcia międzyelektrodowego U i szczeliny międzyelektrodowej S_0 ; elektroda Cu, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $t_i = 550 \text{ ns}$.

W przypadku analizy zależności gęstości prądu (rys. 69 - 72) należy pamiętać, że jego pomiar był obciążony błędami pochodzącymi z kilku źródeł:

- zakłócenia pochodzące od innych zespołów pracującego stanowiska;
- zakłócenia związane z powstawaniem pojemności pasożytniczych w obwodach zasilacza przy tak wysokiej częstotliwości impulsów;
- zakłócenia związane z różną ilością elektrolitu w obszarze szczeliny w trakcie obróbki, a co za tym idzie różnej wartości prądu.

Pamiętając o tych ograniczeniach można zauważyć, że:

- wraz ze wzrostem napięcia i długości impulsu roboczego rośnie gęstość prądu roztwarzania;
- wraz ze wzrostem długości impulsu roboczego rośnie gęstość prądu, jednak wzrost prędkości posuwu elektrody powoduje jego zmniejszenie.

Model dla parametru chropowości Ra:

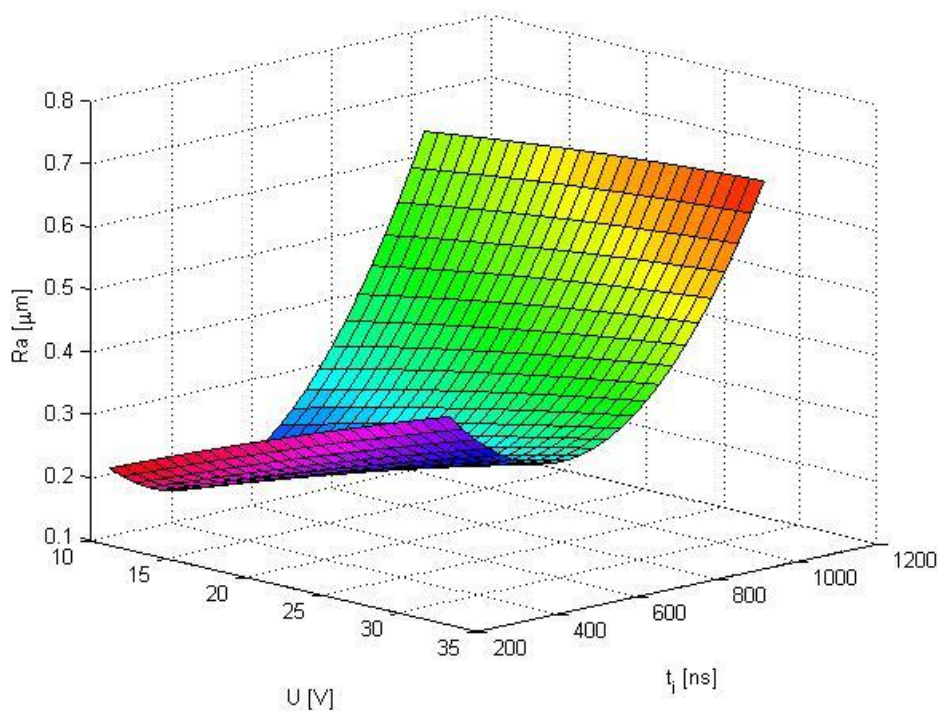
$$Ra = 0,64 - 6,6 \cdot 10^{-4} \cdot V_f - 1,03 \cdot 10^{-3} \cdot U + 0,012 \cdot t_i + 0,01 \cdot S_0 - 6,35 \cdot 10^{-8} \cdot V_f \cdot U + 4,7 \cdot 10^{-6} \cdot V_f \cdot t_i + 4,78 \cdot 10^{-6} \cdot V_f \cdot S_0 - 9,36 \cdot 10^{-6} \cdot U \cdot t_i - 1,37 \cdot 10^{-6} \cdot U \cdot S_0 - 2 \cdot 10^{-4} \cdot t_i \cdot S_0 + 1,16 \cdot 10^{-7} \cdot V_f^2 - 1,46 \cdot 10^{-6} \cdot U^2 - 4,94 \cdot 10^{-5} \cdot t_i^2 - 1,71 \cdot 10^{-4} \cdot S_0^2$$

W kategoriach statystycznych wszystkie współczynniki wielomianu zostały uznane za istotne.

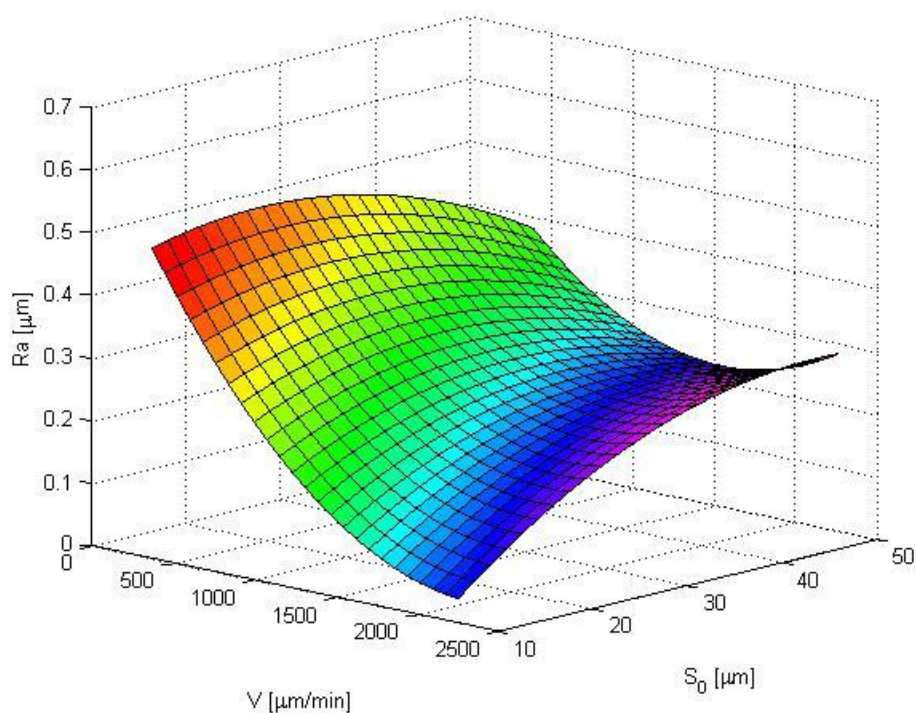
Wartość statystyki $F=1,89$, $F_k=4,059963$

$$F < F_k$$

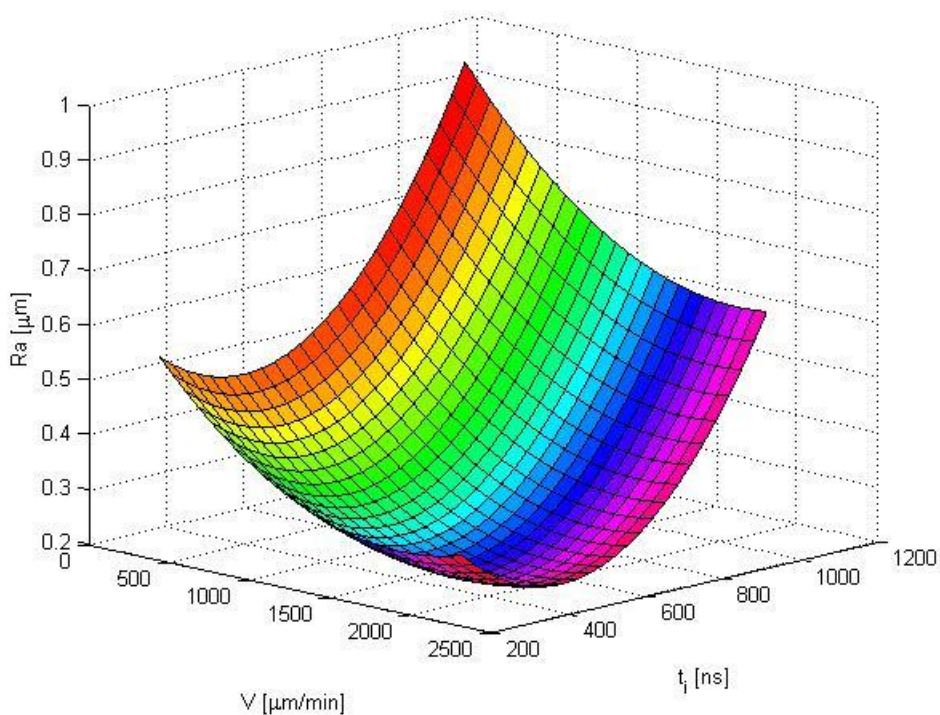
a zatem funkcja jest adekwatna.



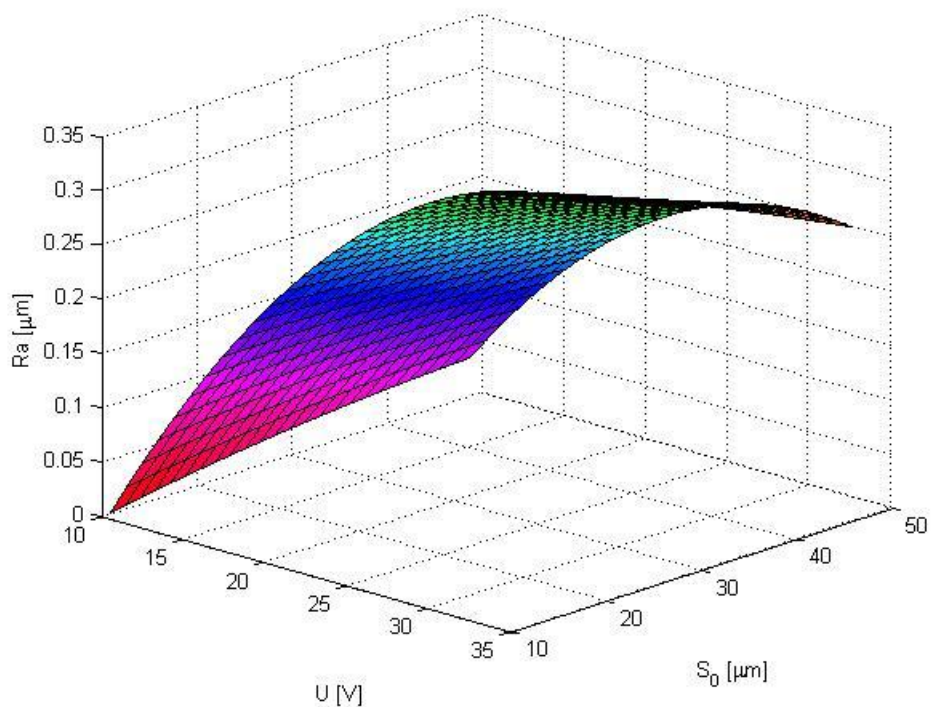
Rys. 73. Zależność parametru chropowości Ra od napięcia międzyelektrodowego U i długości impulsu roboczego t_i ; elektroda Cu, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $S_0 = 30 \mu\text{m}$.



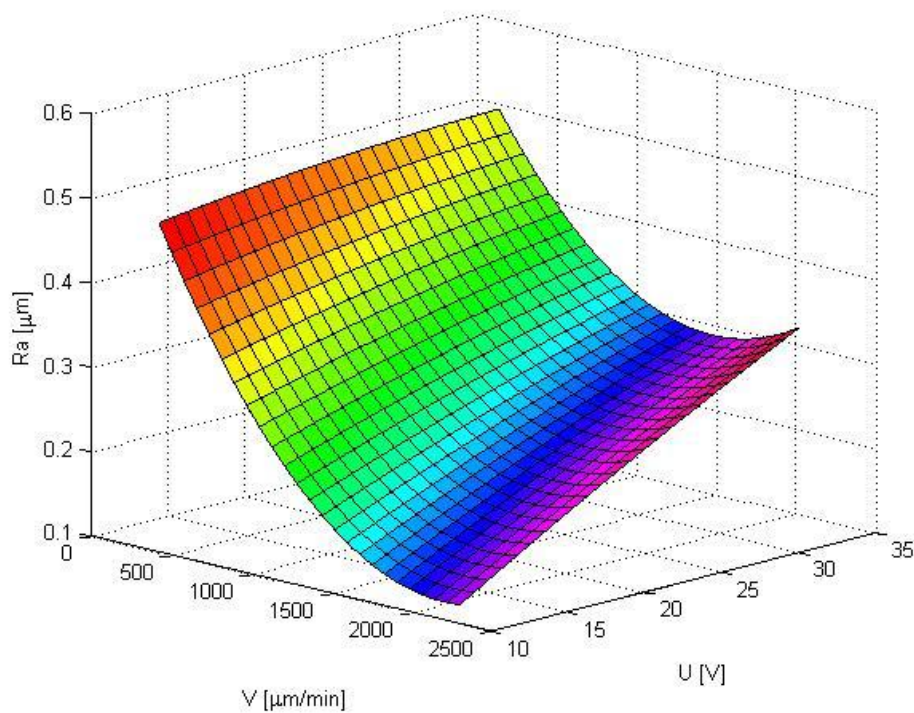
Rys. 74. Zależność parametru chropowatości Ra od grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 i prędkości posuwu elektrody V_f ; elektroda Cu, $U = 20$ V, $t_i = 550$ ns.



Rys. 75. Zależność parametru chropowatości Ra od długości impulsu roboczego t_i i prędkości posuwu elektrody V_f ; elektroda Cu, $S_0 = 30$ μm , $U = 20$ V.



Rys. 76. Zależność parametru chropowatości Ra od grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 i napięcia międzyelektrodowego U ; elektroda Cu, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $t_i = 550 \text{ ns}$.



Rys. 77. Zależność parametru chropowatości Ra od napięcia międzyelektrodowego U i prędkości posuwu elektrody V_f ; elektroda Cu, $t_i = 550 \text{ ns}$, $S_0 = 30 \mu\text{m}$.

Wszystkie badane czynniki miały istotny wpływ na parametr chropowatości R_a (rys. 73 - 77). Przy ich ocenie należy pamiętać o dodatkowym wpływie czynników zakłócających, takich jak prędkość przepływu elektrolitu, zanieczyszczenia elektrolitu, produkty roztwarzania. Na podstawie przedstawionych zależności można sformułować następujące wnioski:

- wraz ze wzrostem napięcia i długości impulsu roboczego rośnie parametr R_a (przy ustalonych pozostałych wartościach parametrów wejściowych);
- wzrost prędkości posuwu elektrody powoduje zmniejszenie R_a , ale wzrost grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 przyczynia się do wzrostu wartości parametru chropowatości;
- dla pewnych wartości prędkości posuwu elektrody i długości impulsu roboczego istnieje przedział, w którym R_a przyjmuje najmniejsze wartości;
- wzrost wartości napięcia roboczego powoduje, że wartość R_a rośnie, dodatkowo grubość szczeliny międzyelektrodowej przyjmuje wartość, dla której R_a jest maksymalne;
- wraz ze wzrostem prędkości posuwu elektrody wartość R_a maleje; przy rosnącej grubości szczeliny międzyelektrodowej R_a rośnie.

Model dla współczynnika obrabialności elektrochemicznej η_{k_v} :

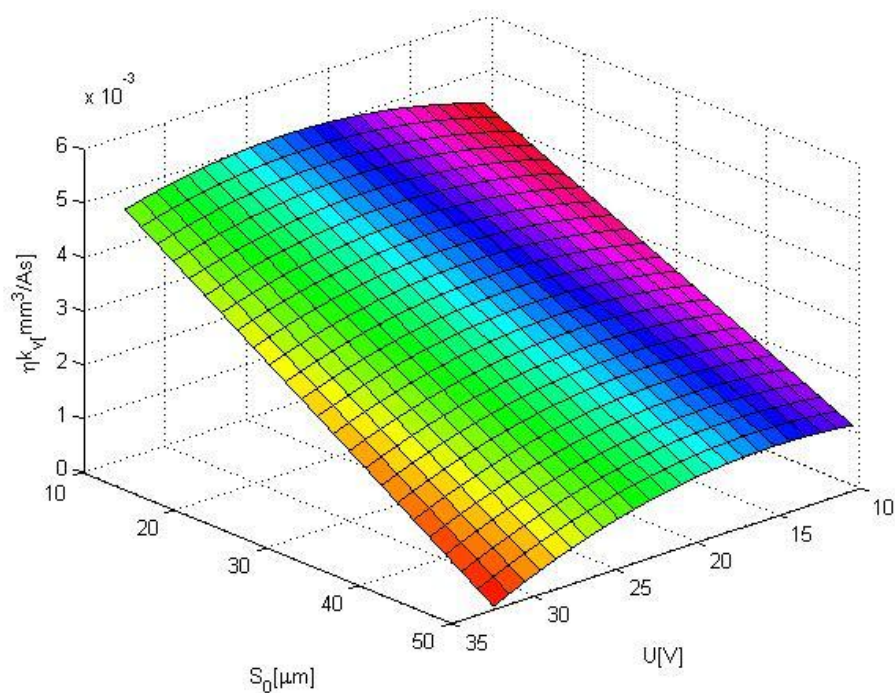
$$\eta_{k_v} = 0,019 + 6,18 \cdot 10^{-5} \cdot U + 1,04 \cdot 10^{-5} \cdot t_i + 1,7 \cdot 10^{-4} \cdot S_0 + 8,67 \cdot 10^{-8} \cdot V_f \cdot U + 1,8 \cdot 10^{-9} \cdot V_f \cdot t_i - 3,21 \cdot 10^{-9} \cdot V_f \cdot S_0 + 6,23 \cdot 10^{-8} \cdot U \cdot t_i - 1,58 \cdot 10^{-6} \cdot U \cdot S_0 - 4,2 \cdot 10^{-7} \cdot t_i \cdot S_0 - 4,24 \cdot 10^{-6} \cdot U^2 + 2,33 \cdot 10^{-9} \cdot t_i^2 - 9,43 \cdot 10^{-9} \cdot S_0^2$$

W kategoriach statystycznych za nieistotny współczynnik został uznany wyraz b_1 i b_{12} .

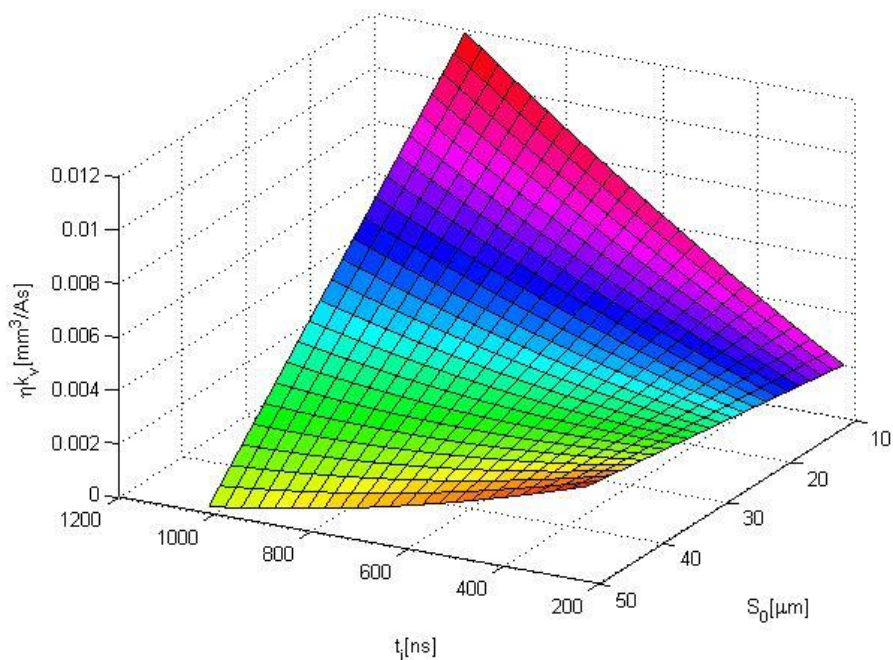
Wartość statystyki $F = 2,05$, $F_k = 4,059963$

$$F < F_k$$

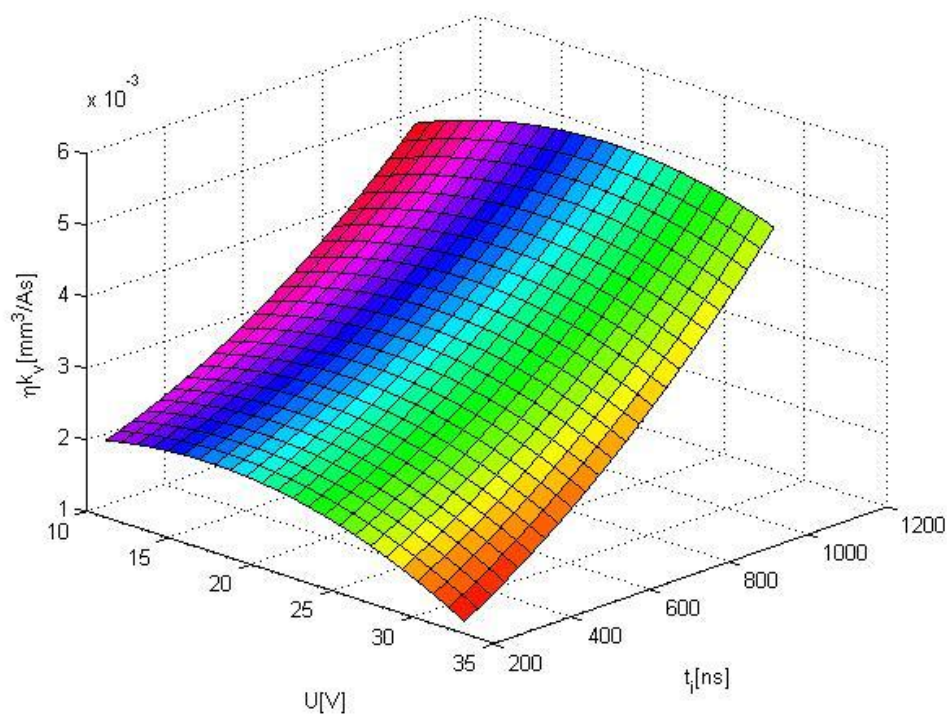
a zatem funkcja jest adekwatna.



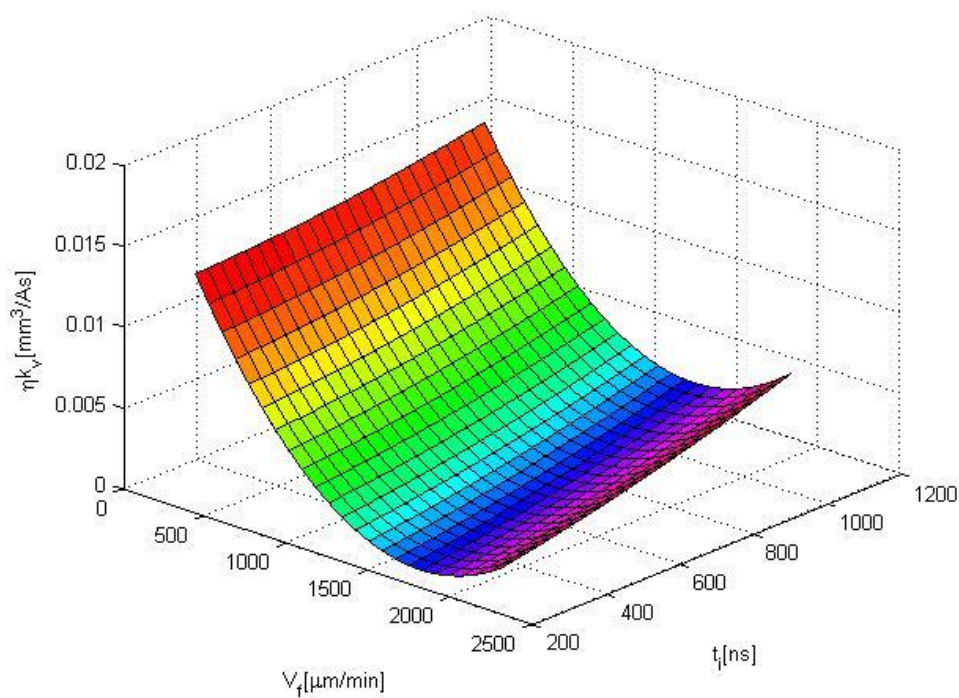
Rys. 78. Zależność współczynnika obrabialności ηk_v od napięcia międzyelektrodowego U i grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 ; elektroda Cu, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $t_i = 550 \text{ ns}$.



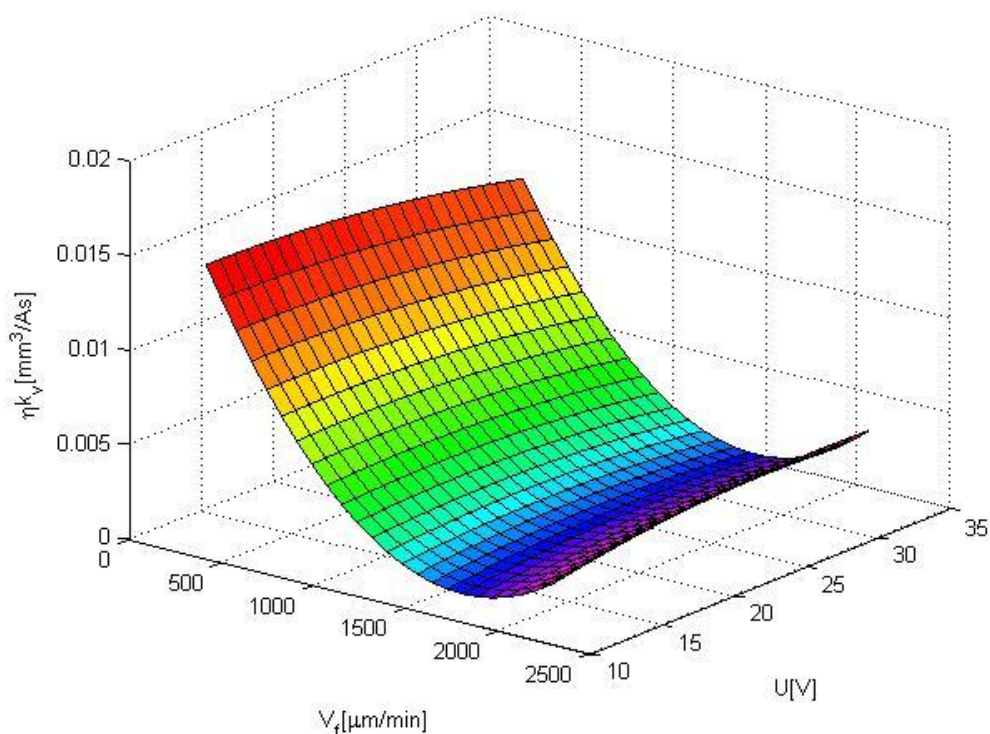
Rys. 79. Zależność współczynnika obrabialności ηk_v od długości impulsu roboczego t_i i grubości szczeliny S_0 ; elektroda Cu, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $U = 20 \text{ V}$.



Rys. 80. Zależność współczynnika obrabialności ηk_v od napięcia międzyelektrodowego U i długości impulsu roboczego t_i ; elektroda Cu, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $S_0 = 30 \mu\text{m}$.



Rys. 81. Zależność współczynnika obrabialności ηk_v od prędkości posuwu elektrody V_f i długości impulsu roboczego t_i ; elektroda Cu, $S_0 = 30 \mu\text{m}$, $U = 20 \text{ V}$.



Rys. 82. Zależność współczynnika obrabialności η_{k_v} od prędkości posuwu elektrody V_f i napięcia międzyelektrodowego U ; elektroda Cu, $S_0 = 30 \mu\text{m}$, $t_i = 550 \text{ ns}$.

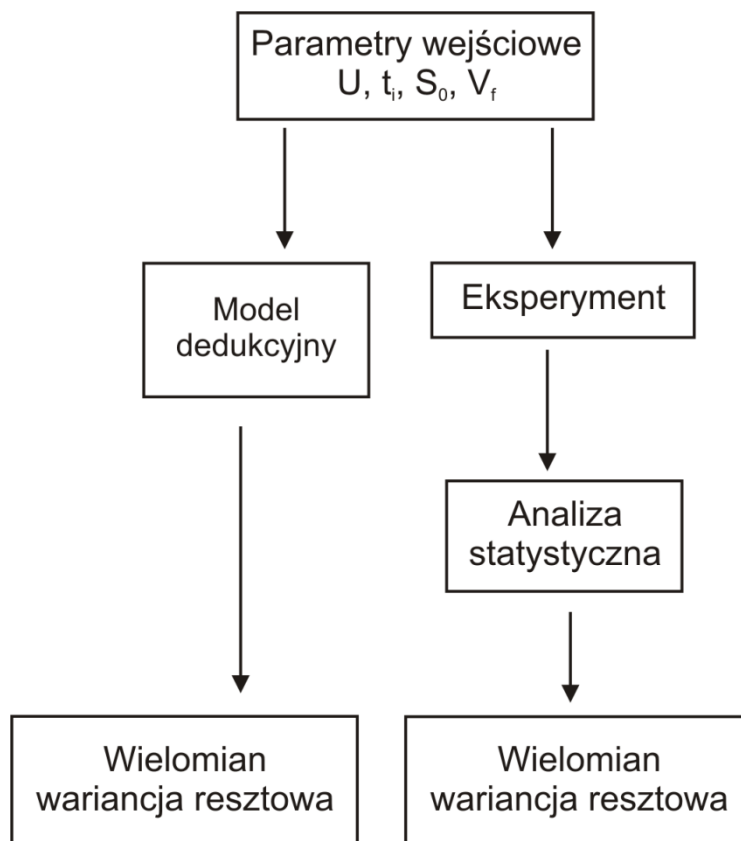
Analizując wyniki dotyczące współczynnika obrabialności η_{k_v} (rys. 78 - 82) należy pamiętać, że jest on oszacowany na podstawie pomiaru kilku wielkości. To powoduje, że błędy związane z ich wyznaczeniem kumulują się w szacowanej wielkości. Dodatkowo należy cały czas pamiętać o trudnym do oszacowania wpływie czynników zakłócających. Biorąc to wszystko pod uwagę, na podstawie przedstawionych zależności, można stwierdzić, że:

- istnieją wartości napięcia międzyelektrodowego U i grubości szczeliny S_0 , dla których współczynnik obrabialności η_{k_v} przyjmuje wartości minimalne, co sugeruje, że w takich warunkach dochodzi, w obszarze szczeliny międzyelektrodowej, do zjawisk hamujących proces roztwarzania – kumulacji zanieczyszczeń, braku wymiany elektrolitu, powstania dużej ilości fazy gazowej;
- wraz ze wzrostem czasu impulsu i zmniejszeniem grubości szczeliny η_{k_v} rośnie;
- wzrost napięcia i czasu impulsu roboczego również powoduje wzrost współczynnika obrabialności η_{k_v} ;

Korzystając z programu, wykonano symulację procesu impulsowej obróbki elektrochemicznej dla tych samych parametrów, dla których zostały wykonane

badania doświadczalne. Na rys. 83 przedstawiono algorytm porównania wariancji resztowej modelu dedukcyjnego i wyników badań.

W wyniku symulacji otrzymano grubość usuniętego naddatku wyliczonego z modelu dedukcyjnego. Następnie na podstawie symulacji zbudowano model regresyjny i obliczono wariancję resztową, którą porównano z wariancją wyliczoną z modelu zbudowanego na podstawie badań.



Rys. 83. Schemat przedstawiający algorytm porównania wariancji resztowej modelu dedukcyjnego i wyników badań.

Wielomian uzyskany dla wyników otrzymanych z symulacji dla grubości usuniętego naddatku a :

$$a = 84,61 - 2,15 \cdot 10^{-2} \cdot V_f - 0,537 \cdot U + 0,054 \cdot t_i - 4,98 \cdot S_0 + 4,12 \cdot 10^{-4} \cdot V_f \cdot U - 1,25 \cdot 10^{-5} \cdot V_f \cdot t_i + 6,7 \cdot 10^{-4} \cdot V_f \cdot S_0 - 1,17 \cdot 10^{-4} \cdot U \cdot t_i - 9,01 \cdot 10^{-4} \cdot U \cdot S_0 - 8,06 \cdot 10^{-4} \cdot t_i \cdot S_0 - 6,69 \cdot 10^{-7} \cdot V_f^2 - 8,6 \cdot 10^{-3} \cdot U^2 - 9,46 \cdot 10^{-7} \cdot t_i^2 + 6,46 \cdot 10^{-2} \cdot S_0^2$$

Stosunek wariancji resztowej dla symulacji: $\beta = 0,1$ do wariancji resztowej dla wyników doświadczalnych uzyskanych dla elektrody Cu:

$$\frac{S_{es}^2}{S_{eb}^2} = 4,04$$

Dla $\beta = 0,2$:

$$\frac{S_{es}^2}{S_{eb}^2} = 3,3$$

Dla $\beta = 0,3$:

$$\frac{S_{es}^2}{S_{eb}^2} = 4,04$$

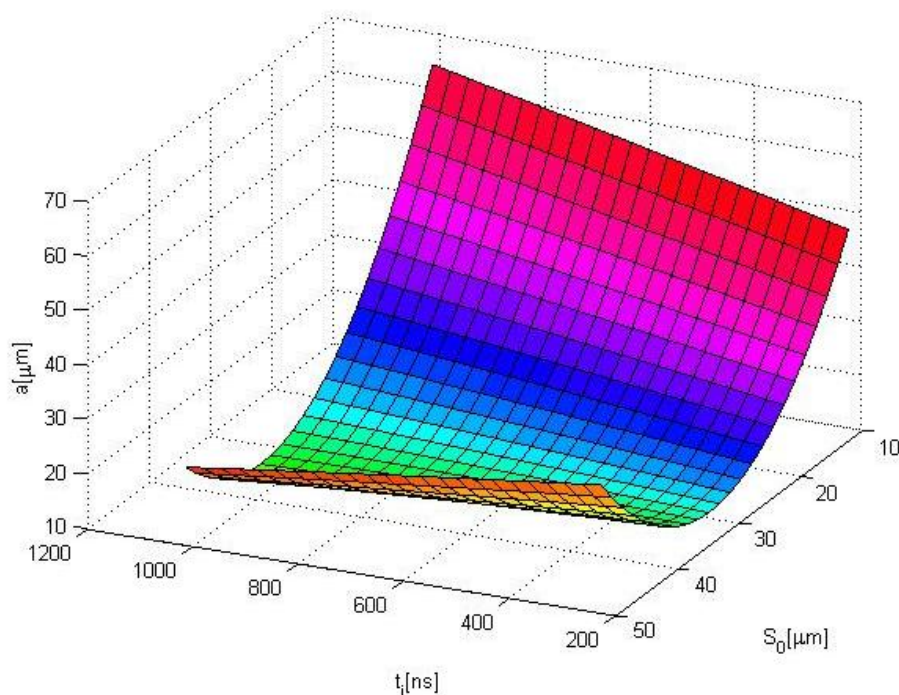
Te wartości oznaczają, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy, że wariancja resztowa dla symulacji różni się w sposób istotny od wariancji resztowej wyliczonej dla badań dla poziomu ufności $\alpha=0,05$.

W przypadku symulacji dla stałej wartości $\beta = 0$:

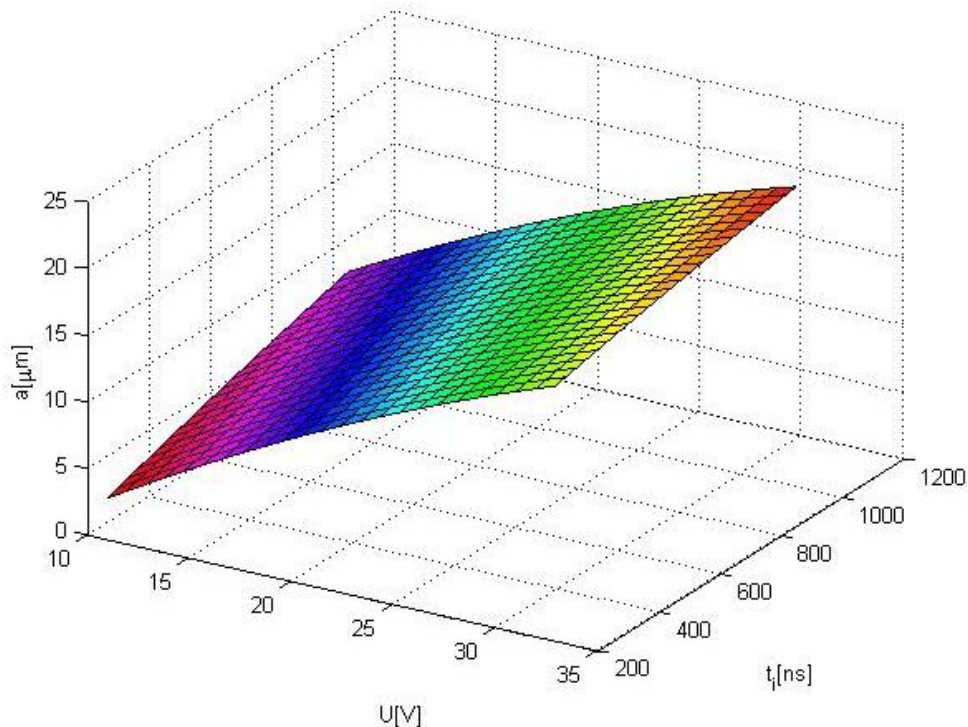
$$\frac{S_{es}^2}{S_{eb}^2} = 5,12$$

Co oznacza, że dla tego przypadku wariancja resztowa symulacji różni się w sposób istotny od wariancji resztowej wyliczonej dla badań.

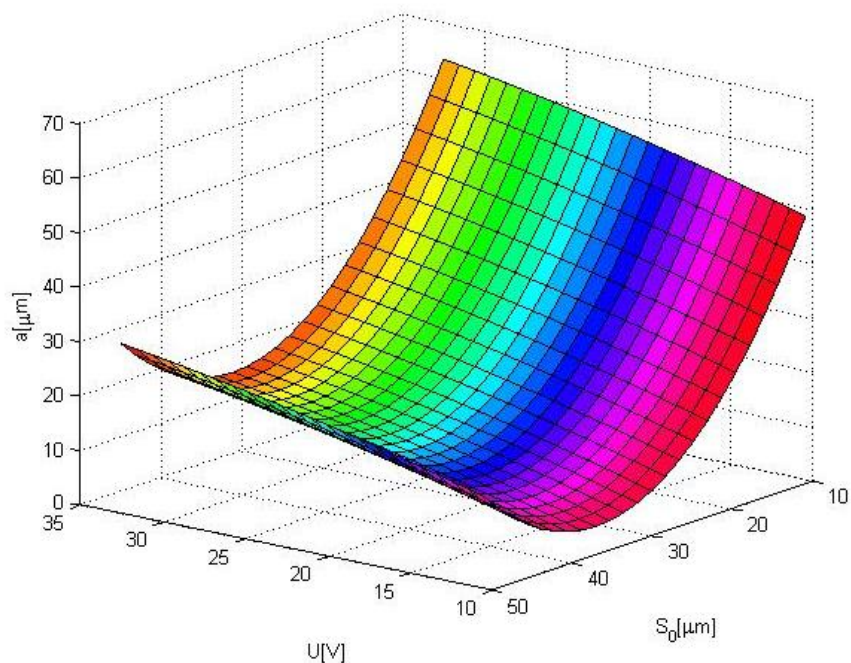
Na rys. 84 - 87 przedstawiono zależności między grubością usuniętego naddatku a i badanymi parametrami procesu dla wyników otrzymanych z symulacji komputerowej.



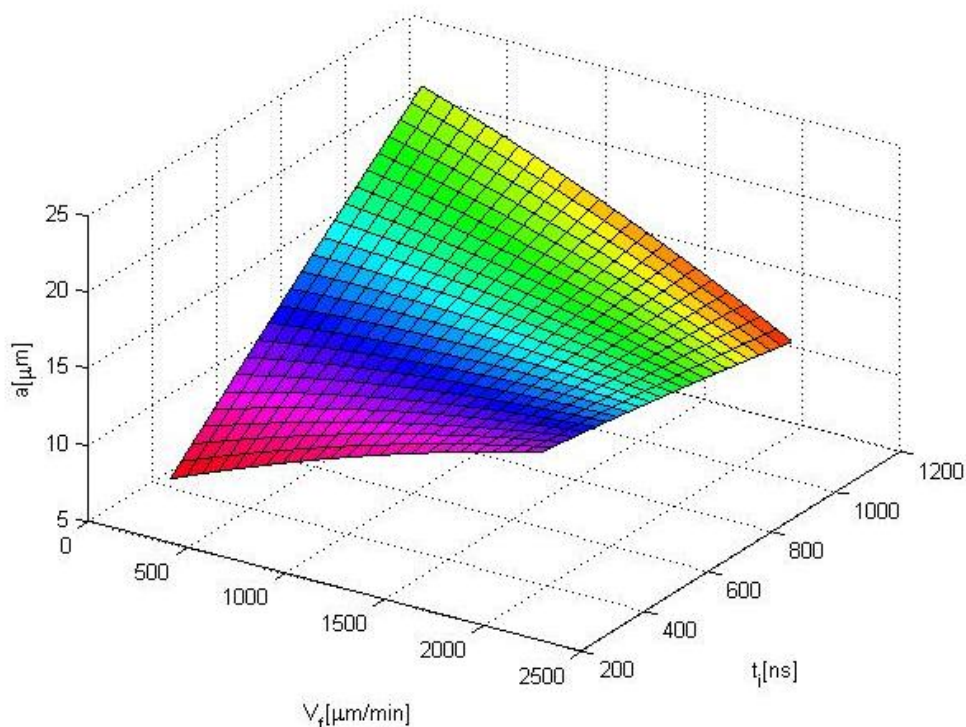
Rys. 84. Zależność usuniętego nadkładu a , w pojedynczym przejściu elektrody, od grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 i czasu impulsu t_i ; wyniki symulacji, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $U = 20 \text{ V}$.



Rys. 85. Zależność usuniętego nadkładu a , w pojedynczym przejściu elektrody, od napięcia roboczego U i czasu impulsu t_i ; wyniki symulacji, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $S_0 = 30 \mu\text{m}$.



Rys. 86. Zależność usuniętego nadkładu a , w pojedynczym przejściu elektrody od napięcia roboczego U i grubości szczeliny S_0 ; wyniki symulacji, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $t_i = 550 \text{ ns}$.



Rys. 87. Zależność usuniętego nadkładu a , w pojedynczym przejściu elektrody, od prędkości posuwu elektrody V_f i długości czasu impulsu t_i , wyniki symulacji, $U = 20 \text{ V}$, $S_0 = 30 \mu\text{m}$.

Wyniki dla elektrody W.

Model dla grubości usuniętego naddatku a :

$$a = -68,99 - 9,89 \cdot 10^{-4} \cdot V_f + 2,14 \cdot U + 7,06 \cdot 10^{-2} \cdot S_0 - 4 \cdot 10^{-4} \cdot V_f \cdot U - 1,25 \cdot 10^{-5} \cdot V_f \cdot t_i - 1,51 \cdot 10^{-4} \cdot V_f \cdot S_0 - 5,74 \cdot 10^{-4} \cdot U \cdot t_i - 1,27 \cdot 10^{-2} \cdot U \cdot S_0 - 8,41 \cdot 10^{-4} \cdot t_i \cdot S_0 + 4,93 \cdot 10^{-6} \cdot V_f^2 - 4,36 \cdot 10^{-3} \cdot U^2 + 7,11 \cdot 10^{-3} \cdot S_0^2$$

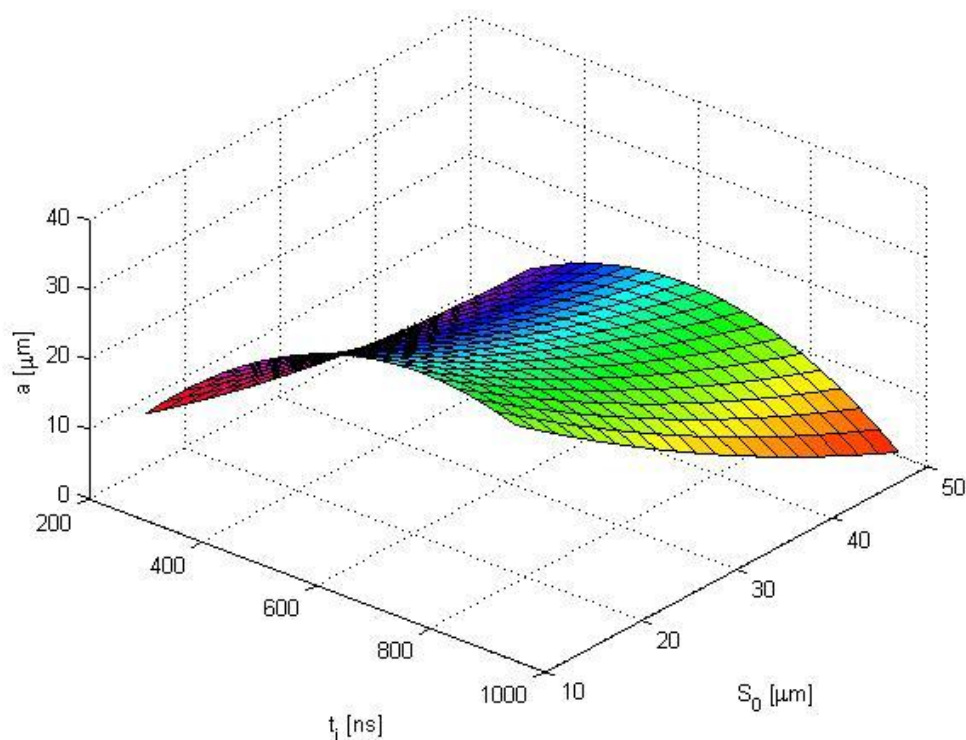
W kategoriach statystycznych za nieistotny współczynnik został uznany wyraz b_4 i b_{14} .

W przypadku grubości usuniętego naddatku dla elektrody W ocenę adekwatności wykonano na poziomie ufności $\alpha=0,01$. Dla tego poziomu $F^*=7,874$.

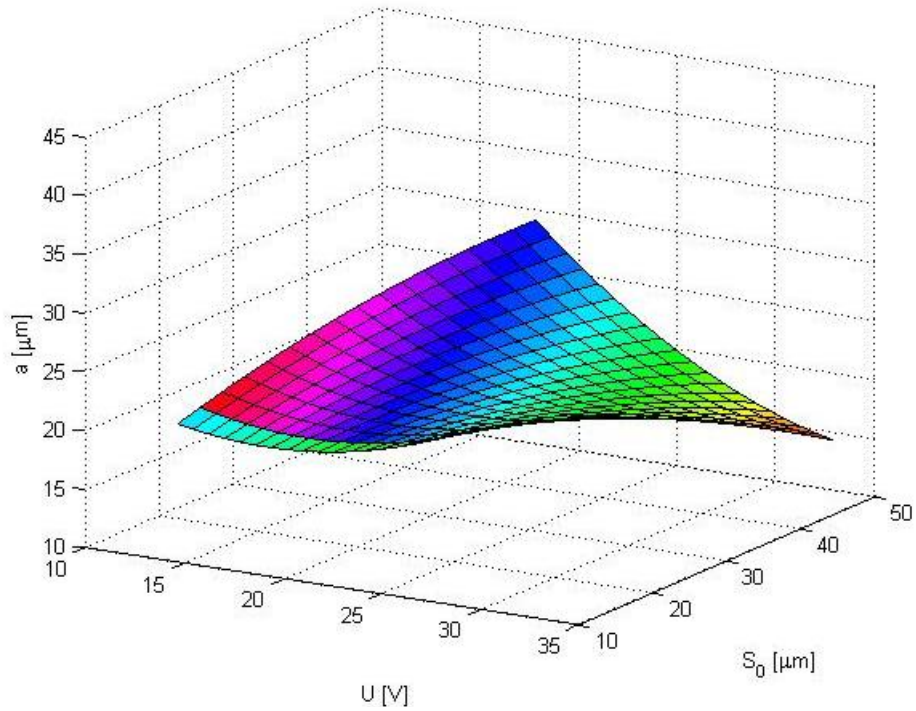
Wartość statystyki $F = 6,668$, $F_k = 7,874$

$$F < F_k$$

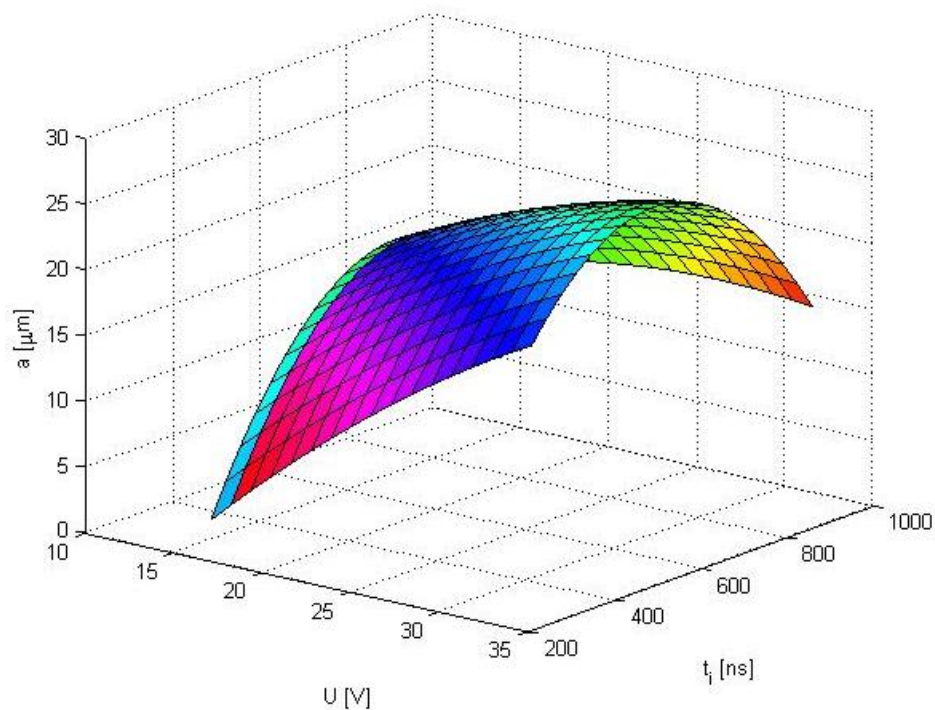
a zatem funkcja jest adekwatna.



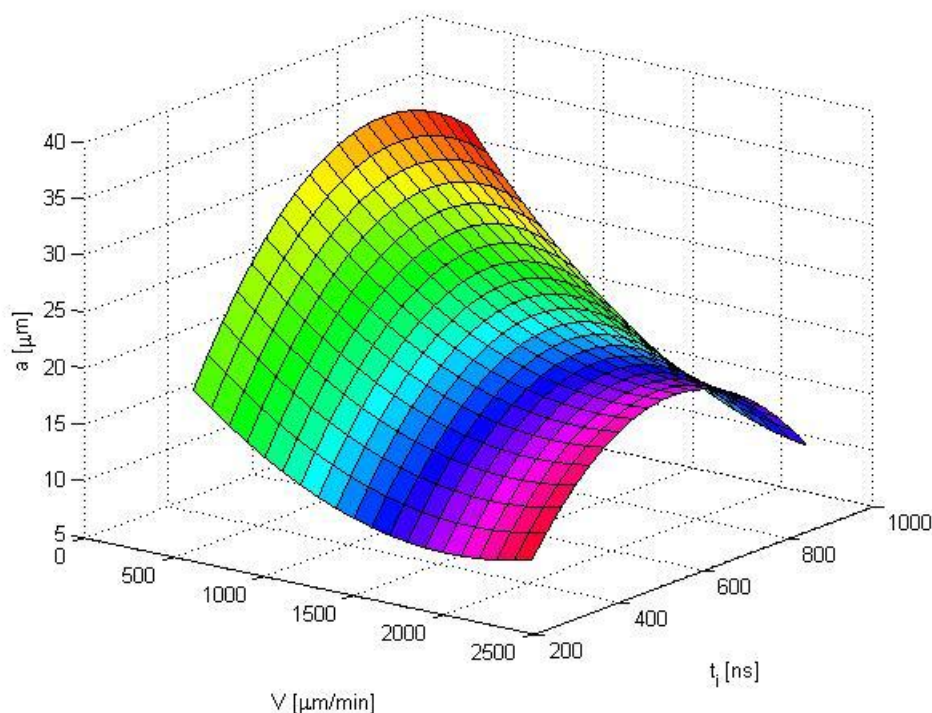
Rys. 88. Zależność grubości usuniętego naddatku a od czasu impulsu t_i i grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 ; elektroda W, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $U = 20 \text{ V}$.



Rys. 89. Zależność grubości usuniętego naddatku a od napięcia roboczego U i grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 ; elektroda W, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $t_i = 550 \text{ ns}$.



Rys. 90. Zależność grubości usuniętego naddatku a od napięcia roboczego U i czasu impulsu t_i ; elektroda W, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $S_0 = 30 \mu\text{m}$.



Rys. 91. Zależność grubości usuniętego naddatku a od prędkości posuwu elektrody V_f i czasu impulsu t_i ; elektroda W, $S_0 = 30 \mu\text{m}$, $U = 20 \text{ V}$.

Analiza wyników (rys. 88 – 91) pokazała, że:

- grubość usuniętego naddatku rośnie z czasem impulsu oraz maleje wraz ze wzrostem grubości szczeliny międzyelektrodowej;
- wraz ze wzrostem napięcia międzyelektrodowego rośnie grubość usuniętego naddatku oraz maleje, wraz ze wzrostem grubości szczeliny międzyelektrodowej;
- wzrost napięcia i czasu impulsu roboczego powoduje wzrost grubości usuniętego naddatku.

Model dla usuniętej objętości materiału próbki V :

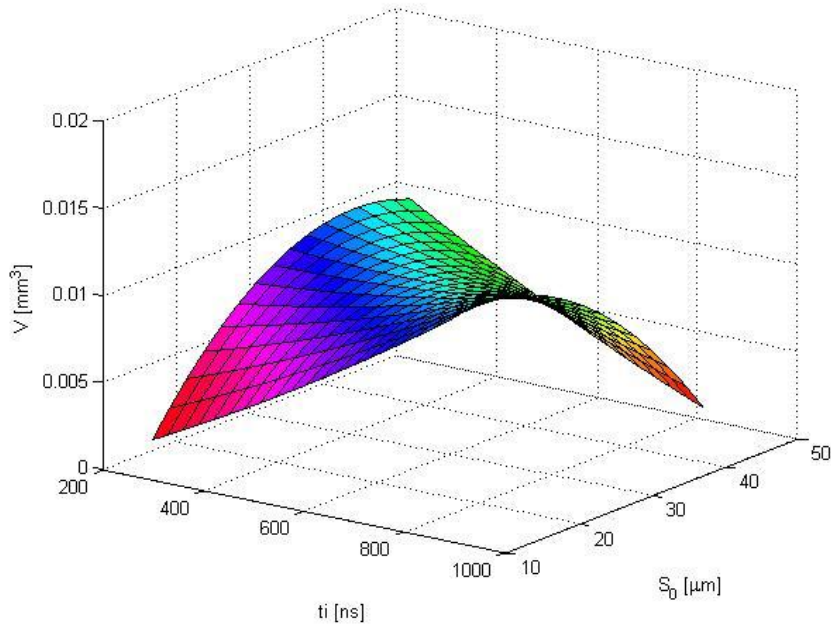
$$V = -0,065 + 1,08 \cdot 10^{-5} \cdot V_f + 2,01 \cdot 10^{-3} \cdot U + 8,25 \cdot 10^{-5} \cdot t_i + 1,34 \cdot 10^{-3} \cdot S_0 - 4,4 \cdot 10^{-7} \cdot V_f \cdot U - 1,11 \cdot 10^{-8} \cdot V_f \cdot t_i - 9,02 \cdot 10^{-8} \cdot V_f \cdot S_0 - 2,93 \cdot 10^{-7} \cdot U \cdot t_i - 1,14 \cdot 10^{-5} \cdot U \cdot S_0 - 1,01 \cdot 10^{-6} \cdot t_i \cdot -5,63 \cdot 10^{-10} \cdot V_f^2 - 1,22 \cdot 10^{-5} \cdot U^2 - 2,09 \cdot 10^{-8} \cdot t_i^2 - 1,59 \cdot 10^{-5} \cdot S_0^2$$

W kategoriach statystycznych wszystkie współczynniki wielomianu zostały uznane za istotne.

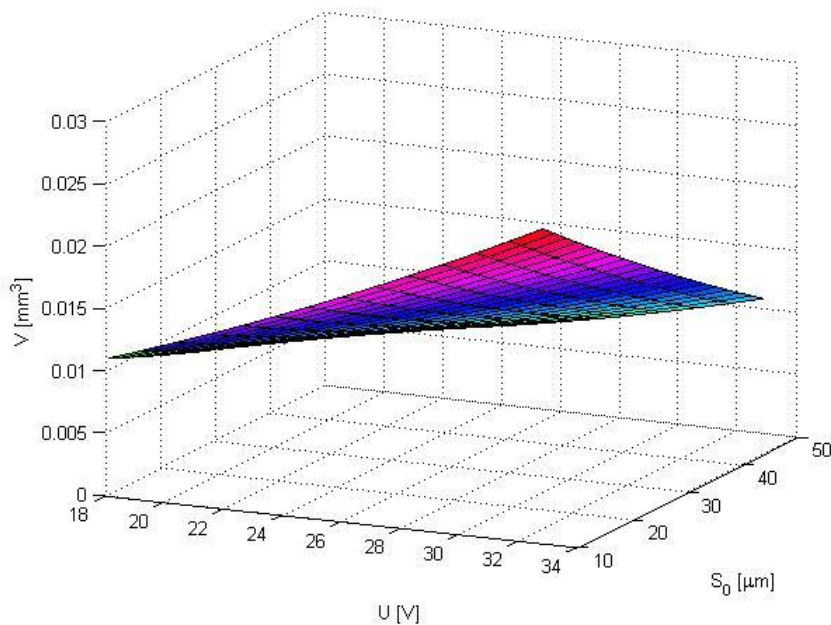
Wartość statystyki $F = 3,928$, $F_k = 4,059963$

$$F < F_k$$

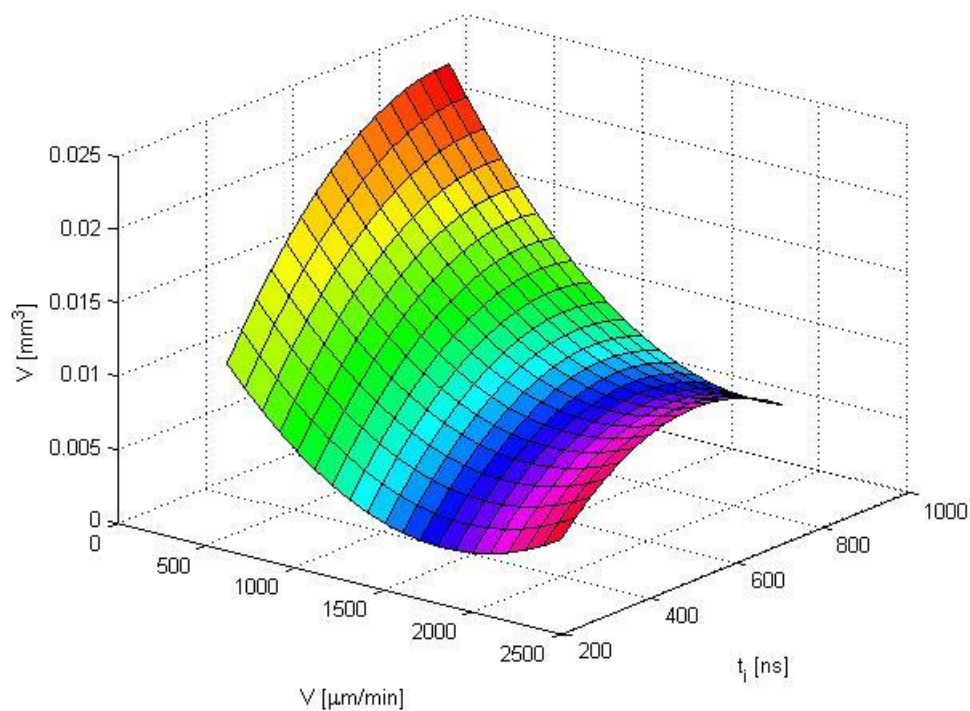
a zatem funkcja jest adekwatna.



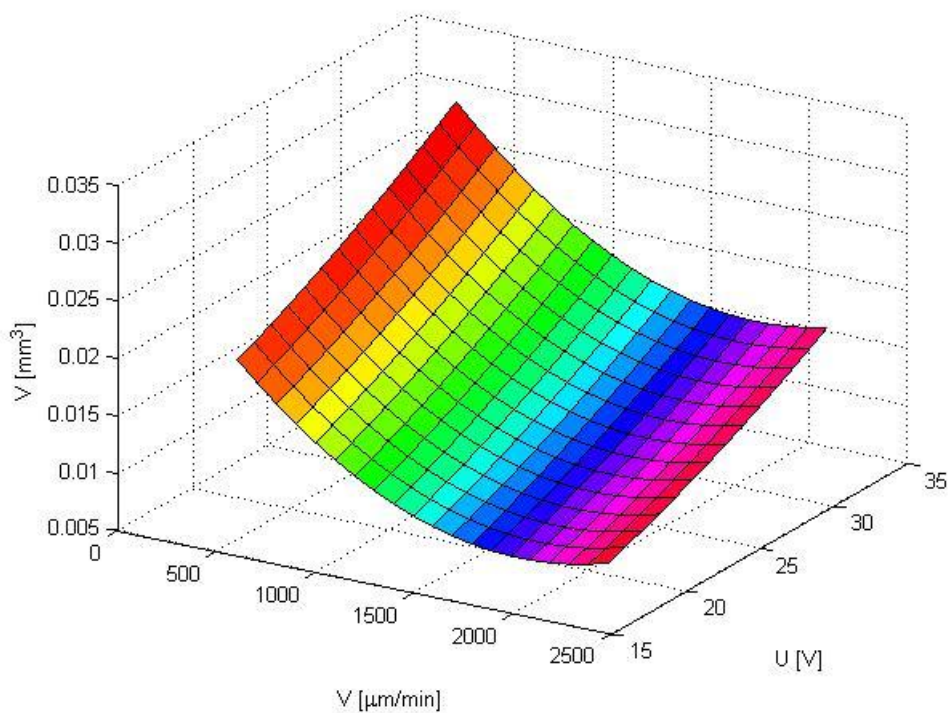
Rys. 92. Zależność objętości usuniętego naddatku V od grubości szczeliny początkowej S_0 i czasu impulsu t_i ; elektroda W, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $U = 20 \text{ V}$.



Rys. 93. Zależność objętości usuniętego naddatku V od napięcia międzyelektrodowego U i grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 ; elektroda W, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $t_i = 550 \text{ ns}$.



Rys. 94. Zależność objętości usuniętego materiału V od prędkości posuwu elektrody V_f i czasu impulsu t_i ; elektroda W, $U = 20$ V, $S_0 = 30$ μm .



Rys. 95. Zależność objętości usuniętego nadkładu V od prędkości posuwu elektrody V_f i napięcia międzyelektrodowego U ; elektroda W, $S_0 = 30$ μm , $t_i = 550$ ns.

Jak widać na powyższych wykresach (rys. 92 - 95) wszystkie parametry wejściowe mają istotny wpływ na wartość objętości usuniętego naddatku. Uzyskane zależności pokazują, podobnie jak w przypadku grubości usuniętego naddatku, że:

- objętość V rośnie wraz ze wzrostem czasu impulsu roboczego i maleje wraz ze zwiększeniem grubości szczeliny międzyelektrodowej;
- wraz ze wzrostem napięcia międzyelektrodowego U rośnie objętość usuniętego naddatku, zwiększenie grubości szczeliny międzyelektrodowej powoduje zmniejszenie usuniętego naddatku;
- dla małych prędkości posuwu elektrody i długich czasów impulsów roboczych objętość usuniętego naddatku osiąga wartości maksymalne.

Model dla gęstości prądu roztwarzania i_a :

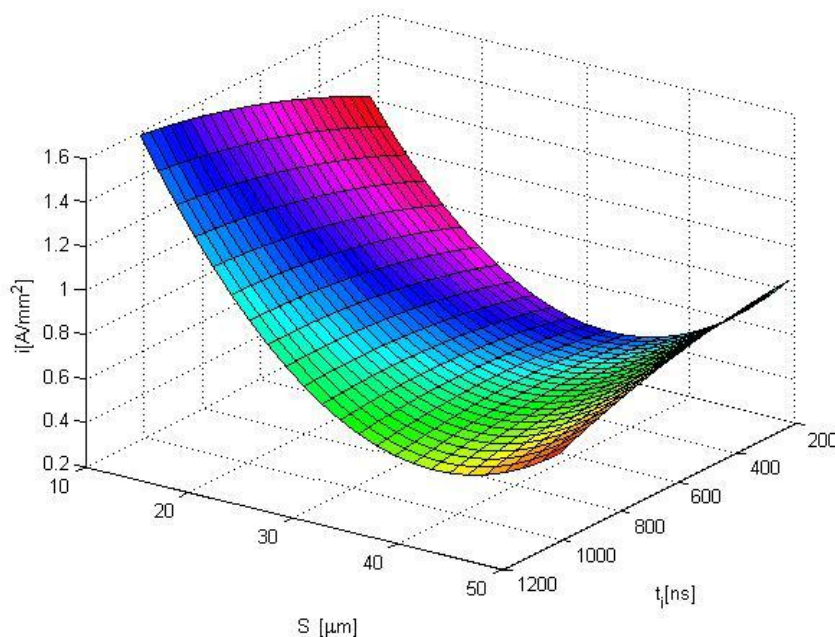
$$i_a = 1,48 - 1,41 \cdot 10^{-4} \cdot V_f + 5,8 \cdot 10^{-2} \cdot U + 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot t_i - 1,13 \cdot 10^{-2} \cdot S_0 - 4,27 \cdot 10^{-7} \cdot V_f \cdot U - 1,33 \cdot 10^{-7} \cdot V_f \cdot t_i + 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot V_f \cdot S_0 + 8,31 \cdot 10^{-6} \cdot U \cdot t_i - 1,26 \cdot 10^{-4} \cdot U \cdot S_0 - 1,94 \cdot 10^{-5} \cdot t_i \cdot S_0 - 6,9 \cdot 10^{-8} \cdot V_f^2 - 8,39 \cdot 10^{-4} \cdot U^2 - 3,1 \cdot 10^{-7} \cdot t_i^2$$

W kategoriach statystycznych współczynnik b_{15} został uznany za nieistotny.

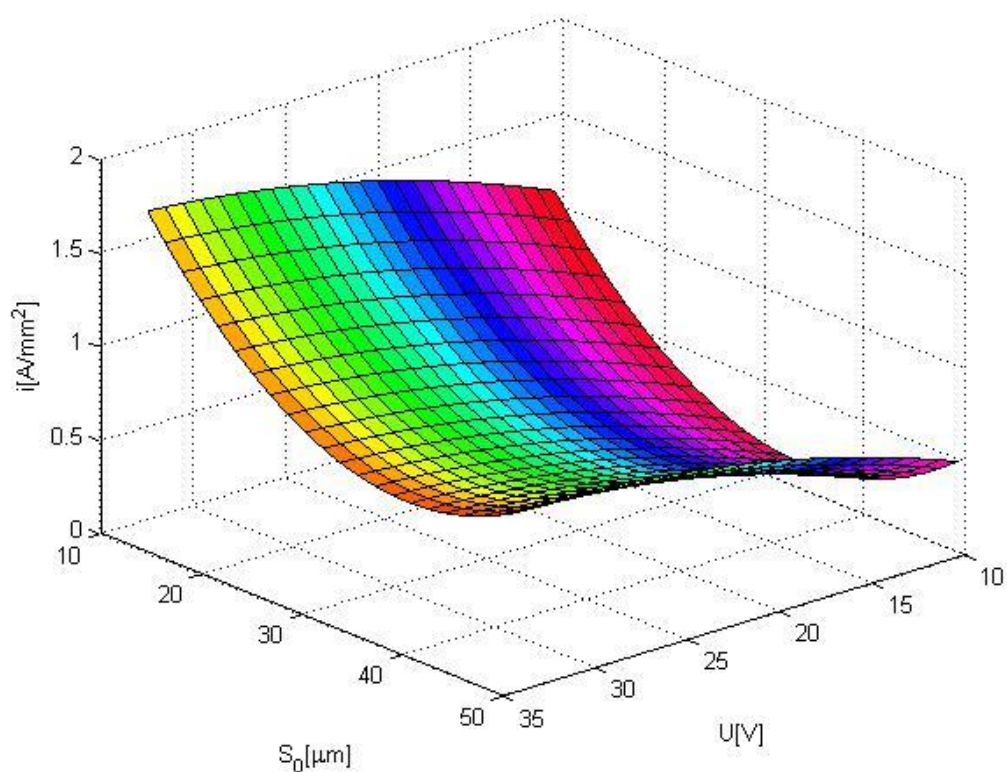
Wartość statystyki $F = 2,482$, $F_k = 4,059963$

$$F < F_k$$

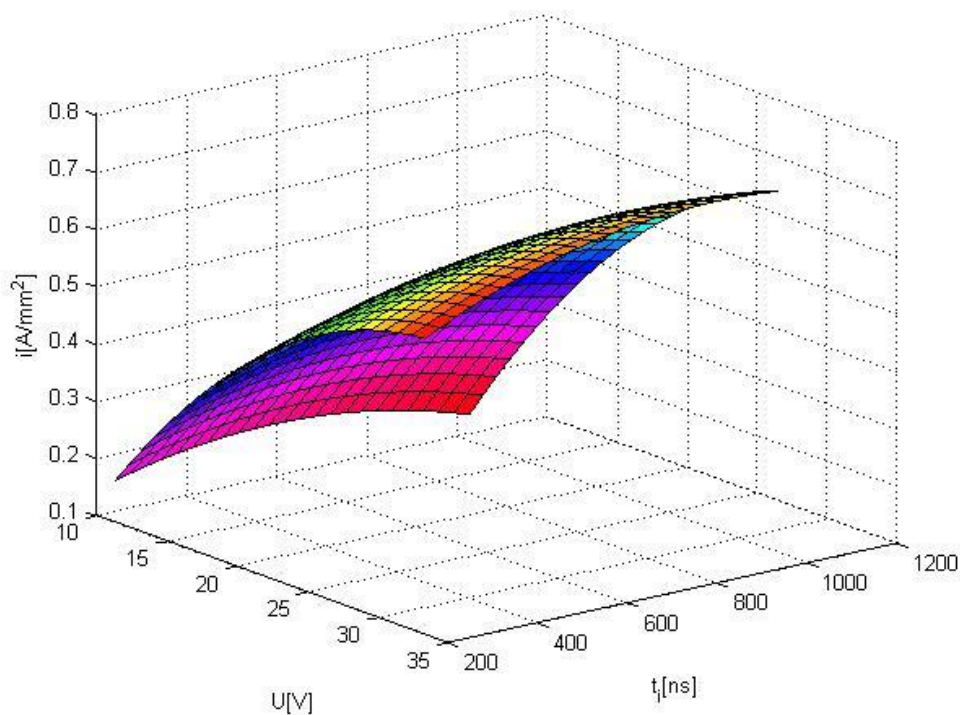
a zatem funkcja jest adekwatna.



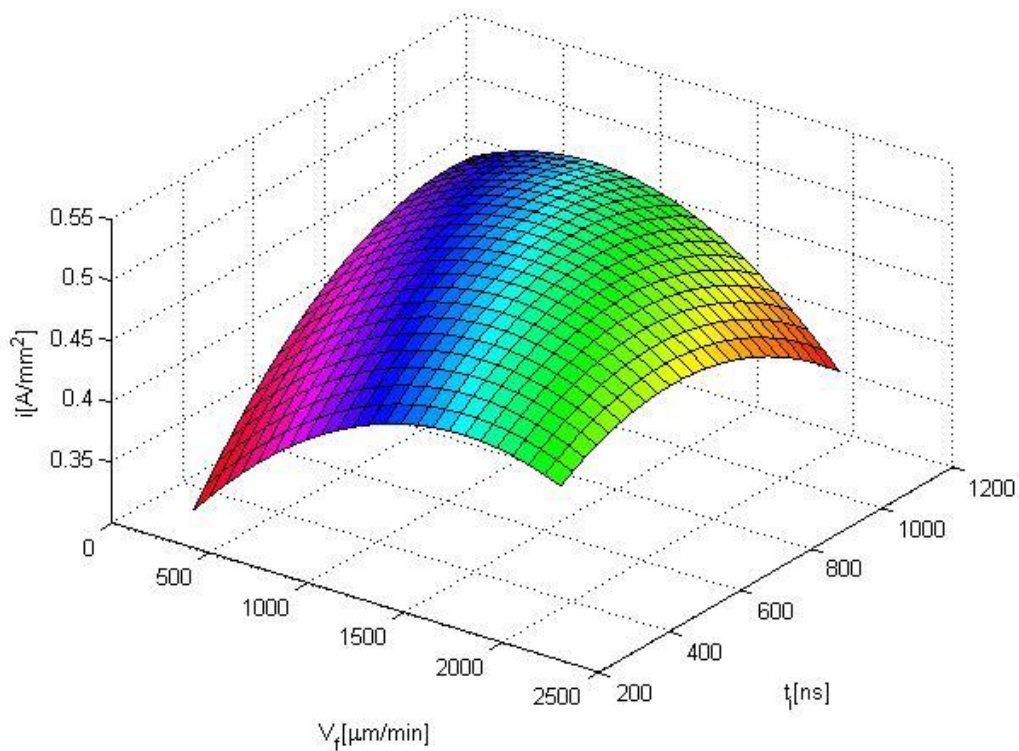
Rys. 96. Zależność średniej gęstości prądu i od czasu impulsu t_i i grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 ; elektroda W, $V_f = 1500 \mu\text{m/m}$, $U = 20 \text{ V}$.



Rys. 97. Zależność średniej gęstości prądu i od napięcia międzyelektrodowego U i grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 ; elektroda W, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $t_i = 550 \text{ ns}$.



Rys. 98. Zależność średniej gęstości prądu i od napięcia międzyelektrodowego U i czasu impulsu t_i ; elektroda W, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $S_0 = 30 \mu\text{m}$.



Rys. 99. Zależność średniej gęstości prądu i od prędkości posuwu elektrody V_f i czasu impulsu t_i ; elektroda W, $S_0 = 30 \mu\text{m}$, $U = 20 \text{ V}$.

W przypadku elektrody wolframowej, pomiar prądu był obarczony tymi samymi błędami, co w przypadku elektrody miedzianej. Uzyskane zależności pokazują, że:

- wraz ze wzrostem napięcia roboczego gęstość prądu rośnie, a wraz ze wzrostem grubości szczeliny międzyelektrodowej maleje;
- zwiększenie napięcia międzyelektrodowego i wydłużenie impulsu roboczego powoduje zwiększenie gęstości prądu.

Wyniki zilustrowano na rys. 96 – 99.

Model dla parametru chropowatości Ra :

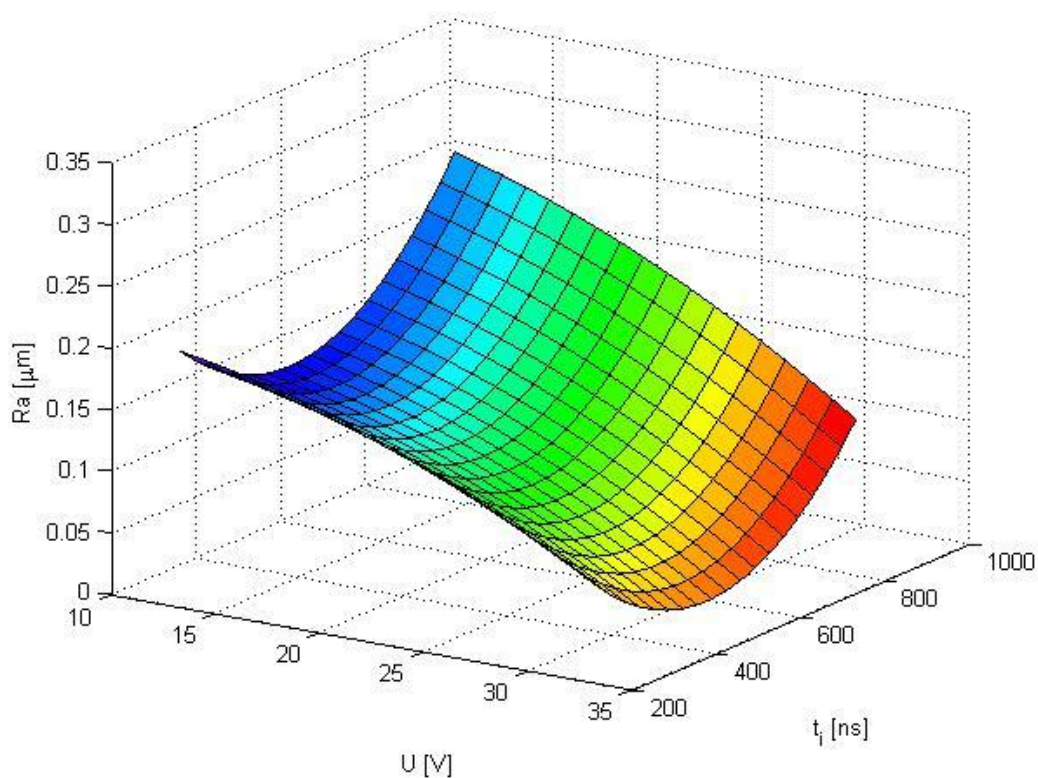
$$Ra = 0,54 - 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot V_f + 2,98 \cdot 10^{-3} \cdot U + 1,67 \cdot 10^{-4} \cdot t_i - 0,022 \cdot S_0 - 1,56 \cdot 10^{-6} \cdot V_f \cdot U + 1,32 \cdot 10^{-8} \cdot V_f \cdot t_i + 1,34 \cdot 10^{-8} \cdot V_f \cdot S_0 - 1,54 \cdot 10^{-5} \cdot U \cdot t_i + 1,56 \cdot 10^{-4} \cdot U \cdot S_0 + 1,89 \cdot 10^{-5} \cdot t_i \cdot S_0 - 7,19 \cdot 10^{-8} \cdot V_f^2 - 5,18 \cdot 10^{-5} \cdot U^2 - 1,99 \cdot 10^{-7} \cdot t_i^2 - 1,17 \cdot 10^{-4} \cdot S_0^2$$

W kategoriach statystycznych wszystkie współczynniki wielomianu zostały uznane za istotne.

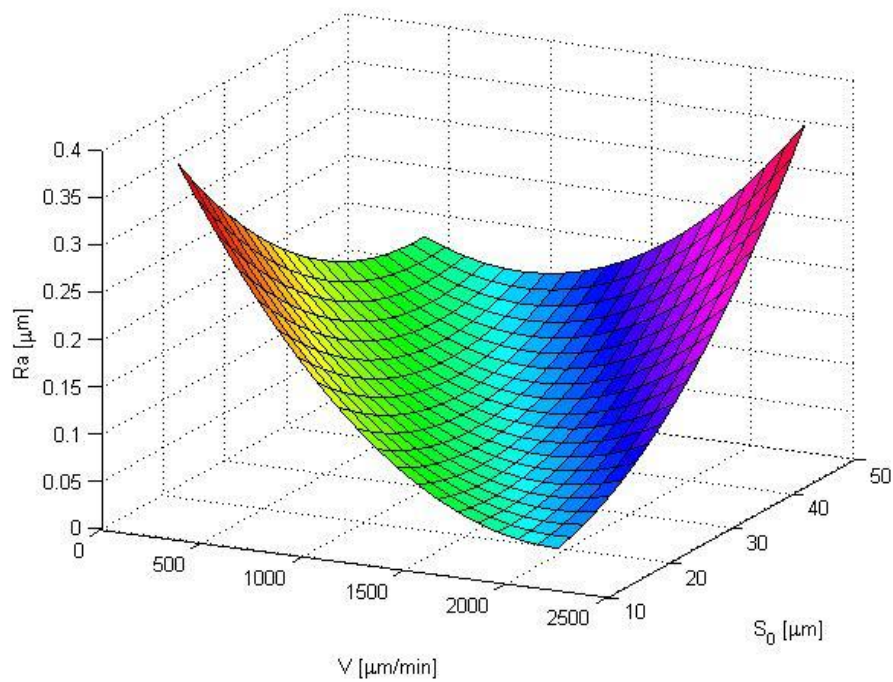
Wartość statystyki $F = 1,02$, $F_k = 4,059963$

$$F < F_k$$

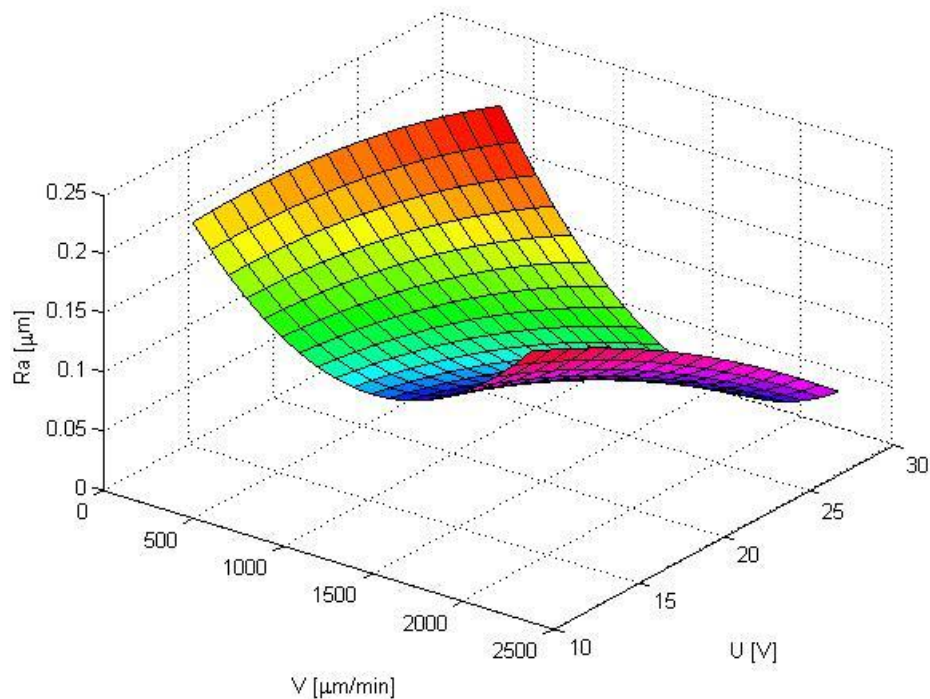
a zatem funkcja jest adekwatna.



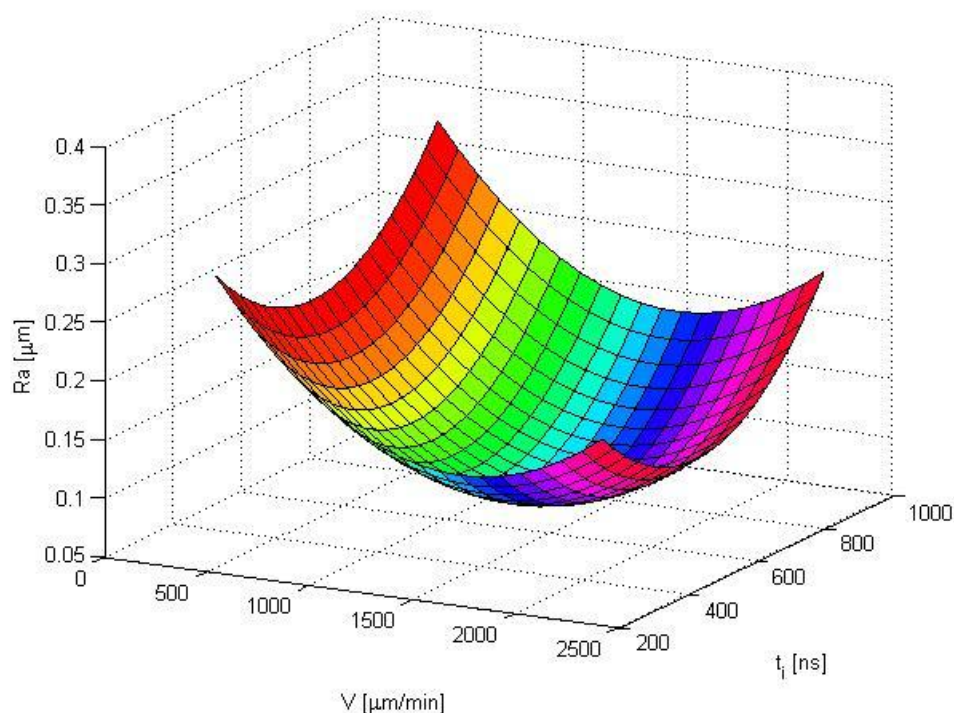
Rys. 100. Zależność parametru chropowatości Ra od napięcia międzyelektrodowego U i czasu impulsu t_i ; elektroda W, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $S_0 = 30 \mu\text{m}$.



Rys. 101. Zależność parametru chropowatości Ra od prędkości posuwu elektrody V_f i grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 ; elektroda W, $U = 20$ V, $t_i = 550$ ns.



Rys. 102. Zależność parametru chropowatości Ra od prędkości posuwu elektrody V_f i napięcia międzyelektrodowego U ; elektroda W, $t_i = 550$ ns, $S_0 = 30$ μm .



Rys. 103. Zależność parametru chropowatości Ra od prędkości posuwu V_f i czasu impulsu t_i ; elektroda W, $S_0 = 30 \mu\text{m}$, $U = 20 \text{ V}$.

W przypadku parametru chropowatości Ra można zauważyć, że (rys. 101 – 103):

- przy wzroście napięcia międzyelektrodowego i przy krótkich czasach impulsów Ra maleje;
- zwiększanie prędkości posuwu elektrody i zmniejszanie grubości szczeliny międzyelektrodowej powoduje zmniejszanie się Ra ;
- zwiększanie prędkości posuwu i wartości napięcia powoduje, że parametr chropowatości Ra maleje.

Model dla współczynnika obrabialności elektrochemicznej η_{kv} :

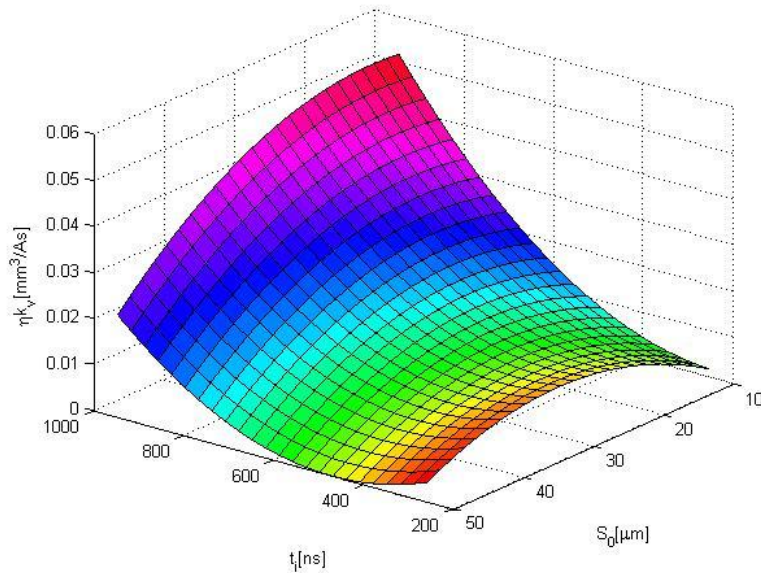
$$\eta_{kv} = -0,033 + 1,01 \cdot 10^{-5} \cdot V_f + 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot U + 3,4 \cdot 10^{-5} \cdot t_i + 5,7 \cdot 10^{-4} \cdot S_0 - 8,9 \cdot 10^{-8} \cdot V_f \cdot U - 2,4 \cdot 10^{-9} \cdot V_f \cdot t_i + 8,07 \cdot 10^{-8} \cdot V_f \cdot S_0 - 1,6 \cdot 10^{-7} \cdot U \cdot t_i + 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot U \cdot S_0 - 5,7 \cdot 10^{-7} \cdot t_i \cdot S_0 - 2,7 \cdot 10^{-9} \cdot V_f^2 - 2,17 \cdot 10^{-5} \cdot U^2 - 5,26 \cdot 10^{-9} \cdot t_i^2 - 9,36 \cdot 10^{-6} \cdot S_0^2$$

W kategoriach statystycznych wszystkie współczynniki wielomianu zostały uznane za istotne.

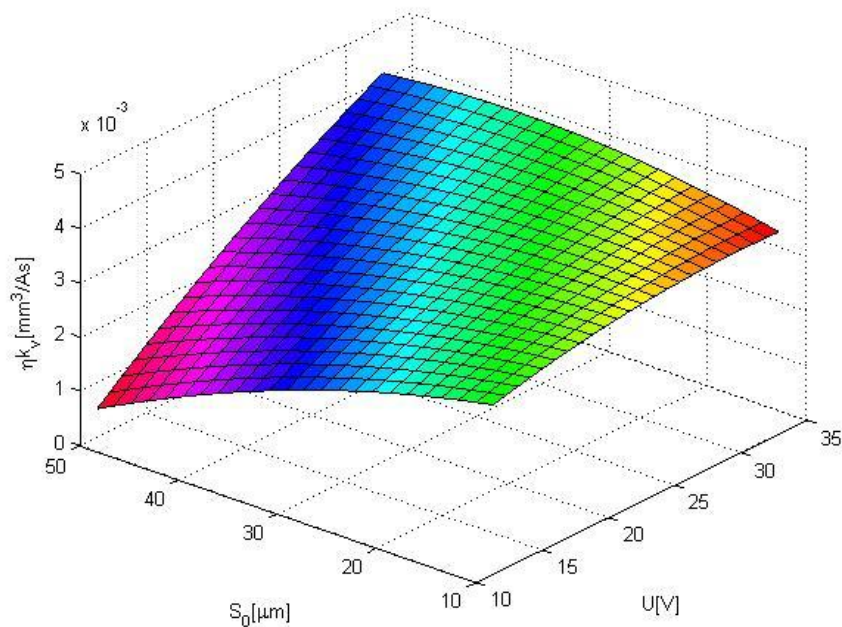
Wartość statystyki $F = 3,534$, $F_k = 4,059963$

$$F < F_k$$

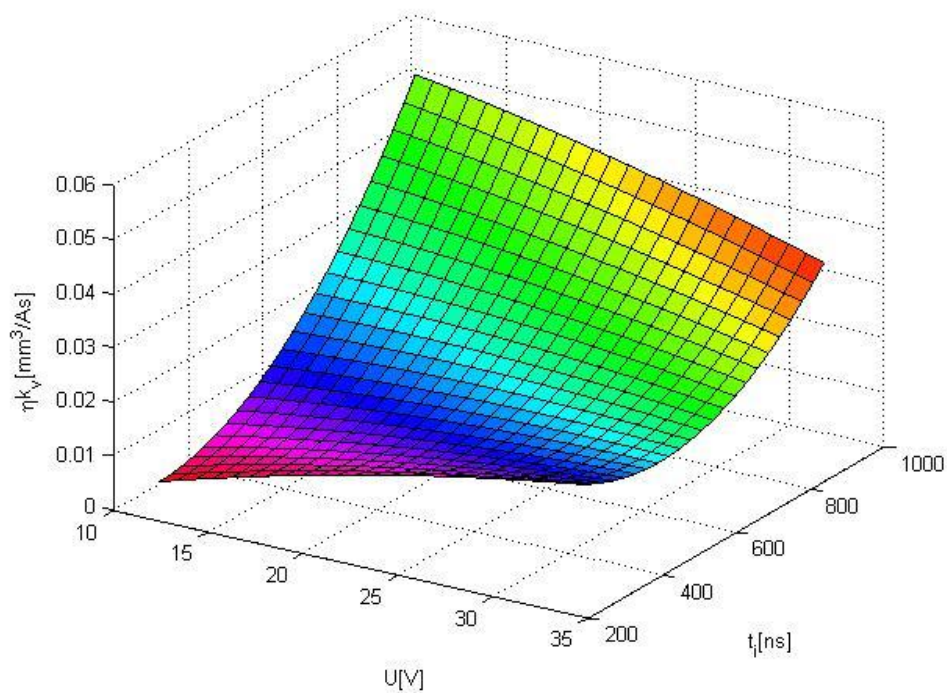
a zatem funkcja jest adekwatna.



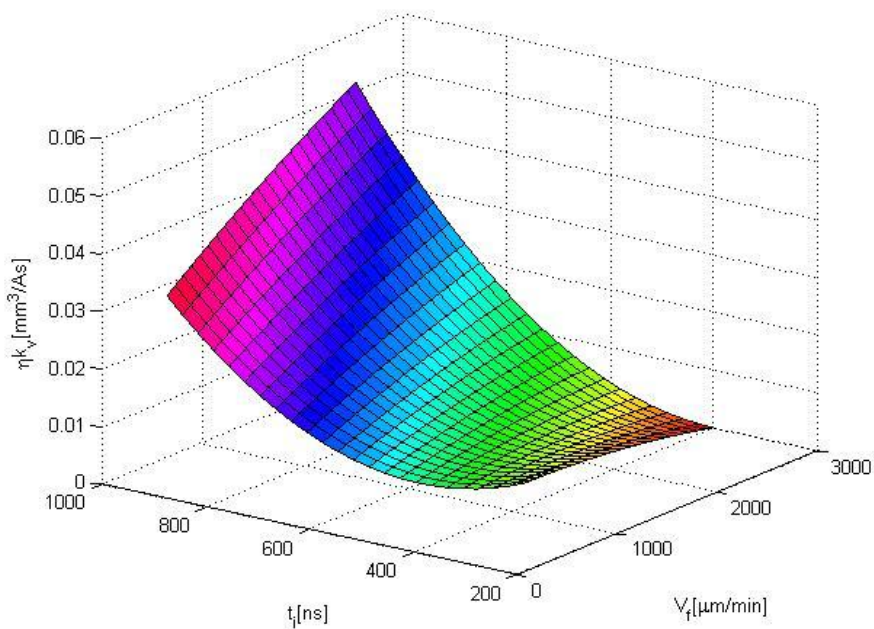
Rys.104. Zależność współczynnika obrabialności η_{kv} od długości impulsu roboczego t_i i grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 ; elektroda W, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $U = 20$ V.



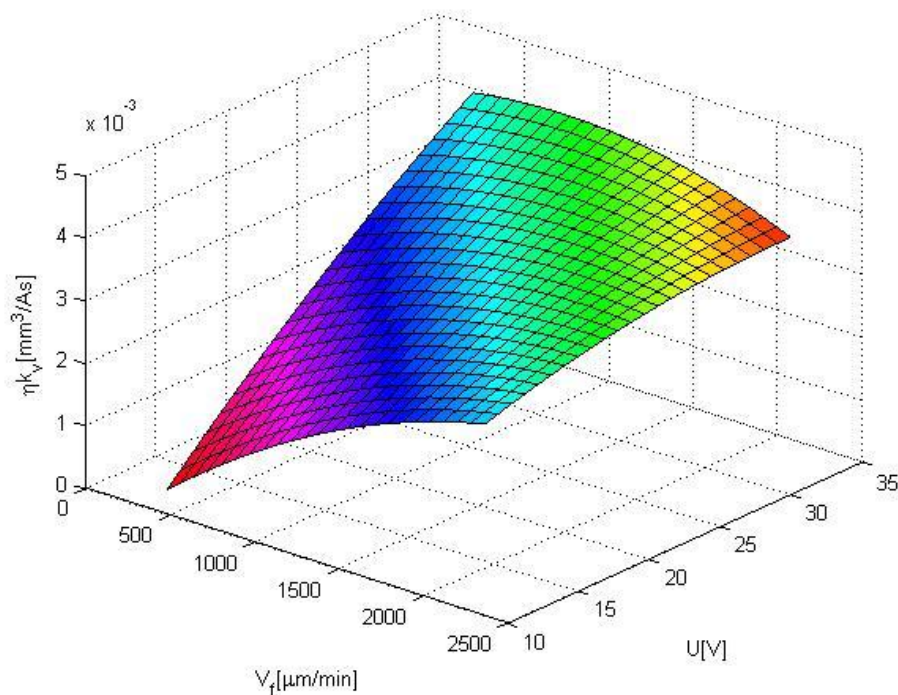
Rys. 105. Zależność współczynnika obrabialności η_{kv} od napięcia międzyelektrodowego U i grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 ; elektroda W, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $t_i = 550$ ns.



Rys. 106. Zależność współczynnika obrabialności ηk_v od napięcia międzyelektrodowego U i długości impulsu roboczego t_i ; elektroda W, $V_f = 1500 \mu\text{m}/\text{min}$, $S_0 = 30 \mu\text{m}$.



Rys. 107. Zależność współczynnika obrabialności ηk_v od prędkości posuwu elektrody V_f i długości impulsu roboczego t_i ; elektroda W, $S_0 = 30 \mu\text{m}$, $U = 20 \text{ V}$.



Rys. 108. Zależność współczynnika obrabialności ηk_v od prędkości posuwu elektrody V_f i napięcia międzyelektrodowego U ; elektroda W, $S_0 = 30 \mu\text{m}$, $t_i = 550 \text{ ns}$.

W przypadku współczynnika obrabialności ηk_v można zauważyć, że (rys. 104 – 108):

- rośnie on wraz ze spadkiem grubości szczeliny międzyelektrodowej i ze wzrostem długości impulsu roboczego;
- również wzrost napięcia powoduje wzrost współczynnika obrabialności;
- wzrost prędkości posuwu elektrody powoduje spadek współczynnika obrabialności.

Analiza statystyczna wyników pomiarów wielkości geometrycznych struktur wykonanych w trakcie badań doświadczalnych pokazała, że wszystkie badane czynniki wejściowe mają wpływ na wielkości wyjściowe. Jest to zgodne z przewidywaniami, gdyż zarówno napięcie międzyelektrodowe U , czas impulsu roboczego t_i , grubość szczeliny początkowej S_0 oraz prędkość posuwu V_f , mają duży wpływ na przebieg i wyniki procesu roztwarzania elektrochemicznego. W przedstawionych wynikach, wpływy poszczególnych czynników mają różne natężenie i różny skutek w zależności od tego, które z pozostałych czynników przyjmujemy za stałe, czyli pomiędzy czynnikami wejściowymi obserwujemy silne interakcje.

Przyglądając się otrzymanym wynikom, można dojść do szeregu ogólnych wniosków, dotyczących charakteru powiązań między poszczególnymi parametrami procesu, a uzyskanymi strukturami geometrycznymi:

- Grubość usuniętego naddatku zależy zarówno od napięcia międzyelektrodowego U , jak i czasu impulsu roboczego t_i .
- Grubość szczeliny międzyelektrodowej S_0 oraz prędkość posuwu elektrody V_f również wpływają na grubość usuniętego naddatku.
- Dla pewnych grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 i prędkości posuwu elektrody roboczej V_f , gęstość prądu obróbki jest maksymalna. Sugeruje to, że przy tych wartościach produkty roztwarzania są najszybciej usuwane z obszaru szczeliny, co wystarczająco kompensuje spadek gęstości prądu, związany ze zwiększeniem grubości szczeliny międzyelektrodowej.
- Silny wpływ na chropowatość mierzoną na dnie wykonanego kształtu ma napięcie międzyelektrodowe i długość impulsu roboczego t_i . Zależność ta osiąga swoje maksimum dla pewnych wartości U i t_i .
- Przy dużej prędkości posuwu i małej grubości S_0 parametr Ra jest najmniejszy.
- Zaobserwowano wpływ grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 na chropowatość. Wraz ze wzrostem grubości szczeliny rośnie Ra .

W trakcie tego typu badań nie da się jednoznacznie stwierdzić, który z czynników ma decydujący wpływ na wynik obróbki elektrochemicznej, nie mniej można zauważyć, że napięcie międzyelektrodowe i czas impulsu roboczego mają istotny wpływ na uzyskane efekty. Wynika to z faktu, że im większe napięcie tym więcej materiału może się roztworzyć i im dłużej trwa impuls tym proces ten zachodzi dłużej. Oczywiście proces ten jest modyfikowany przez prędkość posuwu, której zmiana powoduje, że w danym obszarze roztwarzanie zachodzi dłużej lub krócej.

Bardzo duży wpływ na przebieg i wynik obróbki ma proces usuwania produktów roztwarzania ze szczeliny. Przy małych grubościach szczelin ($\sim 10 \mu\text{m}$) pojawia się problem dostarczenia elektrolitu oraz prędkości jego przepływu w obszarze obróbki. Dodatkowo produkty roztwarzania, zarówno stałe jak i gazowe, mogą doprowadzić do spowolnienia, a nawet przerwania procesu w przypadku, gdy tempo ich ewakuacji ze strefy obróbki jest niewystarczające. To powoduje, że może dochodzić do okresowego przerwania procesu roztwarzania lub nierównomiernego roztwarzania i w efekcie powstawania błędów kształtu. Dlatego przy analizie wyników

należy pamiętać o tych zjawiskach, które niekorzystnie wpływają na sam proces i modyfikują wyniki badań.

Istotną kwestią jest stabilność czasowa i amplitudowa impulsów zasilających. Jest to duży problem, zwłaszcza przy impulsach rzędu 100 ns. Bardzo krótki czas impulsu powoduje, że układy realizujące go, muszą działać bardzo szybko. Obserwując impuls można zauważyć, że nie jest on prostokątny, lecz charakteryzuje się pewnym czasem narastaniem. To powoduje, że czas, w którym impuls ma zadaną amplitudę, jest krótszy od czasu całego impulsu. Dlatego czas obróbki z oczekiwaną amplitudą impulsu napięciowego jest krótszy od założonego. Zjawisko to powoduje, że w trakcie trwania impulsu panują warunki nieustalone. Bardzo trudno jest określić ich długość, nie mniej, przy dokładnej analizie zjawisk, nie można pominąć czasu, w którym warunki w trakcie roztwarzania stabilizują się. Przy bardzo krótkich czasach impulsów, w przypadku gdy mają one kształt zbliżony do piłokształtnego, może dojść do sytuacji, w której proces zachodzi cały czas w stanie nieustalonym, a powinien zachodzić w quasiustalonym.

Badania przeprowadzono dla elektrod zrobionych z dwóch rodzajów materiałów: miedzi i wolframu. W obu przypadkach proces zachodził bardzo podobnie, a to znaczy, że rozbieżność w wymiarach uzyskanych struktur była niewielka i nie przekraczała 10%. Jest to o tyle istotne, że elektroda WC jest bardziej odporna na uszkodzenia mechaniczne, a zwłaszcza na odkształcenia w trakcie procesu technologicznego.

5 WYTYCZNE DO PROJEKTOWANIA I REALIZACJI PROCESU TECHNOLOGICZNEGO WYTWARZANIA MIKROELEMENTÓW OBRÓBKĄ ECM – CNC

W niniejszej pracy przedstawiono badania, które stanowią wstępny etap do opracowania podstaw technologii wytwarzania mikroelementów bezstykową impulsową obróbką elektrochemiczną ECM – CNC elektrodą uniwersalną. Nie zmienia to faktu, że wytwarzanie mikroelementów w operacjach drążenia elektrochemicznego jest i będzie wykonywane, jednak trudności spowodowane dostarczaniem i wymianą elektrolitu do strefy obróbki będzie ograniczać tę metodę do wytwarzania mikroelementów o wymiarach zbliżonych do 1 mm i prostych kształtach. Dotychczas podejmowane były prace głównie dotyczące projektowania procesów technologicznych ECM – CNC dla makroelementów [71, 73]. Wymiary charakterystyczne przedmiotu obrabianego poniżej 1 mm powodują, że zmieniają się warunki roztwarzania elektrochemicznego, zaczynają dominować odmienne zjawiska, pojawiają się poważne problemy związane z dokładnością przemieszczeń elektrod, mocowaniem i pozycjonowaniem napędów, dostarczaniem elektrolitu do strefy obróbki, dlatego w przypadku wytwarzania mikroelementów systemy te muszą ulegać modyfikacji. Projektowanie procesu technologicznego obróbki elektrochemicznej w kinematyce frezowania, z uwagi na skomplikowany proces projektowania trajektorii elektrody roboczej, w warunkach przemysłowych musi zostać w pełni zautomatyzowane. Przewiduje się, że tego typu urządzenia będą wyposażone w zautomatyzowane systemy projektowania i realizacji procesów elektrochemicznej obróbki mikroelementów. Tego typu system powinien się składać z następujących elementów:

1. Podsystem wspomagający dobór następujących parametrów roztwarzania elektrochemicznego:
 - skład chemiczny elektrolitu, jego stężenie, temperaturę;
 - czas impulsu roboczego, czas przerwy, grubość szczeliny początkowej, napięcie robocze, prędkość posuwu;
 - grubość usuniętego naddatku, chropowatość, błędy kształtu;
2. Podsystem wspomagający realizację procesu:
 - projektowanie ścieżki narzędzia z uwzględnieniem narzędzia i warunków procesu;

- sterowanie ruchami obrabiarki, sterowanie generatorem impulsów roboczych, dozowaniem elektrolitu, kontrolowaniem jego parametrów;

3. Podsystem kontrolujący i zarządzający realizację procesu.

W skład pierwszego podsystemu powinny wchodzić elementy związane z komputerowym wspomaganie projektowania procesów technologicznych. Najważniejszymi jego składnikami powinny być:

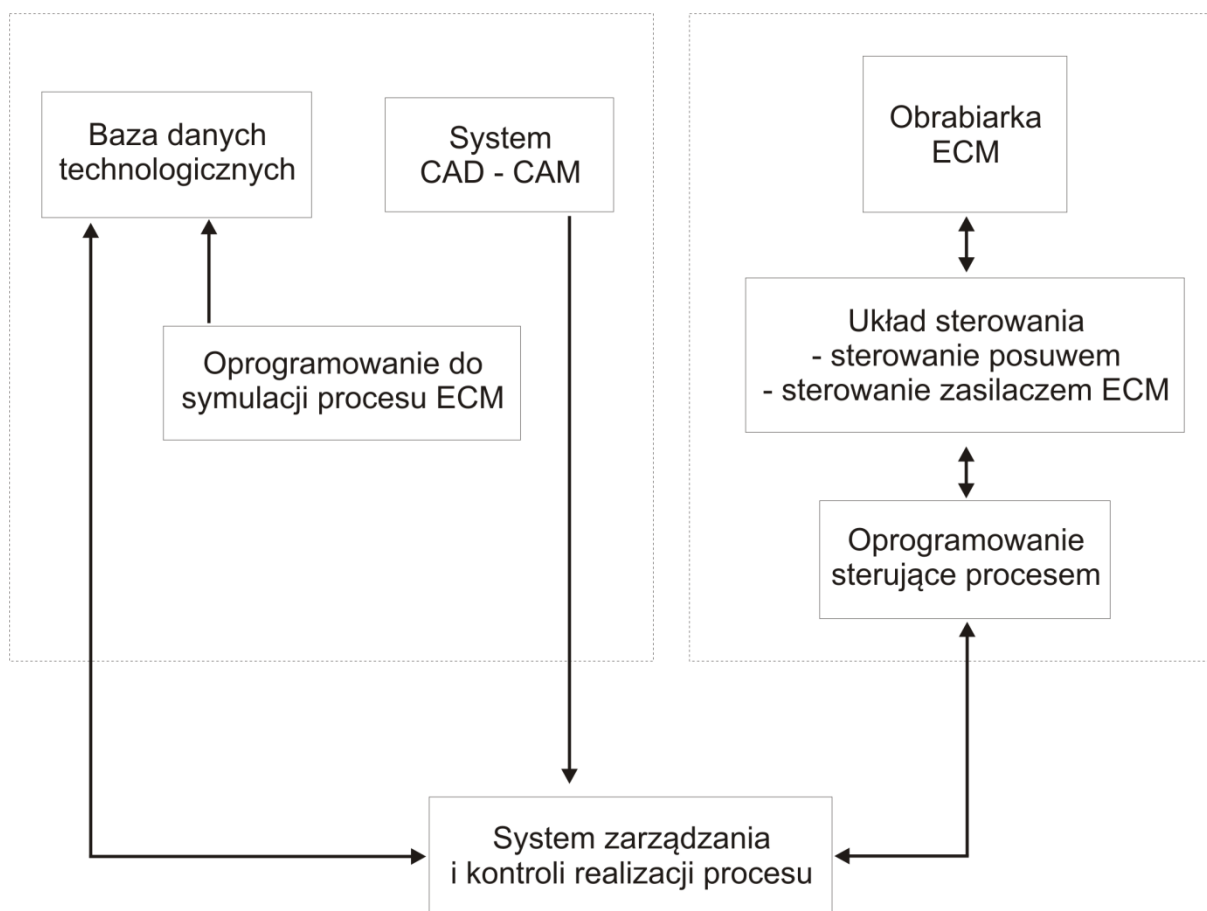
- system typu CAD pozwalający na zaprojektowanie oczekiwanego kształtu;
- program symulujący proces obróbki i pozwalający na dobór parametrów obróbki;
- system typu CAM pozwalający na zaprojektowanie ścieżki narzędzia (umożliwiający przeprowadzenie symulacji procesu obróbki i ewentualne wykrycie błędów);
- baza danych zbierająca informacje technologiczne;

Drugi podsystem powinien zawierać układy bezpośrednio odpowiedzialne za pracę urządzenia. Jego najważniejsze elementy to:

- sterowniki napędów połączone z układem sterowania;
- generator impulsów połączony z układem sterującym parametrami impulsów roboczych;
- obrabiarka, wraz ze wszystkimi napędami, generatorem, obszarem roboczym, doprowadzeniami układu obiegu elektrolitu;

Trzeci system zajmuje się wymianą danych pomiędzy dwoma pozostałymi, gromadzeniem danych na temat procesu obróbki oraz sterowaniem pozostałymi podzespołami systemu: pompami, wentylacją, systemami stabilizacji temperatury.

W ten sposób zaprojektowane systemy powinny dawać możliwości włączenia ich do nadrzędnych układów zarządzania procesem wytwarzania w przedsiębiorstwie, czyli dawać możliwość włączania ich do większego systemu technologicznego, stanowiąc jeden z jego elementów. Powoduje to konieczność stosowania na wejściu i wyjściu całego układu formatu wymiany danych, spójnego z pozostałymi elementami nadrzędnego procesu (rys. 109).



Rys. 109. Schemat systemu komputerowego wspomagania projektowania i realizacji procesu technologicznego.

Tak zbudowany system daje technologowi możliwość zaprojektowania procesu w sposób optymalny. W trakcie tworzenia projektu, powinna następować wymiana danych pomiędzy pierwszym i trzecim podsystemem. Wynikiem ich interakcji jest program sterujący (lub zestaw programów sterujących). Istotną rolę w całym procesie odgrywa technolog, który może uzupełnić lub skorygować dane na temat obróbki swoją własną wiedzą. W momencie powstania program sterujący jest wysyłany do sterownika obrabiarki i następuje realizacja procesu. Program zawiera informacje na temat trajektorii elektrody roboczej i warunków obróbki, czyli wartości takich parametrów jak: U , t_i , t_p , V_f , S_0 . Po jego zakończeniu następuje ocena uzyskanych wyników (pomiar wielkości geometrycznych otrzymanego wyrobu, wydajność obróbki). Informacje te powinny być przekazane do systemu, w celu budowania bazy technologicznej.

Stworzenie takiej bazy jest kluczowe dla optymalizacji procesu. Powinna ona zawierać dane technologiczne dla różnych elektrolitów, materiałów obrabianych i materiałów elektrod. Baza powinna obejmować:

- równania regresji wyznaczone doświadczalnie;
- średnie odchylenia standardowe dla grubości szczeliny S , grubości usuniętego naddatku a , gęstości prądu i , pozwalające na oszacowanie dokładności i wydajności projektowanej obróbki;
- dane na temat uzyskanej powierzchni (parametry Ra , Rz);

Dodatkowym elementem jest program do symulacji procesu obróbki uwzględniający warunki procesu i jego geometrię. Z upływem czasu w bazie powinny pojawiać się informacje na temat zależności pomiędzy wskaźnikami technologicznymi (a , Ra , V), warunkami roztwarzania (ηk_v , E , κ), a parametrami procesu dla różnych kombinacji elektrolitów i materiałów obrabianych.

W oparciu o przeprowadzone badania można zaproponować ogólny algorytm projektowania procesu technologicznego impulsowej obróbki elektrochemicznej mikroelementów ECM – CNC, składającego się z przedstawionych poniżej etapów.

I Analiza danych wejściowych.

Do danych wejściowych można zaliczyć informacje na temat obrabianego materiału (jego rodzaj, gabaryty), wymagania dokładnościowe wykonanego detalu (tolerancje wymiarowe), wymagania dotyczące jakości uzyskanej powierzchni, wymagania związane z kosztami i czasem wykonania elementu, dane techniczne obrabiarki: mechaniczne (zakres posuwów, dokładność, powtarzalność) i elektryczne (zakres napięcia, długości impulsu roboczego), dane na temat elektrod (ich średnic, możliwości wykonania), dane na temat mocowania materiału.

Tego typu analiza, w połączeniu z informacjami z bazy technologicznej, pozwala stwierdzić, czy wykonanie danego elementu jest możliwe i opłacalne z wykorzystaniem metody ECM, ze względu na założoną dokładność, jakość powierzchni i możliwości techniczne obrabiarki. Sposobem oceny dokładności, w przypadku tego typu obróbki, będzie oszacowanie tolerancji grubości usuwanego naddatku a , na podstawie wyników uzyskanych w badaniach doświadczalnych (dokładność szacuje się na podstawie wartości średniego odchylenia standardowego dla a w oparciu o powtórzenia prób z centrum planu). Dodatkową informacją są

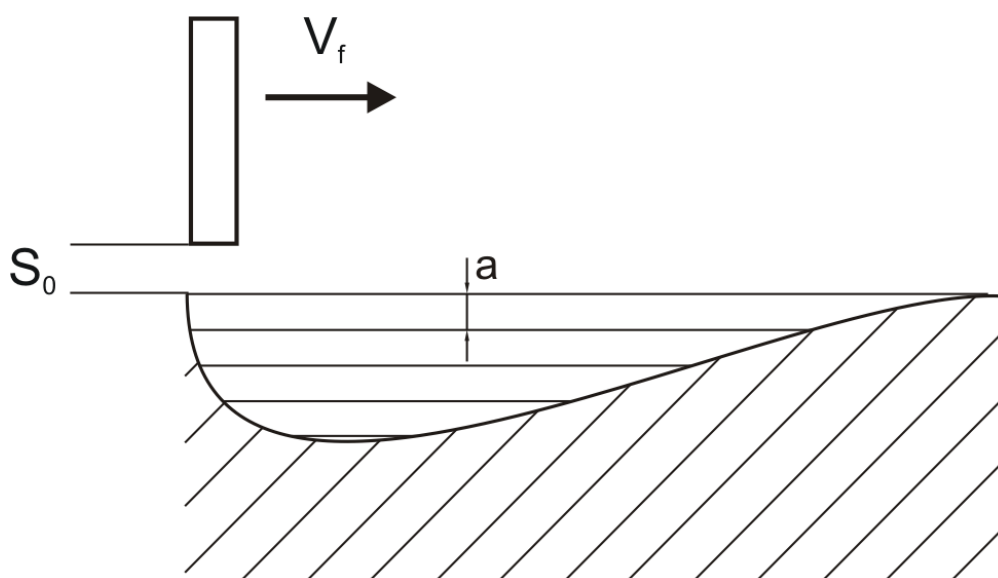
profilogramy rzeczywistych powierzchni obrabianych. Podobnie należy postępować w przypadku oceny jakości powierzchni (parametr Ra).

II Wybór elektrolitu.

Prawidłowy dobór elektrolitu pozwala na uzyskanie maksymalnej wydajności właściwej, minimalnej chropowatości, a także maksymalnej wydajności procesu roztwarzania. Oprócz rodzaju elektrolitu, bardzo duży wpływ na te parametry ma stężenie elektrolitu, jego temperatura, warunki hydrodynamiczne panujące w strefie obróbki oraz zakres napięć, w jakich zachodzi obróbka. Powoduje to, że ustalany jest też zakres napięć roboczych oraz warunki przepływu. Oznacza to, że ustalane są wartości η_{kv} , E , κ . Czynniki te decydują o procesie roztwarzania, a także o dokładności komputerowej symulacji, czyli decydują o czasochłonności i kosztach projektowania procesu.

III Wybór kształtu i wymiarów elektrody roboczej.

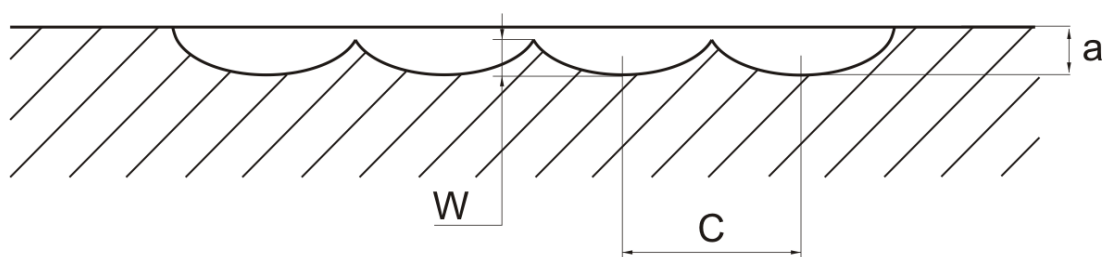
W przypadku impulsowej obróbki elektrochemicznej mikroelementów stosuje się elektrody o średnicach mniejszych niż 1 mm. Ponieważ kształtowanie czoła elektrody o takich wymiarach jest niezwykle trudne, dlatego stosuje się elektrody walcowe z płaskim czołem lub elektrody dyskowe.



Rys. 110. Schemat obróbki krzywoliniowej powierzchni kształtowej, a – grubość usuniętej warstwy.

IV Trajektoria elektrody roboczej.

W przypadku obróbki ECM mikroelementów elektrodą walcową materiał będzie usuwany warstwa po warstwie. Z tego powodu, aby wykonać zaprojektowany kształt, należy tak dobrać kolejne płaszczyzny interpolacji, żeby zminimalizować błędy kształtu. Kontrolując prędkość posuwu elektrody, grubość szczeliny początkowej oraz napięcie międzyelektrodowej, można kontrolować błędy kształtu. W trakcie projektowania trajektorii elektrody bardzo pomocne jest oprogramowanie symulujące proces obróbki elektrochemicznej. Odległość między płaszczyznami interpolacji dobiera się zwykle ze względu na falistość powierzchni, tak by nie przekroczyć jej wartości dopuszczalnej. Należy pamiętać, że będzie ona występować na wszystkich powierzchniach prostopadłych do kierunku posuwu elektrody. Na rys. 110 przedstawiona jest przykładowa trajektoria elektrody roboczej.



Rys.111. Przekrój powierzchni po obróbce elektrodą walcową wierszowaniem, a – grubość usuniętego naddatku, W – wysokość falistości, C – odległość między kolejnymi przejściami elektrody.

V Opracowanie postprocesora dla układu sterowania.

W przypadku impulsowej obróbki elektrochemicznej mikroelementów konieczne jest opracowanie dedykowanego postprocesora. Jest to spowodowane faktem, że tego typu technologia dopiero jest tworzona, dlatego brak jest producentów robiących tego typu postprocesory. W przypadku obróbki elektrochemicznej, postprocesor musi uwzględniać specyfikę obróbki elektrochemicznej, czyli np. możliwość zmiany prędkości posuwu, grubości szczeliny międzyelektrodowej, okresowego zatrzymania posuwu, wyłączenia napięcia, zmierzenia szczeliny międzyelektrodowej. To wszystko powoduje, że postprocesor jest bardzo mocno rozbudowany, a jego wykonanie czasochłonne.

VI Wykonanie serii wyrobów próbnych.

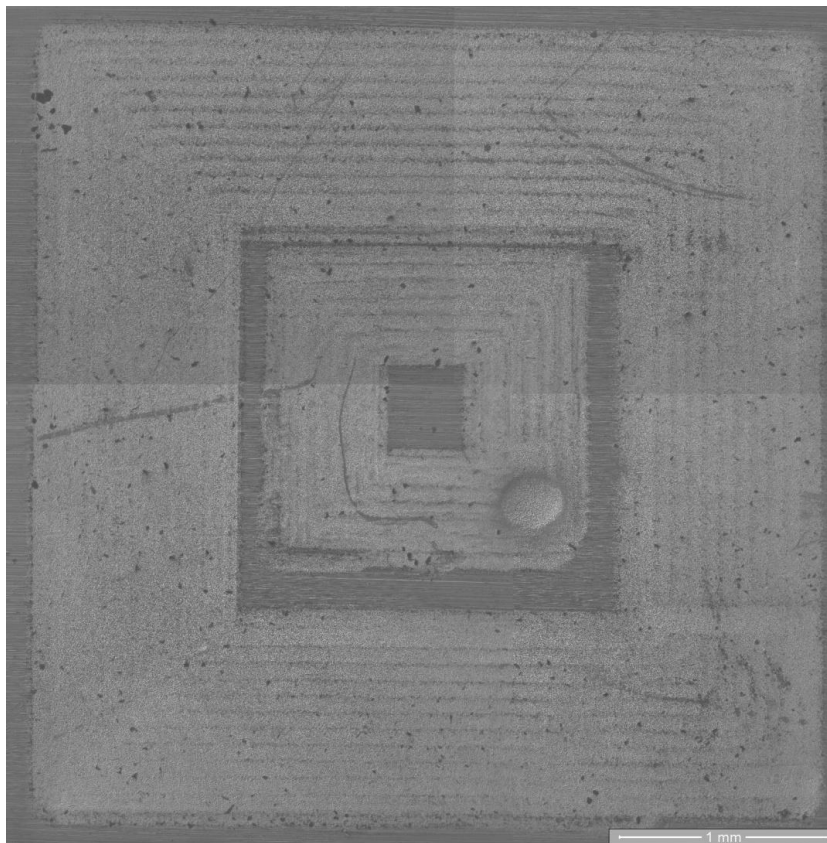
VII Pomiar i analiza danych.

VII Wprowadzenie poprawek.

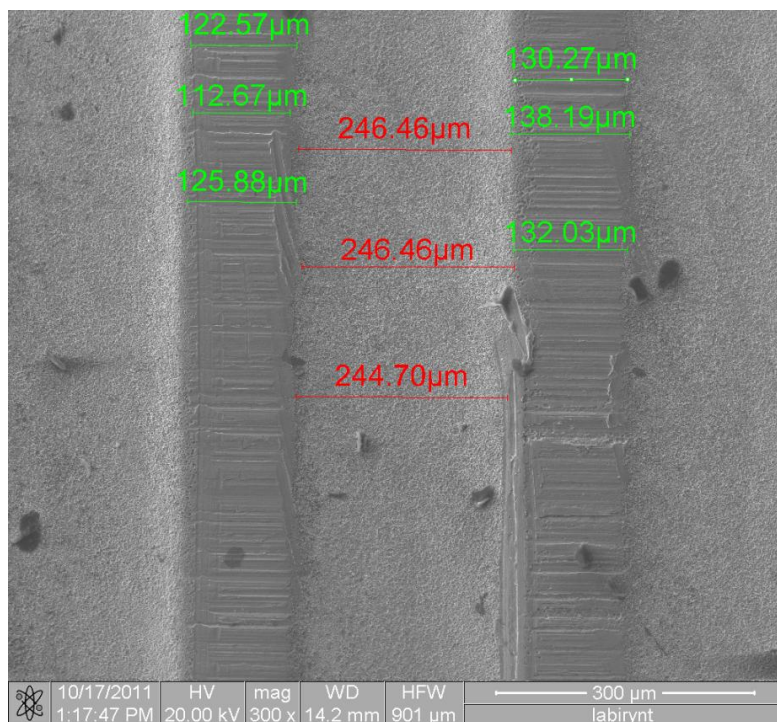
IX Wykonanie serii wyrobów gotowych.

Jednym z najważniejszych elementów systemu projektowania procesów jest baza danych technologicznych. Dzięki niej możliwy jest prawidłowy dobór parametrów procesu, tak by sprostać wytycznym. Stworzenie takiej bazy jest procesem pracochłonnym, czasochłonnym, a co za tym idzie kosztownym. Jednak jej brak lub niekompletność danych, powoduje, że osiągnięcie założonych parametrów musi być wykonane za pomocą kolejnych przybliżeń, co zwiększa koszty projektowania procesu, a co za tym idzie koszty wykonania gotowego wyrobu.

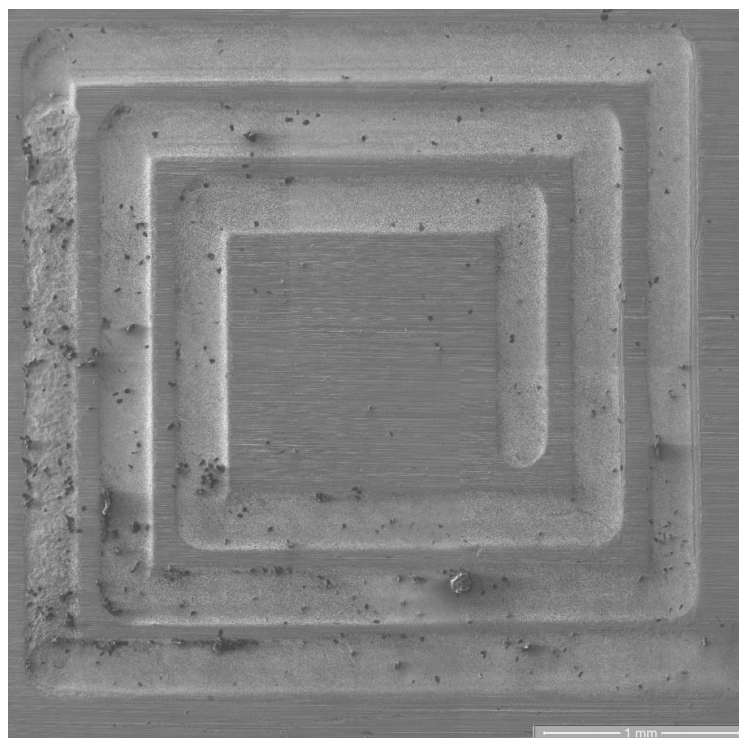
Poniżej pokazano zdjęcia przykładowych struktur, których proces technologiczny opracowano w oparciu o uzyskane wyniki (rys.112 - 114).



Rys.112. Przykład struktury wykonanej za pomocą impulsowej obróbki elektrochemicznej. Elektroda Cu, $d=200\ \mu\text{m}$, $t_i=500\ \text{ns}$, $t_p=1000\ \text{ns}$, $V_f=1500\ \mu\text{m}/\text{min}$, $U=20\ \text{V}$, $S_0=30\ \mu\text{m}$.



Rys. 113. Przykład struktury wykonanej za pomocą impulsowej obróbki elektrochemicznej. Elektroda Cu, $d=200 \mu\text{m}$, $t_i=500 \text{ ns}$, $t_p=1000 \text{ ns}$, $V_f=1500 \mu\text{m/min}$, $U=20 \text{ V}$, $S_0=30 \mu\text{m}$.



Rys.114. Przykład struktury wykonanej za pomocą impulsowej obróbki elektrochemicznej. Elektroda Cu, $d=200 \mu\text{m}$, $t_i=500 \text{ ns}$, $t_p=1000 \text{ ns}$, $V_f=1500 \mu\text{m/min}$, $U=20 \text{ V}$, $S_0=30 \mu\text{m}$.

6 PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Celem pracy było głębsze poznanie i opanowanie procesu elektrochemicznego kształtowania mikroelementów obróbką impulsową oraz stworzenie podstaw teoretycznych i doświadczalnych do projektowania procesów technologicznych.

Zakres prac obejmował:

- analizę zjawisk w strefie obróbki oraz ich uproszczony opis matematyczny,
- opracowanie uproszczonego modelu matematycznego procesu mikroobróbki, a następnie zbudowanie na jego podstawie modelu numerycznego pozwalającego na przeprowadzenie symulacji komputerowej procesu,
- opracowanie koncepcji stanowiska do badań,
- dobór, opracowanie i uruchomienie podstawowych zespołów stanowiska (układ napędowy, układ sterowania, oprogramowanie sterujące, układ obiegu elektrolitu),
- opracowanie metod pomiaru,
- przeprowadzenie badań i opracowanie matematycznego modelu statystycznego procesu,
- weryfikacja dedukcyjnego modelu matematycznego na podstawie przeprowadzonych badań,
- opracowanie wytycznych do projektowania procesów technologicznych impulsowej obróbki elektrochemicznej mikroelementów,
- opracowanie wytycznych do projektowania i realizacji procesu technologicznego obróbki elektrochemicznej mikroelementów.

Tak zrealizowana praca pozwoli na dalsze poznanie procesu impulsowej obróbki elektrochemicznej mikroelementów, a opracowany model matematyczny oraz bazujące na nim oprogramowanie umożliwi precyzyjniejsze i szybsze projektowanie procesów technologicznych związanych z omawianym zagadnieniem.

Analizę zjawisk zachodzących w obszarze obróbki przeprowadzono na podstawie danych literaturowych oraz własnych badań rozpoznawczych, których wyniki zostały częściowo opublikowane, a ich przydatność zweryfikowana przez dyskusje na krajowych i zagranicznych konferencjach. Proces impulsowej obróbki elektrochemicznej mikroelementów, czyli elementów o wymiarach poniżej 1 mm, jest trudny do opisu matematycznego z uwagi na fakt występowania w nim złożonych

zjawisk, związanych z transportem masy i ładunku elektrycznego w przepływającym elektrolicie. Rozkład pola elektrycznego, pola prędkości przepływu elektrolitu, rozkład jego temperatury, rozkład koncentracji objętościowej wodoru, rozkład właściwości elektrolitu - są to rozkład losowe, niestacjonarne i trójwymiarowe. Z tego względu do rozważań przyjęto model uproszczony (prace zespołu prof. J. Kozaka), który nie uwzględniał wpływu wzrostu temperatury w obszarze szczeliny międzyelektrodowej i koncentracji wodoru w szczelinie oraz grubość usuniętego naddatku. Z tego względu przeprowadzono analizę wpływu wydzielania wodoru na badany proces. W oparciu o jej wyniki, można wprowadzić poprawki do obliczeń przeprowadzonych w oparciu o model uproszczony. Z uwagi na trudności w opisie matematycznym złożonych zjawisk fizyko – chemicznych zachodzących w obszarze obróbki, skoncentrowano się na wprowadzeniu poprawek do oprogramowania do symulacji komputerowej badanego procesu (model numeryczny procesu). Stosując wyżej wymienione oprogramowanie przeprowadzono symulację komputerową procesu, a jej wyniki wykorzystano w założeniach do budowy stanowiska badawczego oraz badań doświadczalnych. Po wnikliwym zapoznaniu się ze stanem badań procesu impulsowej obróbki elektrochemicznej mikroelementów, przystąpiono do budowy stanowiska przystosowanego do jego specyfiki. Następnie wykonano na nim badania, na podstawie których został opracowany matematyczny model statystyczny procesu.

Stanowisko powstało jako prototyp obrabiarki do mikroobróbki elektrochemicznej. Kluczowym jego elementem jest generator elektrochemiczny, którego budowa i parametry w dużej mierze decyduje o jakości i wydajności obróbki. Pozwala on na generowanie impulsów w zakresie od 100 ns, do 1,5 μ s.

W budowie stanowiska badawczego można wyróżnić kilka istotnych elementów składowych. Najważniejsze z nich, zarówno z punktu widzenia funkcjonalnego, jak i konstrukcyjnego, to:

- część mechaniczna obrabiarki,
- układ generowania impulsów roboczych,
- układ sterowania ruchami roboczymi,
- układ obiegu elektrolitu,
- układ kształtowania elektrody roboczej.

Podstawowymi problemami w impulsowej obróbce elektrochemicznej są:

- stabilność pracy napędów,
- dokładność i powtarzalność przemieszczeń elektrody roboczej i przedmiotu obrabianego,
- dokładność mocowania i pozycjonowania elektrody i przedmiotu,
- pomiar grubości szczeliny międzyelektrodowej,
- powtarzalność czasu impulsu roboczego, jego amplitudy oraz czasu przerwy między impulsami.

Urządzenia do wytwarzania mikroelementów muszą spełniać bardzo wysokie wymagania jeśli chodzi o dokładność wykonania, powtarzalność ruchów czy odporność na drgania. Są one podobne do stawianych urządzeniom do pomiaru wielkości geometrycznych. Powoduje to, że w obrabiarkach, na których wykonywane są procesy mikroobróbki wykorzystuje się rozwiązania sprawdzone w precyzyjnych urządzeniach pomiarowych. W stanowisku badawczym zastosowano tego typu rozwiązania, m. in.: granitowy korpus, wibroizolatory. Jednym z ważniejszych problemów związanych z obróbką elektrochemiczną mikroelementów jest bardzo agresywne środowisko panujące w obszarze zachodzenia procesu. Degradujący wpływ roztworów soli i kwasów stawiał wysokie wymagania materiałom użytym do budowy obszaru obróbki. Dodatkowo należało zapewnić izolację elementów mechanicznych obrabiarki od wpływu elektrolitu.

Autor niniejszej pracy uczestniczył aktywnie w:

- opracowaniu koncepcji stanowiska oraz koncepcji realizowania na nim procesów obróbkowych,
- opracowaniu założeń konstrukcyjnych,
- opracowaniu koncepcji mocowania, pozycjonowania i wykonania na obrabiarce elektrod roboczych,
- opracowaniu koncepcji układu obiegu elektrolitu,
- wytypowaniu i zakupie gotowych zespołów (np.: napędy, generator, układ obserwacyjny itp.)
- montażu i uruchomieniu stanowiska,

Ponadto samodzielnie opracował koncepcję działania urządzenia oraz programy sterujące jego pracą. Dysponując stanowiskiem obróbkowym, opracowano koncepcję badań, wybrano plan badań oraz metody i technikę pomiarów, co miało

podstawowe znaczenie dla uzyskania wyników przydatnych do projektowania procesów technologicznych. Wyniki badań opracowano statystycznie, zgodnie z zasadami teorii eksperymentu i przedstawiono w postaci równań regresji oraz wykresów. W równaniach regresji uwzględniono tylko istotne współczynniki. Następnie zweryfikowano adekwatność tych równań i dokonano porównania z wynikami symulacji.

Równania regresji stanowią statystyczny model matematyczny badanego procesu, który będzie wykorzystywany w projektowaniu procesów technologicznych. Wyniki badań są ważne tylko dla warunków, w których je przeprowadzono. Dlatego bardzo istotne jest to, że opracowano metodykę, według której można badania prowadzić dla innych elektrolitów i materiałów i w ten sposób budować bazę danych doświadczalnych do projektowania procesów technologicznych.

Następnie uwzględniając wyniki pracy (analiza zjawisk zachodzących w obszarze obróbki, uproszczony model matematyczny, cechy konstrukcyjno – technologiczne stanowiska do badań, matematyczny model statystyczny badanego procesu) opracowano wytyczne do projektowania procesów technologicznych złożonych mikroelementów. W oparciu o uzyskane wyniki opracowano proces technologiczny i wykonano przykładowe mikroelementy (rys.112 - 114).

Wnioski o charakterze poznawczym

1. Statystyczny model matematyczny, zbudowany na podstawie badań doświadczalnych, dał możliwość określenia wpływu parametrów procesu na geometrię uzyskanych struktur.
2. Obserwacja procesu impulsowej obróbki elektrochemicznej impulsami rzędu 100 ns pokazuje, że w jej trakcie tworzy się faza gazowa i jej uwzględnienie w modelu matematycznym jest zasadne, chociaż niezwykle trudne z uwagi na nieokreśloność przepływu elektrolitu.
3. Wzrost napięcia międzyelektrodowego U powoduje wzrost gęstości prądu roztwarzania i , a co za tym idzie prędkości roztwarzania, grubości szczeliny międzyelektrodowej i grubości usuniętego naddatku.
4. Zwiększenie grubości szczeliny początkowej S_0 powoduje zmniejszenie gęstości prądu roztwarzania, a co za tym idzie grubości usuniętego naddatku.
5. Zwiększenie czasu impulsu t_i powoduje wzrost grubości szczeliny i grubości usuniętego naddatku a .

6. Wraz ze wzrostem gęstości prądu maleje chropowatość powierzchni. R_a zależy od polaryzacji E . Ze wzrostem grubości szczeliny międzyelektrodowej rośnie E i grubość warstwy dyfuzyjnej δ , a to powoduje wzrost parametru R_a .
7. Badania pokazały silne interakcje pomiędzy czynnikami wejściowymi.
8. Struktura obrabianego materiału ma duży wpływ na wskaźniki użytkowe wykonanego detalu.
9. Decydujące znaczenie dla procesu roztwarzania elektrochemicznego mają warunki panujące w obszarze szczeliny międzyelektrodowej. W przypadku zaburzenia przepływu elektrolitu, zbyt dużego zanieczyszczenia szczeliny produktami roztwarzania czy trudności z dostarczeniem elektrolitu do strefy obróbki, może dojść do przerwania procesu roztwarzania. Dlatego bardzo ważnym jest zapewnienie dobrego przepływu elektrolitu przez szczelinę międzyelektrodową.

Wnioski o charakterze użytkowym

1. Przeprowadzone badania wykazały przydatność impulsowej obróbki elektrochemicznej do kształtowania mikroelementów.
2. Bardzo ważną kwestią jest zapewnienie stabilności pracy układów zasilacza impulsowego. Przy czasach impulsów w granicach 100 ns czas formowania impulsu napięciowego jest znaczny, co powoduje, że impuls nie jest prostokątny. Stałość czasu impulsów i przerw między nimi jest bardzo istotna dla zapewnienia powtarzalności procesu.
3. Przy średnicy elektrody rzędu 200 μm lub mniejszej, ważną kwestią staje się jej sztywność. Zarówno proces jej montowania w głowicy roboczej, procedura wykrywania styku, jak i przepływ elektrolitu, może doprowadzić do zaburzenia jej geometrii, a nawet ją zniszczyć.
4. Zautomatyzowanie procesu obróbki, z zastosowaniem pomiaru grubości szczeliny międzyelektrodowej co ustalony interwał czasowy, prowadzi do poprawy jakości wykonanych elementów.
5. Ze względu na szkodliwe właściwości elektrolitu, jego układ obiegu musi być zamknięty.
6. W układzie obiegu elektrolitu należy stosować filtry, dzięki czemu wypłukane ze szczeliny międzyelektrodowej produkty roztwarzania nie będą do niej ponownie wprowadzane.

Wnioski do dalszych badań

1. Celowym jest opracowanie systemu komputerowego wspomaganie projektowania i realizacji procesu ECM mikroelementów.
2. Prace doświadczalne w zakresie impulsowej obróbki elektrochemicznej mikroelementów są niezwykle trudne, czasochłonne i kosztowne. Należy zatem prowadzić prace nad doskonaleniem matematycznego modelu dedukcyjnego oraz oprogramowania do symulacji procesu. Adekwatny do wyników badań model dedukcyjny i numeryczny umożliwią wstępne projektowanie procesu, a badania doświadczalne ograniczą się wówczas tylko do sprawdzenia wyników symulacji.
3. Celowym jest podjęcie próby realizacji impulsowej obróbki elektrochemicznej dla czasów impulsów napięcia z przedziału $\sim 1 - 100$ ns, co pozwoliłoby na zwiększenie rozdzielczości procesu, a co za tym idzie wykonywanie struktur o wymiarach charakterystycznych nawet poniżej $1\mu\text{m}$.
4. Przeprowadzenie badań dla czasów impulsu napięcia z przedziału $1 - 100$ ns wymaga modernizacji stanowiska do badań, szczególnie w zakresie dokładności i powtarzalności ruchów roboczych, dokładności pozycjonowania i mocowania elektrod itp.
5. Wraz ze zmniejszaniem się wymiarów wykonywanych mikrokształtów konieczne jest stosowanie elektrod roboczych o mniejszych wymiarach. Zatem konieczne jest prowadzenie prac dotyczących wykonania takich elektrod oraz sposobów zapewnienia ich sztywności.
6. Warunkiem realizacji procesu ECM jest zapewnienie optymalnego przepływu elektrolitu w obszarze obróbki. Konieczne jest zatem prowadzenie prac mających na celu poprawę warunków przepływu elektrolitu, np. przez wprowadzenie drgań ultradźwiękowych elektrody.
7. Do projektowania procesów w warunkach przemysłowych istotne jest stworzenie bazy technologicznej przez wyznaczenie wskaźników technologicznych procesu dla różnych elektrolitów i różnych materiałów przedmiotu obrabianego, szczególnie dla impulsów napięcia krótszych niż 100 ns.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] B. Bhattacharyya, S. Mitra, A. K. Boro. *Electrochemical machining: new possibilities for micromachining*. Robotics and Computer Integrated Manufacturing 18: 283 – 289, 2002.
- [2] B. Bhattacharyya, M. Malapati, J. Munda. *Experimental study on electrochemical micromachining*. Journal of Materials Processing Technology 169: 485 – 492, 2005.
- [3] B. Bhattacharyya, J. Munda. *Experimental investigation into electrochemical micromachining (EMM) process*. Journal of Materials Processing Technology 140: 287 – 291, 2003.
- [4] B. Bhattacharyya, J. Munda, and M. Malapati. *Advancement in electrochemical micro-machining*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44(15):1577 - 1589, 2004.
- [5] M. Bossak, J. Kozak, J. Szmidt. *Prognoza rozwoju mikro i nanotechnologii w Polsce w latach 2004-2007 (w aspekcie zastosowań w budowie i eksploatacji maszyn)*. Technical report, Ekspertyza dla KBM-PAN, 2004.
- [6] X. Cheng, K. Nakamoto, M. Sugai, S. Matsumoto, Z.G. Wang, K. Yamazaki. *Development of ultra-precision machining system with unique wire EDM tool fabrication system for micro/nano-machining*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 57(1): 415 - 420 , 2008.
- [7] S.H. Choi, S.H. Ryu, D.K. Choi, C.N. Chu. *Fabrication of WC micro-schaft by using electrochemical etching*. Int J Adv Manuf Technol 31: 682 – 687, 2007.
- [8] H. Hocheng, P.S. Kao, S. C. Lin. *Development of the eroded opening during electrochemical boring of hole*. Int J Adv Manuf Technol 25: 1105-1112, 2005.
- [9] S. van Damme, G. Nelissen, B. van den Bossche, J. Deconinck. *Numerical model for predicting the efficiency behavior during pulsed electrochemical machining of steel in NaNO₃*. Journal of Applied Electrochemistry 36: 1 – 10, 2006.
- [10] M. Datta, D. Harris. *Electrochemical micromachining: An environmentally friendly, high speed processing technology*. Electrochimica Acta, 42(20-22):3007 - 3013, 1997. Electrochemical Microsystem Technologies.
- [11] M. Datta, D. Landolt. *Fundamental aspects and applications of electrochemical microfabrication*. Electrochimica Acta, 45: 2535 – 2558, 2000.

- [12] De Silva A., McGeough J.A.: *Process monitoring of electrochemical micromachining*. Proc. 1st Int.Conf. MMSS '97, Kraków, 1998, s. 243-252.
- [13] DeSilva A., Altena H., McGeough J.: *Precision ECM by Process Characteristic Modelling*. Annals of the CIRP Vol 49/1/2000.
- [14] A. De Silva, H. Altena, J.A. McGeough. *Precision ecm through empirical modeling of process characteristics*. In Proceed. of the 2nd Int. Conf. On Machining and Measurements of Sculptured Surfaces, pages 381 – 394, Kraków, 2000.
- [15] A. D. Davydov, V. M. Volgin, and V. V. Lyubimov. *Electrochemical machining of metals: Fundamentals of electrochemical shaping*. Russian Journal of Electrochemistry, 40(12):1230-1265, 2004.
- [16] A.D. Davydov and J. Kozak. *Vysokoskorostnoje elektrochimizheskoje formoobrazovanie*. Nauka, Moskwa, 1990.
- [17] D. Dornfeld, S. Min, and Y. Takeuchi. *Recent advances in mechanical micromachining*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 55(2):745-768, 2006.
- [18] Thomas Gmelin et al. *Ecmtec technology & solutions*. Materiały firmy ECMTEC GmbH, 2009.
- [19] B.H. Kim, B.J. Park, S.H. Choi, Y.S. Lee, C.N. Chu. *Application of multiple electrodes in micro-ecm*. 2005.
- [20] B.H. Kim, S.H. Ryu, D.K. Choi, C.N. Chu. *Micro electrochemical milling*. Journal of Micromechanics and Microengineering, 15(1):124-129, 2005.
- [21] K. Chikamori. *Possibilities of electrochemical micromachining*. Int. J. of Japan Soc. Prec. Eng., vol. 32, nr 1, 37-38. 1998.
- [22] E.I. Filatov *The numerical simulation of ECM process in two – dimensional domain*. Materiały konferencyjne EM – 97, Bydgoszcz, 102 – 106, 1997.
- [23] R. Förster, A. Schoth, W. Menz. *Micro – ECM for production of microsystems with a high aspect ratio*. Microsystem Technologies 11: 246 – 249, 2005.
- [24] D. Gulbinowicz. *Mikrokształtowanie elektrochemiczne ultrakrótkimi impulsami*. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 2006 r.
- [25] D. Gulbinowicz, Z. Gulbinowicz, J. Kozak. *Investigations of MICRO electrochemical Machining with ultrashort pulses*. Proceedings of the 5th International Conference of the European society for precision engineering and nanotechnology, 8th – 11th May 2005, Montpellier, France.

- [26] T. R. Idrisov, A. N. Zaitzev, V. P. Zhitnikov. *Estimation of the process localization at the electrochemical machining by microsecond pulses of bipolar current*. Journal of Materials Processing Technology, 149, 479 – 485, 2004.
- [27] J.W. Byun, H.S. Shin, M.H. Kwon, B.H. Kim, C.N. Chu. *Surface Texturing by Micro ECM for Friction Reduction*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Vol. 11, No. 5: 747 – 753, 2010.
- [28] B. Kacprzyński. *Planowanie eksperymentów. Podstawy matematyczne*. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa 1974.
- [29] J. A. Kenney, G. S. Hwang. *Electrochemical machining with ultrashort voltage pulses: modeling of charging dynamics and feature profile evolution*. Nanotechnology 16: 309 – 313, 2005.
- [30] J. A. Kenney, G. S. Hwang. *Two – dimensional computational model of electrochemical micromachining with ultrashort voltage pulses*. Applied Physics Letters Vol. 84 No. 19, 2004.
- [31] J. A. Kenney, G. S. Hwang. *Etch Trends in Electrochemical machining with ultrashort voltage pulses – predictions from theory and simulation*. Electrochemical and Solid – State Letters, 9(1) D1 – D4, 2006.
- [32] V. Kirchner, L. Cagnon, R. Schuster, G. Ertl. *Electrochemical machining of stainless steel microelements with ultrashort voltage pulses*. Applied Physics Letters, 79(11):1721-1723, 2001.
- [33] M. Kock, V. Kirchner, R. Schuster: *Electrochemical micromachining with ultrashort voltage pulses – a versatile method with lithographical precision*. Electrochimica Acta 48 (2003), str. 3213 – 3219.
- [34] M. Kock, V. Klammroth, L. Cagnon, and R. Schuster. *Electrochemical micromachining of steel with ultrashort voltage pulses*. In Proceed. of INSECT 2004, Dusseldorf, 2004.
- [35] G. Kortüm. *Elektrochemia*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1970.
- [36] J. Koryta, J. Dvorák, and V. Bohácková. *Elektrochemia*. PWN, 1980.
- [37] J. Kozak. *Kształtowanie powierzchni obróbką elektrochemiczną – bezstykową (ECM)*. Prace naukowe PW, Mechanika nr 41, Warszawa, 1976.
- [38] J. Kozak. *Mathematical models for computer simulation of electrochemical machining process*. Journal of Materials Processing Technology 76: 170 – 175, 1998.

- [39] J. Kozak. *Thermal models of pulse electrochemical machining*. Bulletin of The Polish Academy of Sciences - Technical Sciences, 52, 2004.
- [40] J. Kozak, K. Łubkowski, J. Perończyk. *Accuracy Problems of the Pulse ECM*. Proceed 22nd MTDR International Conference, Manchester: 353 – 360, 1981.
- [41] J. Kozak and A.D. Davydov. *Two important problems encountered in raising ecm accuracy by using pulse current*. Soviet Electrochemistry, 19(7):867-874, 1983.
- [42] J. Kozak, K.P. Rajurkar, and Y. Makkar. *Study of pulse electrochemical micro machining*. Transactions of North America Manufacturing Research Institute of SME, XXXI,:363-370, 2003.
- [43] J. Kozak, K.P. Rajurkar, and Y. Makkar. *Selected problems of micro – electrochemical machining*. Journal of Materials Processing Technology 149: 426 – 431, 2004.
- [44] J. Kozak, K.P. Rajurkar, and R.F. Ross. *Computer simulation of pulse electrochemical machining*. In J.A. McGeough, editor, Journal of Materials Process Technology. Proceed. 7th Int. Conf on Computer Aided Production Engineering, volume 28, pages 149-157, 159-167, Cookeville - USA, 1991. V.C. Venkatesh, Elsevier.
- [45] J. Kozak, K.P. Rajurkar, and B. Wei. *Analysis of electrochemical machining process with short pulses*. In Proceed. Annual Meeting of the ASME. Symposium on the Physics of Machining Processes , pages 131-146, 1992.
- [46] J. Kozak, K.P. Rajurkar, and B. Wei. *Modeling and analysis of pulse electrochemical machining (pecm)*. Transaction of ASME- Journal of Engineering for Industry, 116(3):316-323, 1994.
- [47] J. Kozak. *Kształtowanie powierzchni obróbką elektrochemiczną bezstykową (ECM)*. Prace Naukowe-Mechanika PW, Nr 163. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa, 1996.
- [48] Jerzy Kozak, Kamlakar P. Rajurkar, and Yogesh Makkar. *Selected problems of micro-electrochemical machining*. Journal of Materials Processing Technology, 149(1-3):426 - 431, 2004. 14th International Symposium on Electromachining (ISEM XIV).
- [49] T. Kurita, K. Chikamori, S. Kubota, M. Hattori. *A study of threedimensional shape machining with an μ ecm system*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46:1311 – 1318, 2006.

- [50] T. Masuzawa, M. Fujino, K. Kobayashi, T. Suzuki, N. Kinoshita. *Wire electro – discharge grinding for micro – machining*. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 34(1): 431 – 434, 1985.
- [51] W. Menz, A. Schoth, C. Muller, R. Forster. *Non-conventional machining for microsystems*. In Proceedings of 3th International Euspen Conference, vol 1: 3 – 7A, Eindhoven, May 25th – 30th, 2002.
- [52] J.A. McGeough, A. De Silva, H.A. Senbel: *Aspects of micromachining by electrochemical methods*. Proc. 2nd Int. Conf. MMSS 2000, Kraków, 2000, s. 395-408.
- [53] N. Mohri, T. Tani. *Micro-pin electrodes formation by micro-scanning EDM process*. CIRP Ann., vol. 55, 175-178, 2006.
- [54] C. J. Morgan, R. R. Vallance, E. R. Marsh. *Micro – machining and micro – grinding with tools fabricated by micro – electro-discharge machining*. International Journal of Nanomanufacturing Vol 1, No. 2: 242 – 258, 2006.
- [55] D. Landolt, P.-F. Chauvy, O. Zinger. *Electrochemical micromachining, polishing and surface structuring of metals: fundamental aspects and new developments*. Electrochimica Acta 48: 3185 – 3201, 2003.
- [56] E.-S.Lee, J.-W. Park, Y.-H. Moon: *A study on electrochemical micromachining for fabrication of microgrooves in an air-lubricated hydrodynamic bearing*. Int. J. of Adv. Manuf. Technol., 2002, t. 20, nr 10, s. 720-726.
- [57] P. Lipiec, A. Ruszaj, S. Skoczypiec. *Hydrodynamic condition influence on electrochemical machinability and electrode polarization*. Proceedings INSECT 2010, Brussel, 2010, pp. 17-21.
- [58] P. Lipiec, S. Skoczypiec, D. Wyszzyński, A. Ruszaj. *Primary experimental research of Electrochemical Micromachining Process*. Proceedings of the 15th International Symposium on Electromachining, April 23-27, 2007, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, s. 355-358. Lincoln. University of Nebraska-Lincoln. 2007.
- [59] P. Lipiec, A. Ruszaj, S. Skoczypiec, T. Miller. *Badania wstępne procesu mikrofrezowania elektrochemicznego*. Mat. Szkoły Naukowej Obróbek Erozyjnych SNOE, Zeszyt nr 14, Politechnika Warszawska 2008.
- [60] T. Masuzawa. *State of the art of Micro Machining*. Annals of the CIRP, Vol. 49/2. 2000 r.

- [61] B.J. Park and C.N. Chu. *Microfabrication by electrochemical machining and deposition*. In Proceedings of US-Korea Workshop on Miniaturization Technologies, 2004.
- [62] Yu.N. Pietrov, I.I. Moroz. *Fundamentals of Improvement of Accuracy of Electrochemical Shaping*. Stiinica, Kiszyniów, 1977.
- [63] Z. Polański. *Planowanie doświadczeń w technice*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1984.
- [64] K.P. Rajurkar, J. Kozak, B. Wei, J.A. McGeough. *Study of pulse electrochemical machining characteristics*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 42(1):231 – 234, 1993.
- [65] K.P. Rajurkar, G. Levy, A. Malshe, M.M. Sundaram, J. McGeough, X. Hu, R. Resnick, and A. DeSilva. *Micro and nano machining by electro-physical and chemical processes*. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 55(2):643 – 666, 2006.
- [66] K.P. Rajurkar, B. Wei, J. Kozak, and J.A. McGeough. *Modelling and monitoring interelectrode gap in pulse electrochemical machining*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 44(1):177 – 180, 1995.
- [67] I. Roušar, K. Micka, A. Kimla. *Electrochemical Engineering*. Academia, Praha, Czechoslovakia, 1986.
- [68] A. Ruszaj. *Investigations on the process of electrochemical sinking taking into account the randomness of phenomena occurring in the machining area*. WEAR 147, 1991.
- [69] A. Ruszaj. *Badania procesu ECM dla różnych wariantów kinematyki elektrod*. Szkoła Naukowa Obróbek Erozyjnych – Sekcja Podstaw Technologii Komitetu Budowy Maszyn PAN, Zbiór referatów wygłoszonych w latach: 1987, 1988, 1989: 79 – 91, 1989.
- [70] A. Ruszaj. *Analysis of electrochemical machining process with the electrode tool moving parallel to the machined surface*. Materiały VI Międzynarodowej Konferencji: Fachtagung Electrotechnologie mit internationaler Beteiligung, strony 120 – 121, Magdeburg, 1988.
- [71] A. Ruszaj. *Metodyka projektowania procesu technologicznego ECM*. Proceed. International Symposium for Electro – Machining ISEM VI, Kraków, 1980.
- [72] A. Ruszaj. *Procesy obróbek ECM i EDM w różnych odmianach kinematycznych*. Zeszyt IOS 133 Nr 76, Kraków, 1989.

- [73] A. Ruszaj. *Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi*. Prace Instytutu Obróbki Skrawaniem, 1999. Pracownia Reprografii i Wydawnictw IOS.
- [74] A. Ruszaj (kierownik projektu). *Mikro i nanowygładzanie elektrochemiczne powierzchni płaskich i krzywoliniowych*. Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego rozwojowego Nr R03 014 01, kwiecień 2009.
- [75] A. Ruszaj, Sebastian Skoczypiec. *Badania procesu obróbki elektrochemicznej mikroelementów (μ - ecm)*. Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego specjalnego nr ERA-NET MNT/102/2006, kwiecień 2010.
- [76] A. Ruszaj, S. Skoczypiec. *Hybrydowe mikrokształtowanie elektrochemiczno – elektroerozyjne elementów konstrukcyjnych i narzędzi*. Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego nr N N503 245434, luty 2011.
- [77] A. Ruszaj, J. Gawlik, S. Skoczypiec. *Stan badań i kierunki rozwoju wybranych niekonwencjonalnych procesów wytwarzania*. Inżynieria Maszyn, 14(1):7 – 19, 2009. Wydawnictwo Wrocławskiej Rady FSNT NOT 2007.
- [78] A. Ruszaj, S. Skoczypiec, P. Lipiec. *Wybrane problemy projektowania i eksploatacji obrabiarek elektrochemicznych do kształtowania mikroelementów*. Inżynieria Maszyn, 11(1):48-54, 2006. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- [79] A. Ruszaj, P. Lipiec, S. Skoczypiec, D. Wszyński. *Primary research on electrochemical micromachining process*. 6th International Conference and 8th Annual General Meeting of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, May 28th-June 1st 2006 Baden bei Wien, Vol. II, s. 312-315. 2006.
- [80] A. Ruszaj, P. Lipiec, S. Skoczypiec, D. Wszyński. *Primary investigations of electrochemical micromachining process*. Proceedings of the 4th International Conference on Machining and Measurements of Sculptured Surfaces MMSS 2006, 27-29 September 2006, Krakow s. 215-222.
- [81] S.H. Ahn, S. H. Ryu, D. K. Choi, C. N. Chu. *Electro – Chemical microdrilling using ultra short pulses*. Precision Engineering 28 (2004), str. 129 – 134.
- [82] E.-S. Lee, T.-H. Shin, B.-K. Kim, S.-Y. Baek. *Investigation of Short Pulse Electrochemical Machining for Groove Process on Ni-Ti Shape Memory Alloy*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 11, No. 1: 113 – 118, 2010.

- [83] H.-P. Schulze, A. Ruszaj, T. Gmelin, J. Kozak, K. Karbowski, D. Borkenhagen, M. Leone, S. Skoczypiec. *Study of the process accuracy of the electrochemical micro machining using ultra nanosecond and short microsecond pulses*. In Proceedings of the 16th International Symposium on Electromachining: 651 – 656, 2010.
- [84] H.-P. Schulze, S. Skoczypiec, S. Burkert, T. Gmelin, A. Ruszaj, M. Leone. *Adapted process energy sources for the pulsed ElectroChemical MicroMachining (PECMM)*. In Proceedings of the International Symposium on ElectroChemical Machining Technology INSECT 2009, Dresden, Germany, 2009.
- [85] R. Schuster, V. Kirchner, P. Allongue, G. Ertl. *Electrochemical micromachining*. Science, 289(5476): 98 – 101, 2000.
- [86] M. Sen, H. S. Shan. *A review of electrochemical macro- to micro-hole drilling processes*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 45: 137 – 152, 2005.
- [87] H. Sholl, T. Błaszczuk, P. Krzyczmonik. *Elektrochemia. Zarys teorii i praktyki*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 1998.
- [88] S. Skoczypiec, A. Ruszaj. *Tendencje rozwojowe mikrotechnologii wytwarzania niekonwencjonalne metody mikroobróbki*. Mechanik, 11:947, 2009.
- [89] S. Skoczypiec, A. Ruszaj. *The Micromachining Processes Supported by Electrochemical Dissolution*. Proceedings INSECT, Brussel, Belgium, pp. 119 – 126, 2010.
- [90] S. Skoczypiec, A. Ruszaj, P. Lipiec. *Research on electrochemical dissolution localization in case of micro machining with ultra short pulses*. In Proceedings of the 16th International Symposium on Electromachining, pages 319 – 322, April 19-23 2010.
- [91] S. Skoczypiec, J. Kozak, A. Ruszaj. *Wybrane problemy technologii elektrochemicznej i elektroerozyjnej mikro-narzędzi*. Inżynieria Maszyn, 14(1):20 – 30, 2009. Wydawnictwo Wrocławskiej Rady FSNT NOT 2007.
- [92] S. Skoczypiec, A. Ruszaj, J. Kozak. *The conception of ec/edmm sequential process for micro-tools manufacturing*. In Proceedings of 5th International Conference on Advances in Production Engineering APE'2010. Warsaw University of Technology, Faculty of Production Engineering, Warsaw University of Technology, 2010.

- [93] S. Skoczypiec, A. Ruszaj, M. Grabowski. *Badania niekonwencjonalnych metod wytwarzania mikronarzędzi walcowych*. Mechanik 05/06: 436 – 442, 2011.
- [94] N. Smets, S. Van Damme, D. De Wilde, G. Weyns, J. Deconinck. *Time-averaged concentration calculations in pulse electrochemical machining, spectral approach*. J Appl Electrochem 39: 2481 – 2488, 2009.
- [95] N. Smets, S. Van Damme, D. De Wilde, G. Weyns, J. Deconinck. *Time-averaged temperature calculations in pulse electrochemical machining, spectral approach*. J Appl Electrochem 39: 791 – 798, 2009.
- [96] T. Kurita, K. Chikamori, S. Kubota, M. Hattori. *A study of threedimensional shape machining with an μ -ecm system*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46:1311-1318, 2006.
- [97] Y. Li, X. Ma, G. Liu, M. Hu, F. Yi. *Fundamental research on electrochemical micro-machining by using water as the electrolyte*. In Proceedings of the 16th International Symposium on Electromachining, pages 307-311, Shanghai, China, April 2010.
- [98] Y. Qin, A. Brockett, Y. Ma, A. Razali, J. Zhao, C. Harrison, W. Pan, X. Dai, D. Loziak. *Micro – manufacturing: research, technology outcomes and development issues*. Int J Adv Manuf Technol, 47: 821 – 837, 2010.
- [99] H. Vogt. *On the gas – evolution efficiency of electrodes I – Thoretical*. Electrochimica Acta 56: 1409 – 1416, 2011.
- [100] H. Vogt. *On the gas – evolution efficiency of electrodes II – Numerical analysys*. Electrochimica Acta 56: 2404 – 2410, 2011.
- [101] F. Vollertsen, D. Biermann, H.N. Hansen, I.S. Jawahir, and K. Kuzman. *Size effects in manufacturing of metallic components*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 58(2): 566 – 587, 2009.
- [102] M. H. Wang, D. Zhu. *Fabrication of multiple electrodes and their application for micro – holes array in ECM*. Int J Adv Manuf Technol 41: 42 – 47, 2009.
- [103] Zajdman G., N., i inni. *Theory and Practice of ECM*. Moldavian Academy of Science, Kiszyniów, 1976.
- [104] A.N. Zaytsev, V.P. Zhitnikov, T.R. Idrisov, N.Z. Gimaev. *About some problems of the surface accuracy and quality increase of Ti-Al-V alloys at pulse ECM*. Proceedings of Congress 04:2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and RD&D Expo, Anaheim, California, 2004.

- [105] Zhaoyang Zhang, Di Zhu. *Experimental Research on the Localized Electrochemical Micro-machining*. Russian Journal of Electrochemistry, Vol. 44, No. 8: 926-930, 2008.
- [106] Z.-W. Fan, L.-W. Hourng. *The analysis and investigation on the microelectrode fabrication by electrochemical machining*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 49: 659 – 666, 2009.