

POLITECHNIKA KRAKOWSKA
im. Tadeusza Kościuszki

Wydział Mechaniczny

Praca Doktorska

Badania wspomaganego drganiami
ultradźwiękowymi procesu obróbki
elektrochemicznej elektrodą uniwersalną

mgr inż. Sebastian Skoczypiec

Promotor: Prof. dr hab. inż. Adam Ruszaj

Kraków 2006



Niniejszy dokument został złożony w systemie L^AT_EX.



Podziękowania

Pragnę wyrazić serdeczne podziękowania promotorowi pracy Panu Profesorowi Adamowi Ruszajowi za wkład merytoryczny oraz cenne uwagi przy powstawaniu niniejszej pracy. Dziękuję serdecznie Dyrektorowi Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania Janu Barcentewiczowi oraz doc. dr inż. Jerzemu Stósowi za życzliwość oraz pomoc organizacyjną dzięki której mogłem zrealizować badania. Dziękuję Komitetowi Badań Naukowych za dofinansowanie pracy (Grant promotorski Nr 5 T07D 007 24).

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów	vii
Rozdział 1. Obróbka elektrochemiczna - stan badań, kierunki rozwoju . . .	1
1.1. Wprowadzenie	1
1.2. Sformułowanie problemu	3
1.3. Ogólna charakterystyka procesu roztwarzania	5
1.4. Czynniki wpływające na proces roztwarzania elektrochemicznego	7
1.5. Odmiany kinematyczne obróbki elektrochemicznej	12
1.5.1. Drażnienie elektrochemiczne	12
1.5.2. Obróbka elektrochemiczna elektrodą uniwersalną ECM - CNC	16
1.6. Obróbka elektrochemiczna w procesach hybrydowych	21
1.6.1. Obróbka elektrochemiczno - ścierna ECG	23
1.6.2. Obróbka elektrochemiczna wspomagana ultradźwiękami	25
1.7. Wnioski z analizy literatury	30
1.8. Cel i zakres pracy	31
Rozdział 2. Fale ultradźwiękowe jako źródło energii	33
2.1. Podstawowe wiadomości o falach sprężystych	33
2.2. Charakterystyka zjawiska kawitacji	36
2.3. Zastosowanie ultradźwięków	39
2.4. Drgania ultradźwiękowe w procesach obróbkowych	41
2.4.1. Obróbka ultradźwiękowa (USM)	41
2.4.2. Ultradźwięki w procesach hybrydowych	43
2.5. Wnioski	47



Rozdział 3. Modelowanie matematyczne procesu obróbki USECM - CNC	48
3.1. Założenia do modelu	48
3.2. Opracowanie oprogramowania do symulacji obróbki elektrochemicznej elektrodą uniwersalną	51
3.3. Analiza wyników przeprowadzonych symulacji	53
3.4. Analiza możliwości zastosowania modelu ECM - CNC	57
3.4.1. Przykładowe zależności otrzymane z symulacji	58
Rozdział 4. Modelowanie numeryczne przepływu przez szczelinę międzyelektrodową w USECM	62
4.1. Wprowadzenie	62
4.2. Cel, zakres i koncepcja modelowania numerycznego	65
4.3. Założenia do modelu	70
4.3.1. Założenia dotyczące modelowanego ośrodka	70
4.3.2. Równania przepływu mieszaniny	71
4.3.3. Transport masy. Model kawitacji	73
4.3.4. Geometria zagadnienia. Generacja siatki	77
4.4. Wyniki symulacji	78
4.5. Analiza wpływu zjawiska kawitacji na proces roztwarzania elektrochemicznego	96
Rozdział 5. Badania doświadczalne	102
5.1. Cel, zakres i koncepcja badań doświadczalnych	102
5.2. Opis stanowiska badań	103
5.3. Metodyka badań. Metody i technika pomiarów	105
5.3.1. Badania drążenia elektrochemicznego USECM.	105
5.3.2. Badania rozpoznawcze obróbki USECM - CNC	111
5.3.3. Badania obróbki z wierszowaniem elektrodą roboczą	117
5.4. Analiza wyników badań	119
5.4.1. Drążenie USECM	119
5.4.2. Obróbka USECM - CNC	129
5.4.3. Obróbka USECM - CNC z wierszowaniem elektrodą roboczą	142
5.5. Wnioski z badań doświadczalnych	149
Rozdział 6. Analiza zjawisk zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej	151
6.1. Warunki powstawania pęcherzyków kawitacyjnych w szczelinie międzyelektrodowej	151
6.1.1. Zarodkowanie homogeniczne	152
6.1.2. Zarodkowanie heterogeniczne	153
6.2. Wpływ zapadania się pęcherzyków na transport masy w szczelinie międzyelektrodowej	154

Rozdział 7. Podsumowanie i wnioski	159
7.1. Podsumowanie	159
7.2. Wnioski	161
7.2.1. Wnioski o charakterze poznawczym	161
7.2.2. Wnioski o charakterze utylitarnym	163
7.2.3. Wnioski do dalszych badań	164
Bibliografia	166

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

Wykaz ważniejszych oznaczeń

A	amplituda drgań ultradźwiękowych
a	grubość usuniętego naddatku
c	przesuw poprzeczny elektrody
C_e	stężenie elektrolitu
C_H	koncentracja objętościowa wodoru
D	wysokość falistości powierzchni
E	suma spadków potencjału w warstwach przyelektrodowych
E_A	potencjał anodowy
E_K	potencjał katodowy
F	stała Faraday'a
F_0	początkowy kształt powierzchni obrabianej
I	natężenie prądu
j	gęstość prądu
k_v	objętościowy równoważnik chemiczny
m	masa materiału usuniętego z przedmiotu obrabianego
n	ilość kroków czasowych
p_e	ciśnienie elektrolitu
p_{in}	ciśnienie elektrolitu na wlocie do szczeliny
p_g	ciśnienie gazu rozpuszczonego w elektrolicie
p_{out}	ciśnienie elektrolitu na wlocie do szczeliny
p_{sat}	ciśnienie prężności pary
p_v	ciśnienie pary elektrolitu
pH	wskaźnik kwasowości
Q_e	wydatek elektrolitu
Q_g	wydatek gazu
R	promień uniwersalnej elektrody kulistej
Re	liczba Reynoldsa
Ra	parametr chropowatości powierzchni oznaczający średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej
$R_c(t)$	ilość pary kondensującej w chwili t
$R_e(t)$	ilość pary tworzącej się w chwili t
Rz	parametr chropowatości powierzchni oznaczający wysokość chropowatości
S	grubość szczeliny międzyelektrodowej
S_0	początkowa grubość szczeliny międzyelektrodowej

S_k	grubość szczeliny w stanie ustalonym (quasiustalonym)
T	okres drgań
T_e	temperatura elektrolitu
t	czas obróbki
T_{sat}	temperatura saturacji
U	napięcie międzyelektrodowe
u	potencjał elektryczny w obszarze przepływu prądu
v	prędkość elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej
v_f	prędkość przesuwu elektrody roboczej w kierunku powierzchni obrabianej
v_p	prędkość przesuwu uniwersalnej elektrody ponad powierzchnią obrabianą
v_r	prędkość roztwarzania elektrochemicznego
v_x, v_y	składowe prędkości elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej
V_w	wydajność obróbki
α_e	udział objętościowy elektrolitu
α_v	udział objętościowy pary elektrolitu
α_g	udział objętościowy gazu
β	koncentracja objętościowa fazy gazowej
Δt	krok czasowy
Θ	przyrost temperatury elektrolitu
η	wydajność prądowa procesu roztwarzania
ηk_v	współczynnik obrabialności elektrochemicznej materiału
γ	napięcie powierzchniowe
κ	elektryczna przewodność właściwa elektrolitu
λ	długość fali ultradźwiękowej
ρ_e	gęstość elektrolitu

Wykaz ważniejszych skrótów

CFD	Computational Fluid Dynamics (Numeryczna Mechanika Płynów)
ECG	obróbka elektrochemiczno - ścierna
ECG - CNC	szlifowanie elektrochemiczne uniwersalną ściernicą kulistą
ECM	obróbka elektrochemiczna
ECM - CNC	obróbka elektrochemiczna elektrodą uniwersalną
ER	elektroda robocza
N-S	równania Naviera-Stokesa
PO	przedmiot obrabiany
R-P	równania Rayleigh-Plasseta

-
- USECM obróbka elektrochemiczna wspomagana drganiami ultradźwiękowymi
 elektrody roboczej
- USECM - CNC obróbka elektrochemiczna elektrodą uniwersalną wspomagana drga-
 niami ultradźwiękowymi elektrody roboczej
- USM obróbka ultradźwiękowa

Rozdział 1

Obróbka elektrochemiczna - stan badań, kierunki rozwoju

1.1. Wprowadzenie

Obróbka elektrochemiczna (ECM) zaliczana jest do tzw. niekonwencjonalnych metod obróbki materiałów, mimo że jest od dawna stosowana w przemyśle. Jest to proces roztwarzania anodowego zachodzący w wyniku reakcji elektrochemicznych zgodnych z prawami Faraday'a, umożliwiający kształtowanie z określoną dokładnością elementów o skomplikowanym kształcie, wykonanych z trudnych lub niemożliwych do obróbki innymi metodami materiałów przewodzących prąd elektryczny (metale i ich stopy). Pierwszy proces przypominający obróbkę ECM został opatentowany w 1926 r. przez Guseff'a [75]. Znaczne rozwinięcie tej metody wytwarzania elementów nastąpiło w latach 1950 - 1960, kiedy to znalazła ona szerokie zastosowanie w przemyśle lotniczym. Obróbka elektrochemiczna ma wiele zalet w stosunku do tradycyjnych metod, a mianowicie:

- możliwość obrabiania materiałów bez względu na ich twardość,
- brak zużycia narzędzia (elektrody),
- duża wydajność obróbki,
- dobra jakość obrobionej powierzchni (obróbka nie wprowadza istotnych zmian w warstwie wierzchniej),
- możliwość wytwarzania elementów o skomplikowanej geometrii.

Intensywny rozwój materiałów na narzędzia skrawające i bezpośrednio z tym związany rozwój technologii HSM, wprowadzenie do przemysłu wieloosiowych, elastycznych centrów skrawających spowodował, że zastosowanie obróbki elektroche-

micznej, pomimo jej licznych zalet, zostało praktycznie ograniczone do takich obszarów przemysłu jak przemysł lotniczy, kosmiczny, obronny, motoryzacyjny czy produkcja części urządzeń dla gospodarstwa domowego. Przykładami zastosowań ECM jest obróbka łopatek silników lotniczych, drażenie małych otworów (szczególnie w łopatkach turbin, elementach silników i osprzętu lotniczego), wykonywanie głowic elektrycznych maszynek do golenia, wytwarzanie narzędzi do obróbki plastycznej, czyli matryc, form czy kokili.

We współczesnym przemyśle maszynowym stosuje się materiały konstrukcyjne o coraz to wyższych właściwościach mechanicznych (stopy tytanu, stopy niklu, materiały kompozytowe), co powoduje, że obróbka mechaniczna większości z nich jest bardzo kosztowna lub wręcz niemożliwa. Dlatego też, optymalne połączenie właściwości materiału i sposobu jego obróbki jest podstawową trudnością przy projektowaniu technologii wytwarzania części maszyn wykonanych z tych materiałów. Alternatywę w takich przypadkach stanowi grupa obróbek erozyjnych. Obróbka elektrochemiczna wyróżnia się na tle innych metod erozyjnych, ponieważ jako jedna z niewielu przebiega bez działania wysokiej temperatury oraz oddziaływania mechanicznego umożliwiając obróbkę materiałów bez wprowadzania istotnych zmian w warstwie wierzchniej i przy braku zużycia narzędzia.

Zapotrzebowanie na nowe materiały o coraz wyższych właściwościach użytkowych wymusza również poszukiwanie nowych technologii umożliwiających efektywne i tanie wytwarzanie części maszyn. Jeden z kierunków poszukiwań to kombinacje oddziaływań mechanicznych, cieplnych i chemicznych na obrabiany materiał, co w wielu przypadkach tworzy korzystne rozwiązania technologiczne. Mamy wówczas do czynienia z tzw. procesem hybrydowym [43, 68]. Przykładem takiego procesu jest obróbka elektrochemiczna wspomagana ultradźwiękami, gdzie połączone strumienie energii chemicznej i mechanicznej użyte są do usuwania naddatku obróbkowego.

Niedawne postępy mające na celu zwiększenie dokładności elementów wykonanych metodami elektrochemicznymi zaowocowały wdrożeniem ECM w przemyśle elektronicznym do wytwarzania bardzo małych i bardzo dokładnych elementów, czy elementów o bardzo małej chropowatości (tzw. *mikromachining* i *mikrofinishing*), gdzie obróbka mechaniczna może zachodzić jedynie z bardzo małymi siłami, aby uniknąć uszkodzenia obrabianego materiału. Obecnie, kiedy istnieje zapotrzebowanie na technologie pozwalające wykonywać bardzo małe elementy ($< 500 \mu m$) ogromnego znaczenia nabiera fakt, że technologia elektrochemiczna daje potencjalne możliwości usuwania naddatku grubości porównywalnej z wielkością pojedynczych jonów.

1.2. Sformułowanie problemu

Wykonywanie powierzchni o złożonej krzywiznie (np. wykrojów w matrycach, formach, powierzchni tłoczników, piór łopatek turbin i sprężarek) wiąże się ze znacznymi trudnościami, które rosną wraz z podwyższaniem wymagań odnośnie jakości powierzchni lub w przypadku zastosowania materiałów trudnoskrawalnych (np. materiałów narzędziowych po hartowaniu, materiałów żarowytrzymałych). Szerokiemu zastosowaniu frezowania na obrabiarkach NC towarzyszy konieczność wykonywania pracochłonnych operacji w celu wykończenia powierzchni, gdyż nawet przy frezowaniu wykańczającym pozostają na powierzchni ślady o stosunkowo wysokiej falistości. Alternatywę dla obróbek mechanicznych stanowi grupa obróbek erozyjnych, wśród których, dzięki swoim zaletom, szczególne miejsce zajmuje obróbka elektrochemiczna.

Klasycznym zastosowaniem procesów elektrochemicznych jest drażenie, które polega na odwzorowaniu kształtu odpowiednio zaprojektowanej elektrody roboczej w przedmiocie obrabianym. Przez szczelinę międzyelektrodową ($< 1\text{ mm}$) przepływa elektrolit, zwykle roztwór NaCl lub NaNO_3 , który umożliwia również usuwanie ciepła i produktów roztwarzania z przestrzeni międzyelektrodowej. Podczas drażenia rozkład prędkości i temperatury elektrolitu oraz koncentracji produktów roztwarzania jest najczęściej nierównomierny, co znacząco wpływa na właściwości fizyczne elektrolitu. Powoduje to losowe różnice prędkości roztwarzania dla różnych obszarów obróbki. Różnice te są tym większe im większa i bardziej skomplikowana jest powierzchnia obrabiana. Związane jest to ze znacznym pogorszeniem warunków hydrodynamicznych w przestrzeni międzyelektrodowej. Wpływa to znacząco na dokładność i powtarzalność wykonania przedmiotu [79]. Poza tym drażenie elektrochemiczne jest nieelastycznym i kosztownym, bo w każdym przypadku obróbki należy wykonać specjalną elektrodę. Możliwości wykorzystania drażenia elektrochemicznego w operacjach wykańczających obniżają trudności związane z projektowaniem i wykonaniem elektrod oraz stosunkowo niska dokładność, wynosząca $0.1 \div 0.3\text{ mm}$. Wymienione problemy powodują znaczne zwiększenie kosztów obróbki, oraz ograniczają efektywność wprowadzania elastycznych systemów produkcyjnych w wytwarzaniu matryc, foremników, tłoczników itp.

Fakt zwiększenia dokładności obróbki wraz ze zmniejszeniem powierzchni obrabianej został wykorzystany przy obróbce tzw. elektrodą uniwersalną (ECM - CNC) w kształcie np. walca, kuli lub prostopadłościanu. Powierzchnia elektrody jest znacząco mniejsza od powierzchni obrabianej a elektroda porusza się wzdłuż toru odzwierciedlającego pożądany kształt. Dzięki temu osiągnięto istotne zwiększenie do-

kładności obróbki [76, 78, 81, 91, 94], co związane jest ze zmniejszeniem obszaru obróbki, czyli nieznacznymi zmianami własności elektrolitu w przestrzeni międzyelektrodowej. Jednak i ten sposób obróbki nie jest pozbawiony wad. Podstawowymi problemami w obróbce elektrochemicznej uniwersalną elektrodą są [9, 78]:

- odpowiednio skuteczne dostarczenie elektrolitu w strefę obróbki,
- wyraźnie mniejsza wydajność w porównaniu z klasycznym drażeniem elektrochemicznym,
- zmniejszenie *niezawodności* usuwania naddatku na skutek pasywacji powierzchni.

Ograniczenia te znacznie zawężają zakres możliwych zastosowań praktycznych obróbki ECM - CNC. Jednym z podstawowych problemów w obróbce elektrochemicznej uniwersalną elektrodą jest odpowiednio skuteczne dostarczenie elektrolitu w strefę obróbki. Realizuje się to przez wykonanie otworu w elektrodzie, przez który pompowany jest elektrolit, lub przez oblewanie elektrody elektrolitem, stosując odpowiednio zaprojektowaną dyszę. Podczas ECM - CNC proces roztwarzania odbywa się tylko w otoczeniu uniwersalnej elektrody, natomiast cała powierzchnia obrabiana polewana jest elektrolitem. Może to być przyczyną powstania na powierzchni obrabianej warstwy tlenków, co zmniejszy lub nawet uniemożliwi roztwarzanie materiału w momencie gdy znajdzie się tam elektroda robocza.

Mała wydajność wynikająca przede wszystkim ze zmniejszenia chwilowego obszaru obróbki powoduje, że obróbka uniwersalną elektrodą może być racjonalnie stosowana jedynie w operacjach wykańczających. Na podstawie danych literaturowych [25, 45, 46, 94, 103, 130] można wnioskować, że zastosowanie uniwersalnej elektrody jest efektywnym i korzystnym ekonomicznie rozwiązaniem problemu kształtowania warstwy wierzchniej powierzchni krzywoliniowych. Zastosowanie ECM - CNC do operacji wykańczających powierzchni zgrubnie ukształtowanych obróbkami wysokowydajnymi (frezowanie, obróbka elektroerozyjna) przynosi znaczne korzyści techniczno - ekonomiczne wiążące się z:

- eliminacją operacji ślusarskich (ręcznymi szlifierkami, wirującymi pilnikami itp.),
- możliwością obróbki materiałów trudnoskrawalnych (np. matryc hartowanych po obróbce zgrubnej, kokil z materiałów o zwiększonej żywotności).

Rozwiązanie typowych dla ECM - CNC problemów umożliwi poszerzenie zakresu zastosowania tej metody obróbki dlatego też, przeprowadzenie badań obróbki elektrochemicznej elektrodą uniwersalną wspomaganej drganiami ultradźwiękowymi (USECM - CNC) jest uzasadnione. Wpływ ultradźwięków upatruje się w zwiększeniu wydajności procesu oraz zwiększeniu niezawodności usuwania naddatku obróbkowego. Przeprowadzone badania są również uzasadnione z punktu widzenia korzyści ekonomicznych, ponieważ koszt wyposażenia obrabiarki ECM w głowicę

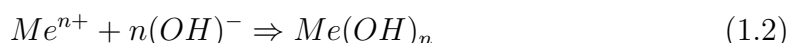
ultradźwiękową może okazać się niewielki w porównaniu z korzyściami płynącymi ze zwiększenia wydajności obróbki. Zastosowanie drgającej elektrody uniwersalnej pozwoliłoby również na wyeliminowanie problemów związanych z projektowaniem zespołu głowica ultradźwiękowa - elektroda, ponieważ elektroda w przypadku drążenia ma niejednokrotnie skomplikowany kształt oraz dużą masę, co utrudnia, a czasami nawet nie pozwala na zastosowanie drgań ultradźwiękowych.

1.3. Ogólna charakterystyka procesu roztwarzania

Obróbka elektrochemiczna (ECM) umożliwia obróbkę metali i ich stopów niezależnie od własności mechanicznych materiału. Do usuwania materiału wykorzystuje się proces roztwarzania elektrochemicznego zachodzący przy powierzchni przedmiotu obrabianego, który podłączony jest do dodatniego bieguna źródła prądu stałego - anoda. Elektroda robocza, która jest narzędziem, podłączona jest do ujemnego bieguna prądu stałego - katoda. Do szczeliny międzyelektrodowej podawany jest elektrolit - zwykle roztwór $NaCl$ lub $NaNO_3$. Naddatek obróbkowy usuwany jest w wyniku reakcji chemicznych. Podstawową reakcją elektrochemiczną zachodzącą w warstwie przyanodowej jest jonizacja jej atomów:



Jony roztworzonego metalu dyfundują w głąb szczeliny, gdzie biorą udział w dalszych reakcjach, których ostatecznym produktem jest wodorotlenek metalu np:



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



oraz np. dla elektrolitu będącego roztworem $NaCl$ reakcja wydzielania się chloru:



Podstawową reakcją elektrochemiczną zachodzącą równocześnie z reakcjami anodowymi na powierzchni katody jest dejonizacja jonów wodoru:



oraz elektroliza wody:



Proces roztwarzania przebiega zgodnie prawami Faraday'a, które można przedstawić w postaci jednego wyrażenia:

$$dm = \frac{A}{zF} I dt \quad (1.7)$$

w którym: dm - masa roztworzona w wyniku działania prądu o natężeniu I w czasie dt , jony materiału roztworzonego mają masę atomową A i wartościowość z , F - stała Faraday'a. Korzystając z zależności $dm = \rho dV$ (ρ - gęstość materiału), i wstawiając $k_v \equiv A/z\rho F$ do (1.7) objętość usuniętego naddatku w obróbce elektrochemicznej wyraża się wzorem [60]:

$$V = \int \eta k_v I dt \quad (1.8)$$

Współczynnik k_v nazywany jest objętościowym równoważnikiem chemicznym, natomiast η jest wydajnością prądową procesu roztwarzania. Dla stopu, którym najczęściej jest materiał obrabiany, oddzielne wyznaczenie η i k_v jest niemożliwe. Jednak w praktyce nie jest konieczna znajomość oddzielnych wielkości. W technologii elektrochemicznej najlepiej posługiwać się wielkością [39]:

$$k_{vtech} \equiv \eta k_v \quad (1.9)$$

nazywaną współczynnikiem obrabialności elektrochemicznej. Współczynnik ten równa się objętości roztworzonego materiału przy przepływie jednostkowego ładunku elektrycznego i może być wyznaczony jedynie na drodze eksperymentalnej.

Reakcje elektrodowe zachodzące w obszarze międzyelektrodowym mają decydujący wpływ na wydajność, dokładność wymiarową i stan warstwy wierzchniej. Przepływ prądu elektrycznego przez szczelinę międzyelektrodową realizowany jest w wyniku migracji jonów pod wpływem pola elektrostatycznego. Przepływowi prądu elektrycznego przez szczelinę towarzyszy wydzielanie się dużej ilości ciepła. Ciepło oraz produkty reakcji elektrodowych (wydzielone gazy i produkty stałe) usuwane są ze strefy obróbki przez przepływający elektrolit. W przestrzeni międzyelektrodowej panują zmienne warunki tj. nierównomierny rozkład temperatury i koncentracji produktów reakcji. Pociąga to za sobą nierównomierność rozkładu właściwej przewodności elektrolitu κ , spadku potencjałów E w warstwach przyelektrodowych oraz współczynnika obrabialności elektrochemicznej ηk_v [40]. Parametry wymienionych rozkładów są bardzo trudne do dokładnego obliczenia, ponieważ przepływ w szczelinie jest wielofazowy, niestacjonarny, turbulentny i trójwymiarowy. Procesy zachodzące w szczelinie międzyelektrodowej mają więc charakter losowy i często niestabilny [79]. W wyniku tego grubość szczeliny międzyelektrodowej można przewidywać tylko z określonym prawdopodobieństwem $p < 1$, zależnym od stopnia uproszczenia modelu procesu.

1.4. Czynniki wpływające na proces roztwarzania elektrochemicznego

Ogólnie warunki kształtowania elektrochemicznego opisują następujące parametry [22, 80]:

- rodzaj elektrolitu i jego właściwości czyli: κ - właściwa przewodność (konduktywność) elektryczna, α - temperaturowy współczynnik przewodności elektrycznej, ρ_e - gęstość elektrolitu, C_p - ciepło właściwe, μ_e - lepkości dynamiczna,
- skład materiału obrabianego,
- parametry obróbki tj.: v_f (v_p) - prędkość ruchu elektrody roboczej, U - napięcie międzyelektrodowe, p_{in}, p_{out} - ciśnienie na wlocie i wylocie ze szczeliny międzyelektrodowej,
- charakterystyka układu elektrochemicznego elektroda robocza (ER) - elektrolit - przedmiot obrabiany (PO), która jest opisana funkcją zmiany obrabialności elektrochemicznej $\eta k_v = \eta k_v(j, v, T)$ i funkcją spadku potencjału na elektrodach $E_a - E_k = E(j, v, T)$,
- zależności geometryczne pomiędzy ER a PO tj. rodzaj elektrody roboczej (kształt, wymiary, szczegóły konstrukcyjne np. doprowadzenie elektrolitu do obszaru obróbki), początkowy kształt powierzchni obrabianej, początkowe położenie ER względem PO, parametry ruchu ER i PO.

W ogólnym przypadku proces kształtowania elektrochemicznego opisany jest następującym układem równań ([40, 46, 120]):

$$\frac{\delta F}{\delta t} + \eta k_v j(F) |grad F| = 0 \quad (1.10)$$

$$F(t = 0) = F_o$$

$$j(F) = \kappa(F) (|grad u|) \quad (1.11)$$

$$div(\kappa grad u) = 0 \quad (1.12)$$

$$u(f) = -E_k(j_R) \quad u(F) = U - E_a(j_a)$$

w którym: $F(x, y, z, t) = 0$ - równanie powierzchni anody, f - powierzchnia katody, j - gęstość prądu. W wyniku rozwiązania powyższego układu równań otrzymujemy kształt powierzchni obrabianej F dla dowolnej chwili czasu t , w szczególności po zadanym czasie obróbki t_k . Umożliwia to wyznaczenie dokładności obróbki ECM, np. poprzez wyznaczenie rozkładu odchyłek Δ między powierzchnią zadaną a otrzymaną powierzchnią F_k .

Warunki hydrodynamiczne procesu roztwarzania elektrochemicznego

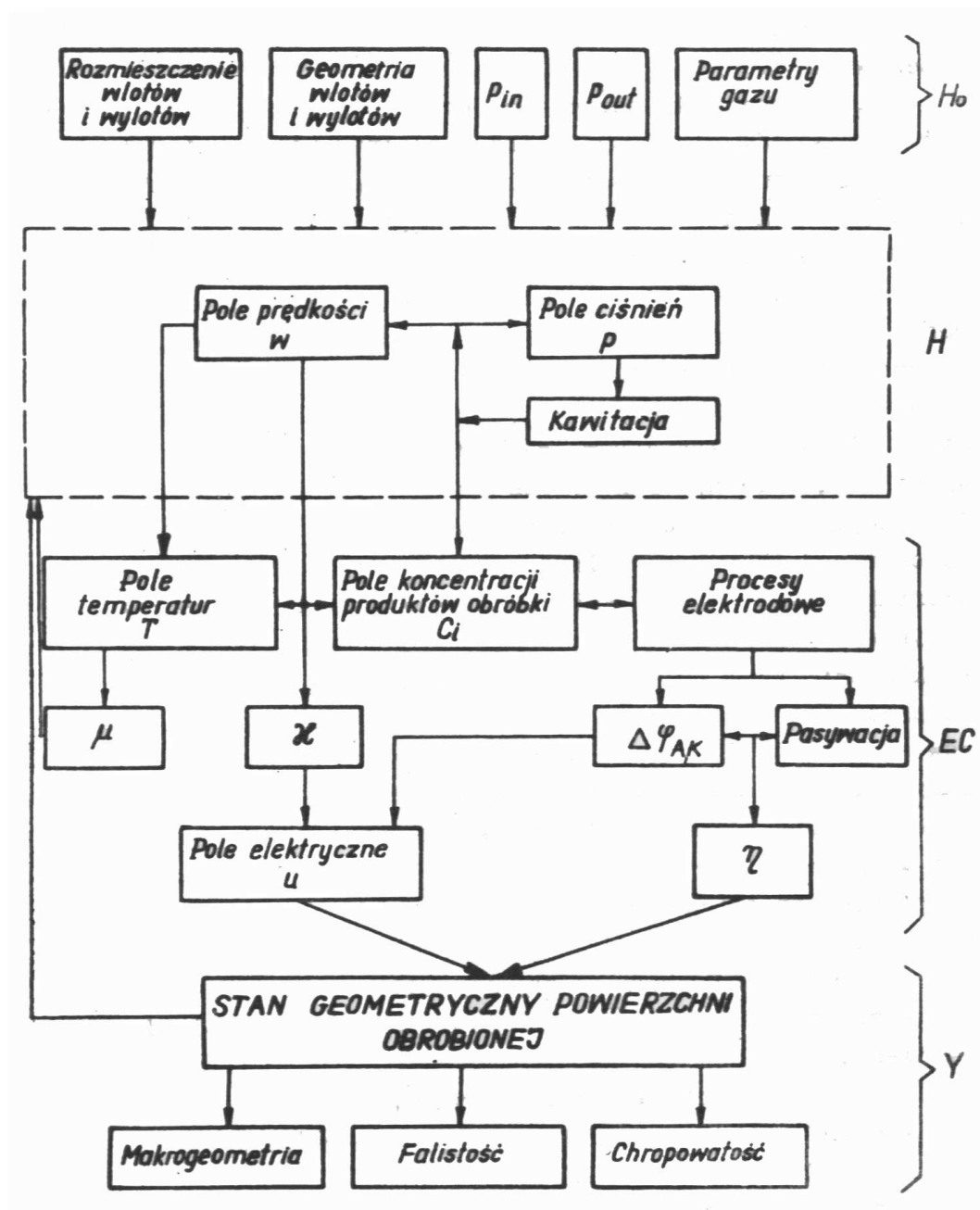
Zapewnienie odpowiednich warunków hydrodynamicznych panujących w szczelinie, czyli odpowiedniego rozkładu prędkości i ciśnienia, jest decydującym elementem przy projektowaniu procesu ECM. Wynika to z zależności między warunkami hydrodynamicznymi a warunkami wymiany masy, wymiany ciepła, struktury elektrolitu oraz właściwościami elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej (Rys. 1.1). Od tych procesów uzależniony jest rozkład prędkości roztwarzania na powierzchni obrabianej, rozkład chropowatości powierzchni i wydajność obróbki. Bardzo często kształt elektrody lub przedmiotu obrabianego jest skomplikowany, występują w niej wgłębienia, szczeliny, ostre krawędzie itp. czyli elementy, które zaburzają charakter przepływu. Właściwie dobrane warunki hydrodynamiczne zapobiegają powstawaniu niekorzystnych zjawisk dla obróbki czyli stref przepływu krytycznego, cyrkulacji czy zastoju, nadmiernemu wzrostowi temperatury i koncentracji objętościowej wodoru. Przykładowo w 10 % roztworze $NaCl$ przy przepływie prądu o gęstości $j = 10 A/mm^2$ wydzielone ciepło Joula'a wynosi $84 kW/cm^3$, które należy odpowiednio usunąć ze strefy obróbki. Wszystkie wymienione zjawiska powodują naruszenie ciągłości procesu roztwarzania a co w rezultacie zwiększa prawdopodobieństwo powstawania zwarców oraz polaryzacje elektrod.

Powstające w trakcie roztwarzania elektrochemicznego produkty reakcji elektrodowych, zwłaszcza wodór na katodzie i roztworzony metal na anodzie, powodują, że ciecz w szczelinie międzyelektrodowej jest mieszaniną wielu faz o właściwościach różnych od czystego elektrolitu. Grubość ośrodka dwufazowego elektrolit - gaz rośnie wzdłuż przepływu, aż do wypełnienia całej grubości szczeliny. Ze względu na trudności z pełnym ujęciem zjawisk w szczelinie międzyelektrodowej, modelowanie przepływu odbywa się poprzez uśrednienie własności elektrolitu wzdłuż grubości szczeliny międzyelektrodowej. Elektrolit traktuje się jako mieszaninę cieczy z gazem, zmieniającą swoje właściwości w wzdłuż kierunku przepływu elektrolitu. Zastępcza lepkość dynamiczna może być wyrażona zależnością [69]:

$$\mu_e = \mu_0(1 + m\beta)e^{-b\Theta} \quad (1.13)$$

gdzie: β - koncentracja objętościowa fazy gazowej. Człon $(1+m\beta)$ opisuje zmianę lepkości wraz ze wzrostem udziału fazy gazowej. Współczynnik m zależy od wielkości β . W przypadku ECM $0.1 < \beta < 0.6$ a $m = 5.5$. Część $e^{-b\Theta}$ opisuje zmiany lepkości wraz ze wzrostem temperatury nagrzewania ($\Theta = T_e - T_0$). Współczynnik b zależy od rodzaju elektrolitu. Dla wodnych roztworów soli $b = 0.018 K^{-1}$. Przewodność elektryczna i gęstość elektrolitu opisane są zależnościami:

$$\kappa = \kappa_0(1 + \alpha\Theta)(1 - \beta)^{3/2} \quad (1.14)$$



Rys. 1.1. Schemat powiązań pomiędzy warunkami hydrodynamicznymi a warunkami wymiany masy, wymiany ciepła i właściwościami elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej [40].

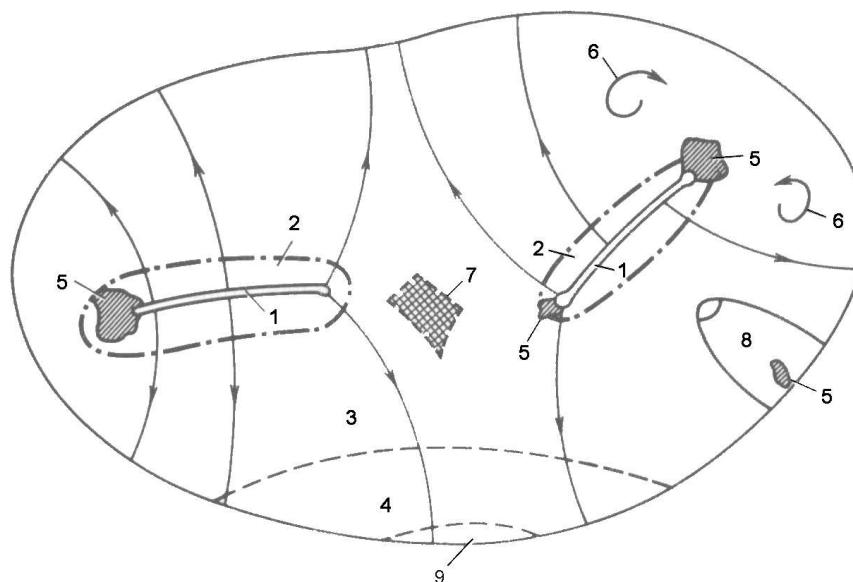
$$\rho_e = \rho_0(1 - \beta) + \rho_g\beta \quad (1.15)$$

gdzie: κ_0, ρ_0 - przewodność i gęstość elektrolitu na wlocie do szczeliny międzyelektrodowej, ρ_g - gęstość gazu.

Charakter przepływu w szczelinie zależy przede wszystkim od prędkości i lepkości elektrolitu oraz tzw. średnicy zastępczej. Oprócz tego istnieje wiele innych czynników tj. ukształtowanie wlotu, gładkość powierzchni czy wstępne zaburzenia mechaniczne doprowadzonego elektrolitu, które mogą warunkować przepływ w strefie obróbki. Z punktu widzenia przebiegu procesu roztwarzania istnieją też warunki dolnego ograniczenia prędkości np. ze względu na depasywację hydrodynamiczną lub wydajność prądową, które zależą od elektrolitu, materiału obrabianego i gęstości prądu. Przykładowo dla elektrolitu $NaCl$ minimalne wartości prędkości wynoszą $1 \div 2 \text{ m/s}$, a dla $NaNO_3$ około 4 m/s . Przy grubości szczeliny 0.5 mm daje to odpowiednio $Re = 1000 \div 2000$ i $Re = 4000$ [40]. Z warunku nie przekraczania założonego przyrostu temperatury $\Theta < \Theta_{dop}$ (dla procesu ustalonego) można otrzymać zależność [40]:

$$Re(\Theta) > \frac{2UjL}{\mu C_p \Theta_{dop}} \quad (1.16)$$

gdzie: L - długość szczeliny międzyelektrodowej.



Rys. 1.2. Przykładowy schemat przepływu elektrolitu: 1, 2 - wloty elektrolitu, 3 - granice przepływu pęcherzykowego, 4 - obszar niestabilności przepływu, 5 - strefa kawitacji, 6 - cyrkulacja, 7 - strefa zastoju, 8 - ślad hydrodynamiczny [40].

Natomiast ze względu na założoną dopuszczalną koncentrację objętościową wodoru w szczelinie ($\beta < \beta_{dop}$):

$$Re(\beta) = \frac{2.5}{291} 10^2 \frac{jLT_{out}}{vp_{out}\beta} \quad (1.17)$$

Powyższe ograniczenia powodują, że dla najczęściej stosowanych elektrolitów i wartości szczelin międzyelektrodowych minimalne wartości Re są w granicach $10^3 \div 10^4$. Krytyczna liczba Reynolds'a nie jest wielkością absolutną i wymienione powyżej ograniczenia i czynniki wpływające na przepływ mogą sprawić, że przejście od ruchu laminarnego do turbulentnego może nastąpić przy różnych liczbach Reynolds'a. Przyjmuje się przedział $Re_{min} < Re < Re_{max}$ dla którego przepływ może być laminarny lub turbulentny. Poniżej $Re_{min} = 2300 \div 2400$ nie udaje się zaobserwować ruchu turbulentnego a powyżej $Re_{max} = 50000$ nie udało się zaobserwować przepływu laminarnego. Wartości Re występujące w ECM nie pozwalają na jednoznaczne określenie jaki charakter przepływu jest w szczelinie, jednak zwykle zakłada się, że jest on turbulentny.

Przepływ turbulentny jest najbardziej powszechnym rodzajem ruchu płynu w przyrodzie i jednocześnie najbardziej skomplikowanym i najtrudniejszym do przewidzenia. W przepływie turbulentnym podstawowe jego parametry jak prędkość, ciśnienie i gęstość w każdym punkcie ulegają szybkim, niewielkim stochastycznym zmianom. Są to losowe funkcje położenia i czasu, lokalnie niestacjonarne, nawet gdy przepływ jest globalnie stacjonarny. Amplituda oraz częstotliwość tych zmian są bardzo szerokie i rosną wraz z liczbą Reynolds'a. Górna granica jest tego samego rzędu co rozmiar analizowanego obszaru przepływu, natomiast dolna granica określona jest poprzez siły lepkości. Tak szeroki przedział częstotliwości oraz amplitud powoduje, że rozwiązanie zagadnienia przepływu turbulentnego jest zadaniem skomplikowanym. Przykładowo zmienną zależną, jaką jest prędkość w dowolnym punkcie O przedstawiamy jako sumę dwóch składników:

$$v(O, t) = \bar{v}(O, t) + v'(O, t) \quad (1.18)$$

gdzie: $\bar{v}(O, t)$ - prędkość główna będąca wartością średnią, $v'(O, t)$ - pulsacja prędkości, czyli odchyłka od wartości średniej. Pulsacje prędkości, ciśnienia i gęstości są losowymi funkcjami położenia. Wszystkie powyższe fakty powodują, że dokładne przewidywanie zmian kształtu powierzchni obrabianej jest bardzo utrudnione. Największe trudności w trakcie modelowania obróbki ECM związane są z rozwiązaniem równań N-S dla przepływu w szczelinie międzyelektrodowej, i na tym też etapie wprowadza się jak najwięcej uproszczeń m. in. zakłada się stan ustalony, przepływ laminarny, pomija się zmiany właściwości elektrolitu wzdłuż grubości szczeliny [22].

1.5. Odmiany kinematyczne obróbki elektrochemicznej

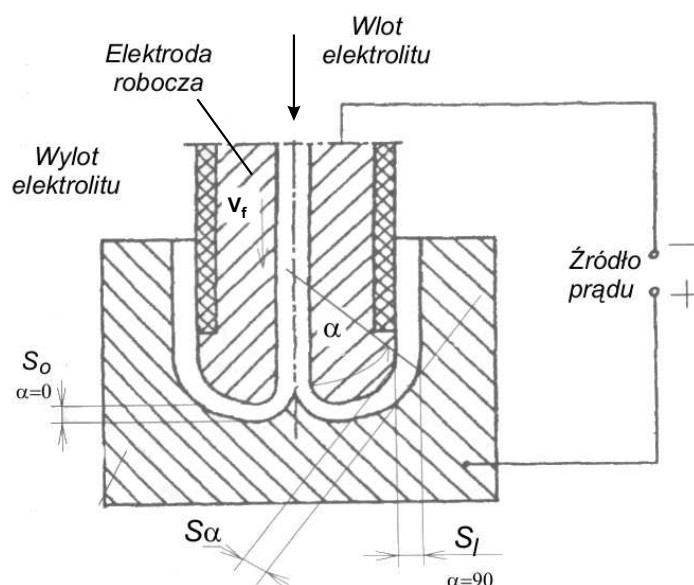
Czynnikiem stymulującym rozwój niekonwencjonalnych technologii wytwarzania jest postęp w dziedzinie inżynierii materiałowej oraz coraz wyższe wymagania dotyczące wydajności, dokładności obróbki i zadowalającej jakości warstwy wierzchniej. Dlatego też prowadzone są badania skierowane na dalsze poznanie niekonwencjonalnych procesów oraz ich ewentualne modyfikacje. Ze względu na wzajemny ruch elektrody i przedmiotu obrabianego możemy wyróżnić następujące odmiany elektrochemicznej obróbki bezstykowej:

- z ruchem postępowym katody lub anody (obróbka łopatek silników lotniczych, drażnienie matryc, form i kokili, wykonywanie otworów czy wgłębień),
- z ruchem obrotowym katody lub anody (obróbka powierzchni bocznych i czołowych ciał obrotowych, szlifowanie elektrochemiczne, przecinanie tarczą),
- z elektrodami nieruchomymi (usuwanie zadziorów, kalibrowanie otworów, wygładzanie powierzchni).

Tematem pracy jest obróbka elektrochemiczna elektrodą uniwersalną, która jest po-myślana jako alternatywa dla klasycznych odmian obróbki elektrochemicznej (m. in. drażnienie elektrochemiczne), zwłaszcza w operacjach wykańczających dużych powierzchni krzywoliniowych. Dlatego też zostanie przedstawiona charakterystyka procesu drażenia elektrochemicznego oraz obróbki elektrodą uniwersalną, aby w dalszej części rozdziału umożliwić porównanie tych dwóch odmian ECM.

1.5.1. Drażnienie elektrochemiczne

Najbardziej rozpowszechnioną odmianą kinematyczną obróbki elektrochemicznej bezstykowej jest drażnienie elektrochemiczne, gdzie kształt końcowy obrabianego przedmiotu uzyskiwany jest poprzez odwzorowanie kształtu i wymiarów elektrody roboczej. Elektroda lub przedmiot obrabiany wykonuje ruch posuwowy z prędkością v_f w kierunku wzajemnego zbliżenia się elektrod, w wyniku czego powierzchnia obrabiana jest skorygowanym o grubość szczeliny międzyelektrodowej negatywnym elektrody roboczej. W przypadku gdy jest usuwany stosunkowo nieduży naddatek (maks. około 1 mm) obróbka może się odbywać przy nieruchomej elektrodzie ($v_f = 0 \text{ mm/min}$). Drażnienie elektrochemiczne umożliwia wysokowydajną obróbkę kokili, form i matryc, wgłębień i otworów w materiałach trudnoskrawalnych przewodzących prąd elektryczny, z wykorzystaniem nie zużywającego się narzędzia. Główną zaletą drażenia elektrochemicznego jest wielokrotnie większa niż przy drażeniu elektroerozyjnym czy frezowaniu, wydajność obróbki, która w określonych przypadkach wynosi nawet kilkadziesiąt cm^3/min . Uzyskanie takiej wydajności wymaga zasto-



Rys. 1.3. Schemat drążenia elektrochemicznego powierzchni krzywoliniowej; S_o , S_α , S_l - grubości szczeliny międzyelektrodowej, v_f - kierunek przesuwu elektrody, α - kąt pomiędzy kierunkiem wektora prędkości v_f i normalną do powierzchni obrabianej.

sowania zasilaczy umożliwiających otrzymanie bardzo dużego natężenia prądu (do 40000 A) przy napięciu $5 \div 20 V$. Drążenie elektrochemiczne umożliwia otrzymanie dokładności kształtowo - wymiarowej o tolerancji $T = 0.1 \div 0.5 mm$ przy chropowości powierzchni $Ra = 0.5 \div 2.0 \mu m$. Osiągnięta dokładność obróbki zależy przede wszystkim od wielkości i kształtu powierzchni obrabianej (od tego zależy kształt szczeliny międzyelektrodowej). Związane jest to bezpośrednio z możliwością zapewnienia odpowiednich warunków hydrodynamicznych panujących w szczelinie międzyelektrodowej. Dokładność drążenia elektrochemicznego ograniczona jest zmiennością i losowością zjawisk zachodzących w obszarze obróbki co powoduje, że możliwości jej zwiększenia są ograniczone [79, 85]. Dlatego też, dobór kształtu elektrody roboczej (czyli kształtu szczeliny międzyelektrodowej) jest bardzo ważnym etapem przy projektowaniu procesu technologicznego. Dla procesu roztwarzania elektrochemicznego w warunkach ustalonych (kształt szczeliny międzyelektrodowej nie zależy od czasu) grubość szczeliny międzyelektrodowej można obliczyć z przybliżonej zależności [21, 40]:

$$S_k = \frac{\eta k_v \kappa (U - E)}{v_f \cos(\alpha)} \quad (1.19)$$

gdzie α to kąt pomiędzy normalną do powierzchni elektrody a kierunkiem jej posuwu v_f (Rys. 1.4). Z wzoru (1.19) otrzymujemy rozkład grubości szczeliny dla procesu idealnego, w którym właściwości fizykochemiczne elektrolitu są stałe. Zgodnie z tym co przedstawiono w poprzednich paragrafach założenie to nie jest prawdziwe. Dokładność obliczeń rozkładu S_k zależy głównie od dokładności wyznaczenia wartości ηk_v , E , κ . Wartości ηk_v , E mogą być dokładnie wyznaczone jedynie w oparciu o wyniki badań doświadczalnych [102], natomiast κ może być oszacowana tylko na podstawie modelu teoretycznego. Z powodu skomplikowanych zjawisk związanych z przepływem (przepływ turbulentny, przepływ wielofazowy) zwykle oszacowanie to jest niedokładne.

W wyniku zachodzących procesów elektrochemicznych w szczelinie międzyelektrodowej wzrasta koncentracja produktów reakcji elektrochemicznych. Przepływowi prądu elektrycznego towarzyszy wydzielanie się ciepła Joule'a. W wyniku tych procesów z upływem czasu maleje gradient potencjału pola elektrycznego, natężenie prądu oraz wydajność prądowa procesu, rośnie natomiast oporność ośrodka międzyelektrodowego i spadek potencjałów w warstwach przyelektrodowych. Prowadzi to do zmniejszenia wydajności drążenia, a nawet do całkowitego jego zatrzymania. Aby umożliwić stabilny przebieg procesu ciepło i produkty roztwarzania powinny być cały czas usuwane z przestrzeni międzyelektrodowej. Realizuje się to, poprzez zapewnienie wymuszonego przepływu elektrolitu przez szczelinę z dostatecznie dużą prędkością, pozwalającą na intensywną wymianę masy i ciepła.

Jak już wcześniej wspomniano jedną z głównych zalet ECM jest praktycznie brak zużycia narzędzia (elektrody). Jedynym spotykanym w praktyce mechanizmem zużycia (zniszczenia) elektrody jest wyładowanie elektryczne powstające w przestrzeni międzyelektrodowej. Do wyładowań może dochodzić w miejscach o istotnie mniejszej przewodności elektrycznej elektrolitu. Obszary takie powstają wskutek przyrostu koncentracji pary elektrolitu, wodoru lub nadmiernego wzrostu temperatury - aż do odparowania elektrolitu. Maleje wówczas szybkość roztwarzania i również grubość szczeliny międzyelektrodowej. Rośnie wtedy gwałtownie gradient potencjału pola elektrycznego do wartości, po osiągnięciu której, następuje wyładowanie elektryczne. Temperatura w obszarze wyładowania jest tak wysoka, że następuje wytopienie lub nawet odparowanie materiału elektrody i przedmiotu obrabianego. Jest to równoznaczne z uszkodzeniem PO oraz elektrody i przerwaniem procesu obróbki. Elektroda wymaga regeneracji lub nawet wymiany. Bardzo częstym powodem zwarcia są zjawiska kawitacji i wrzenia w szczelinie międzyelektrodowej. Pulsujące pęcherzyki, które pojawiają się w rezultacie lokalnych nagłych spadków ciśnienia i wzrostu temperatury elektrolitu poniżej wartości wynikającej z sił spójności - prognozy kawitacji.

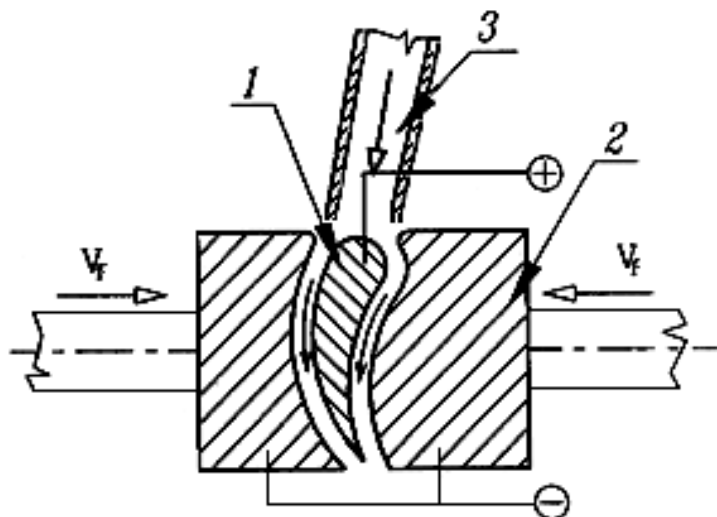
Przybliżone wyznaczenie stref kawitacyjnych można przeprowadzić na podstawie ciśnień statycznych w obszarze obróbki z warunku:

$$p_e(T_e) \leq p_{sat}(T_e) \quad (1.20)$$

gdzie: $p_{sat}(T_e)$ - ciśnienie pary nasyconej elektrolitu w danych warunkach przepływu. Miejsca powstawania stref kawitacyjnych są również silnie związane z kształtem katody i anody, czyli powierzchni ograniczających szczelinę międzyelektrodową. Obecnie obrabiarki elektrochemiczne wyposażone są w specjalne układy do wykrywania stanów przedzwarciovych, jednak ich niezawodność, głównie związana z krótkim czasem reakcji, nie zawsze jest wystarczająca. Dlatego też, automatyzacja klasycznego procesu elektrochemicznego jest utrudniona [84, 93], co jest jedną z przyczyn niewielkiego, w stosunku do zalet, obszaru zastosowań drążenia elektrochemicznego w przemyśle. Potencjalny obszar zastosowania obróbki ECM elektrodą kształtowaną obniżają również wysokie koszty związane z przygotowaniem procesu technologicznego (czasochłonne projektowanie, wysokie koszty wykonania), co powoduje, że metoda jest mało podatna na zmiany kształtu wytwarzanego elementu. Pomimo tego drążenie ECM posiada tradycyjne obszary zastosowań, gdzie pomimo przedstawionych powyżej wad jest w stanie konkurować z innymi metodami wytwarzania [81].

Typowe zastosowanie drążenia elektrochemicznego to kształtowanie łopatek turbin silników przepływowych, gdzie wykorzystywane są wszystkie zalety technologii elektrochemicznej [15, 12, 81, 82, 97]. Łopatki mają kształt krzywoliniowy oraz wykonywane są z trudnych do obróbki mechanicznej materiałów. Zastosowanie ECM umożliwia również otrzymanie warstwy wierzchniej pozbawionej wpływu wysokiej temperatury oraz mikropęknięć [100, 131]. W tym przypadku drążenie elektrochemiczne umożliwia wysokowydajne i bardzo dokładne kształtowanie tych elementów w ramach produkcji seryjnej. Wstępnie obrobione mechanicznie (kucie lub, rzadziej, frezowanie) półfabrykaty łopatek są następnie montowane w specjalnych kasetach i kształtowane elektrochemicznie. Drążenie elektrochemiczne znalazło również wiele zastosowań w przemyśle samochodowym, medycznym (wytwarzania protez stawów biodrowych ze stopów tytanu i kobaltu), obronnym (części raket oraz silników raketowych). Do niedawna, znaczącym obszarem zastosowań drążenia ECM było wytwarzanie narzędzi do obróbki plastycznej, czyli matryc, form czy kokili [13], jednak rozwój metod HSM, znacznie ograniczył zastosowanie ECM w tym obszarze.

Rozwój ECM spowodował, że coraz częściej obróbka ta stosowana jest do wytwarzania precyzyjnych elementów. Przykładowo, firma PHILIPS stosuje od 25 lat technologię opartą na drążeniu ECM, która umożliwia dokładne i wydajne kształtowanie precyzyjnych głowic tnących używanych w maszynkach do golenia [3, 115].



Rys. 1.4. Schemat drążenia łopatek turbin silników przepływowych; 1 - łopata, 2 - elektroda robocza, 3 - dopływ elektrolitu do kasety, v_f - prędkość posuwu elektrody roboczej [80].

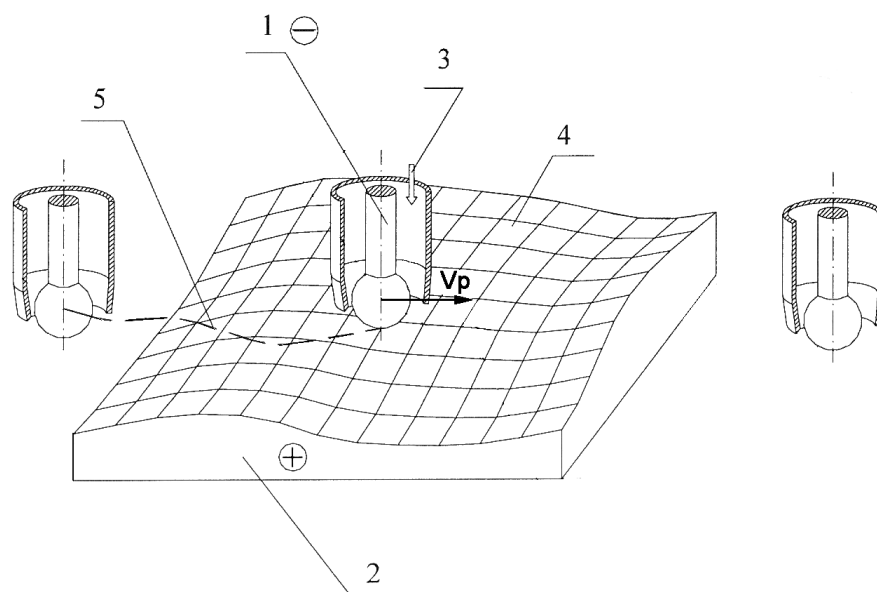
Drażenie jest również wykorzystywane w operacjach wykańczających [130, 132], jednak szersze zastosowania ograniczone są trudnościami związanymi z projektowaniem i wykonaniem elektrod oraz stosunkowo niską dokładnością, wynoszącą $0.1 \div 0.3 \text{ mm}$. Wymienione problemy powodują znaczne zwiększenie kosztów obróbki, oraz ograniczają efektywność wprowadzania elastycznych systemów produkcyjnych w wytwarzaniu matryc, foremników, tłoczników itp.

1.5.2. Obróbka elektrochemiczna elektrodą uniwersalną ECM - CNC

W przypadku drążenia elektrochemicznego odchylenie standardowe grubości szczeliny δ zależy przede wszystkim od wielkości powierzchni obrabianej. Im mniejsza powierzchnia obrabiana tym mniejsze zmiany warunków roztwarzania i grubości szczeliny, czyli mniejsze odchylenie standardowe, a wyraźnie większa dokładność obróbki. Fakt ten, bezużyteczny w warunkach drążenia, może być wykorzystany w przypadku obróbki elektrodą uniwersalną o prostym kształcie (np. walec, kula, prostopadłościan) i powierzchni wyraźnie mniejszej od powierzchni obrabianej [9, 37, 66, 76, 77, 78, 94, 105, 110, 124, 127, 128]. Elektroda ta przemieszcza się nad powierzchnią obrabianą wzdłuż odpowiednio zaprojektowanego toru (Rys. 1.5). W wyniku pojedynczego przejścia elektrody roboczej usuwany jest naddatek o grubości $a = 0.05 \div 2 \text{ mm}$. Obróbka ECM - CNC umożliwia otrzymanie większej od obróbki elektrodą kształtową dokładności (nawet do 0.02 mm) przy $Ra = 0.2 \div 2 \mu\text{m}$

[82, 91, 92]. Wzrost dokładności i poprawę jakości powierzchni uzyskuje się kosztem zmniejszenia wydajności obróbki [9, 78]. Zastosowanie obróbki elektrochemicznej o złożonej kinematyce elektrod umożliwia:

- znaczne skrócenie oraz uproszczenie etapu projektowania procesu technologicznego (nie ma konieczności przeprowadzenia korekcji kształtu elektrody),
- obróbkę dużych powierzchni z wykorzystaniem zasilaczy prądowych małej mocy,
- znaczne zmniejszenie gabarytów obrabiarek (mniejsze zasilacze, znacznie mniejsze układy obiegu elektrolitu),
- elastyczne projektowanie i realizację procesu technologicznego przy znacznie niższych kosztach.



Rys. 1.5. Schemat obróbki ECM - CNC uniwersalną elektrodą kulistą: 1 - elektroda robocza, 2 - przedmiot obrabiany, 3 - dysza doprowadzająca elektrolit, 4 - powierzchnia obrabiana, 5 - tor elektrody roboczej [48].

Ze względu na zmniejszoną wydajność w stosunku do klasycznego drażenia elektrochemicznego, potencjalny obszar zastosowań ECM - CNC to przede wszystkim obróbka wykańczająca złożonych powierzchni krzywoliniowych (np. po wstępnym frezowaniu frezem kulistym [90]), gdzie ECM - CNC daje możliwości:

- zmniejszenia kosztów narzędziowych (proste, niezuzywane się narzędzie),
- wykonywania elementów o podwyższonej wytrzymałości zmęczeniowej,
- możliwość obróbki dużych powierzchni z dużą chwilową gęstością prądu roboczego.

Modelowanie matematyczne i symulacja komputerowa ECM - CNC

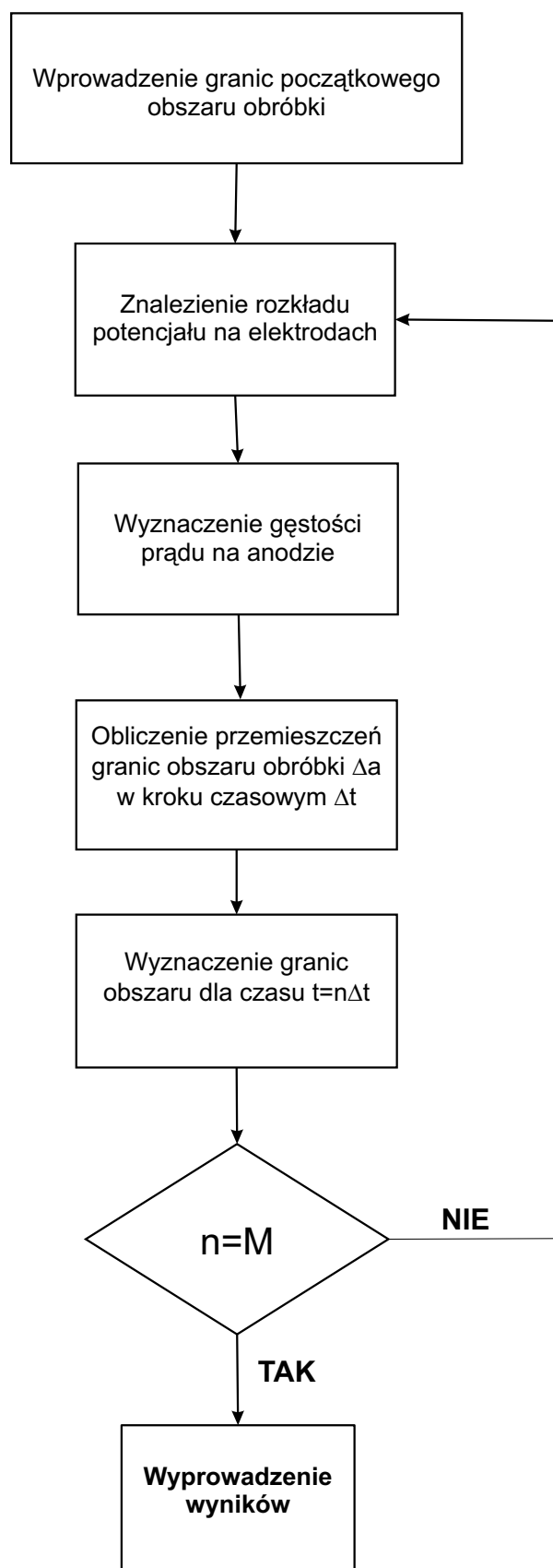
Opis ewolucji kształtu powierzchni kształtowanej elektrochemicznie z zastosowaniem elektrody uniwersalnej został przedstawiony w pracach [9, 45, 46, 47, 48, 53, 99, 101]. Numeryczne rozwiązanie równań (1.10), (1.11), (1.12) dla zadanego kształtu elektrody oraz jej trajektorii pozwala na uzyskanie kształtu powierzchni obrabianej F w dowolnej chwili czasu, a w szczególności po zadanym czasie obróbki t_k . Szczegółowo model matematyczny ECM - CNC wraz z przyjętymi założeniami upraszczającymi i ich uzasadnieniem został przedstawiony w pracach [45, 46]. Ze względu na niewielki obszar roztwarzania elektrochemicznego w modelu tym pominięto wpływ hydrodynamiki oraz pominięto możliwości wystąpienia nieciągłości roztwarzania anodowego (założono całkowite wypełnienie szczeliny międzyelektrodowej elektrolitem). Takie założenie pozwala na pominięcie trudności związanych z rozwiązaniem równań opisujących przepływ elektrolitu przez szczelinę międzyelektrodową, co jak wiadomo jest źródłem największych błędów przy przewidywaniu kształtu PO po obróbce. Z przedstawionych w pracy [9] wyników badań widać, że założenie to dla elektrody uniwersalnej nie wprowadza znaczących błędów do symulacji.

Opracowane na podstawie tego modelu oprogramowanie do symulacji obróbki ECM - CNC [36, 47, 48, 52, 53] umożliwia wykorzystanie wyników symulacji komputerowej do budowy bazy danych technologicznych dla procesu ECM - CNC. Wyniki otrzymane z symulacji są podstawą do dalszego projektowania obróbki. Przykłady typowych charakterystyk procesu ECM - CNC przedstawiono na Rys. 1.7 i Rys. 1.8.

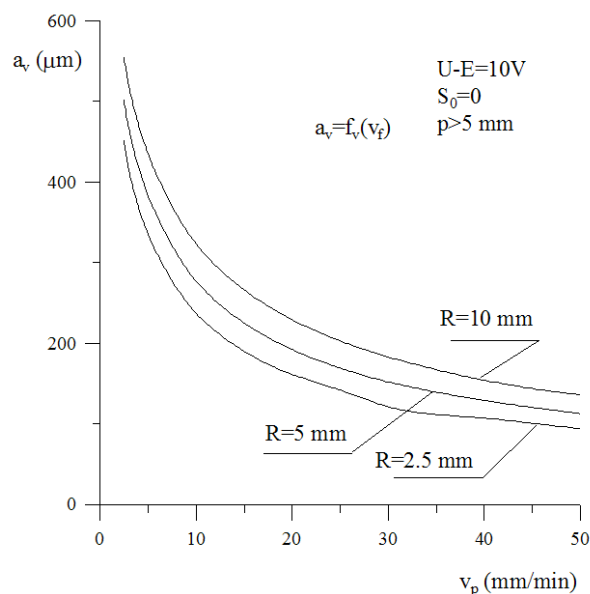
Podstawowe charakterystyki technologiczne procesu ECM - CNC

Przedstawione w pracy [9] wyniki badań umożliwiły zgromadzenie podstawowych danych technologicznych, które mogą być podstawą do projektowania procesu technologicznego ECM - CNC. Pomijając wpływ właściwości elektrolitu (temperatura, pH , stężenie) oraz materiału PO i ER, podstawowymi parametrami procesu ECM - CNC są: napięcie międzyelektrodowe U prędkość przesuwu elektrody roboczej v_p , grubość początkowa szczeliny międzyelektrodowej S_o , promień elektrody R oraz posuw poprzeczny c . Natomiast podstawowymi wskaźnikami technologicznymi procesu ECM - CNC są: grubość usuniętego naddatku a , chropowatość powierzchni (Ra , Rz), falistość powierzchni D oraz wydajność obróbki V_w . W sposób opisowy zależność pomiędzy a , D od parametrów procesu przedstawiają się następująco [9]:

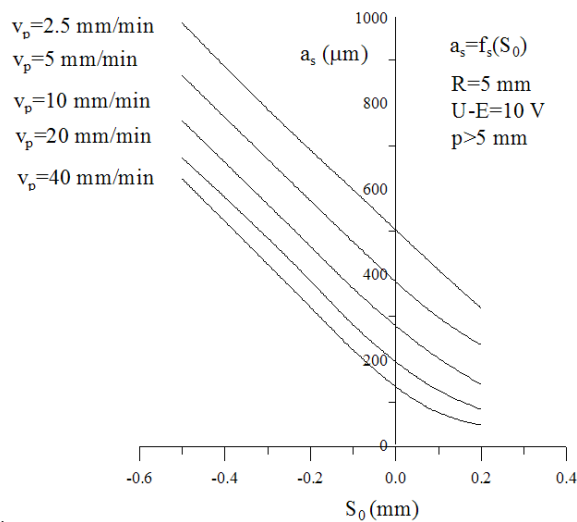
1. Wzrost napięcia międzyelektrodowego U powoduje:
 - wzrost grubości usuwanego naddatku,
 - zmniejszenie falistości powierzchni (zwiększa się zasięg oddziaływania ER),



Rys. 1.6. Algorytm rozwiązania uwzględniający procedurę kroków czasowych; Δt - krok czasowy, $M = t_k/\Delta t$ - ilość kroków czasowych wynikająca z dyskretyzacji czasu, t_k - czas obróbki [9].



Rys. 1.7. Charakterystyki otrzymane na podstawie symulacji przedstawiające zmiany grubości usuniętego naddatku a_v w zależności od prędkości przesuwu elektrody roboczej v_p dla różnych promieni R elektrody roboczej [96].



Rys. 1.8. Charakterystyki otrzymane na podstawie symulacji ECM - CNC opisujące zmiany grubości usuniętego naddatku a_s w zależności od początkowej grubości szczeliny międzyelektrodowej S_0 dla różnych prędkości v_p [96].

także małe wartości U , dla których grubość usuwanego naddatku jest niewielka, sprzyjają zmniejszeniu falistości.

2. Wzrost prędkości przesuwu elektrody roboczej v_p wpływa na:
 - zmniejszenie grubości usuniętego naddatku (skrócenie czasu oddziaływania ER na PO),
 - zmniejszenie falistości powierzchni.
3. Wzrost grubości początkowej szczeliny międzyelektrodowej S_o powoduje:
 - zmniejszenie grubości usuniętego naddatku,
 - zmniejszenie falistości powierzchni.
4. Zwiększenie promienia elektrody roboczej wpływa na zwiększenie grubości usuniętego naddatku. Wpływ R na falistość powierzchni związany jest z dwoma tendencjami. Zwiększenie R zwiększa obszar oddziaływania elektrody roboczej (sprzyja to zmniejszeniu D), z drugiej strony następuje zwiększenie a niekorzystnie wpływające na D . Rzeczywista wartość D jest wypadkową tych tendencji.
5. Zwiększenie posuwu poprzecznego elektrody roboczej c powoduje:
 - zmniejszenie grubości usuniętego naddatku,
 - zwiększenie falistości powierzchni.

Wydajność obróbki V_w określana jest na podstawie grubości usuniętego naddatku i czasu obróbki (prędkości przesuwu elektrody v_p). Wartości V_w dla ECM - CNC są znacznie mniejsze niż przy klasycznym drążeniu. Przykładowo: dla promienia elektrody $R = 9 \text{ mm}$ maksymalna wydajność jest w granicach $200 \text{ mm}^3/\text{min}$.

Chropowatość powierzchni po obróbce ECM - CNC, tak jak i w drążeniu zależy od zjawisk zachodzących w warstwach przyelektrodowych oraz warunków hydrodynamicznych panujących w szczelinie międzyelektrodowej, umożliwiających prawidłowe usuwanie produktów reakcji roztwarzania. Przy założeniu, że warunki hydrodynamiczne procesu dobrane są prawidłowo chropowatość powierzchni maleje wraz ze zwiększeniem gęstości prądu czyli zwiększeniem prędkości przesuwu elektrody roboczej i zmniejszeniem początkowej szczeliny międzyelektrodowej. Możliwa do uzyskania chropowatość powierzchni obrabianej jest w granicach $Ra \approx 0.2 \div 2.0 \mu\text{m}$.

1.6. Obróbka elektrochemiczna w procesach hybrydowych

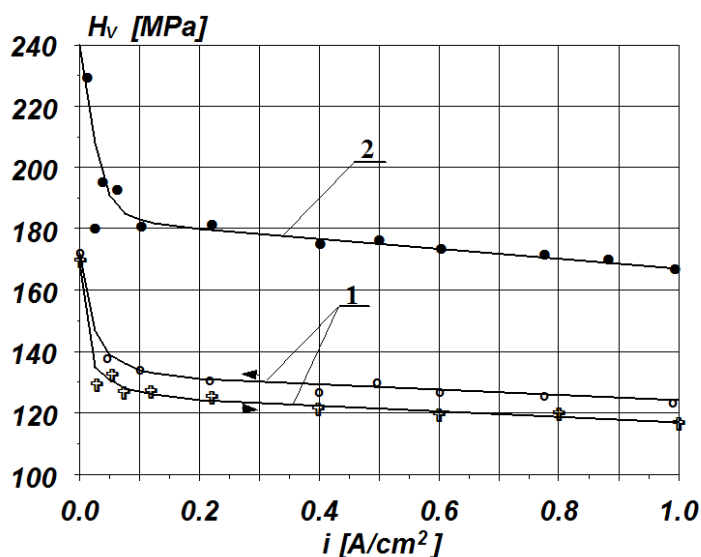
Aktualnie można wyróżnić dwa kierunki rozwoju elektrochemicznych metod obróbki [75]:

- obróbka elektrochemiczna - bezstykowa,
- obróbka hybrydowa (elektrochemiczna - mechaniczna lub elektro - fizyko - chemiczna).

Badany proces obróbki USECM - CNC należy do grupy obróbek hybrydowych. Definicja procesu hybrydowego, w aspekcie obróbki ubytkowej, została podana w [43] i mówi, że procesem hybrydowym nazywa się taką metodę obróbki, w której różne lub w różny sposób wytworzone formy energii zostają jednocześnie, tzn. w jednym zabiegu obróbkowym, wprzęgnięte w strefę oddziaływania na obrabiany materiał. Jak już wcześniej wspomniano rosnące zapotrzebowanie przemysłu na nowe materiały wymusza rozwój i poszukiwanie nowych, bardziej efektywnych sposobów obróbki. Umiejętny dobór oddziaływań mechanicznych, cieplnych i chemicznych na obrabiany materiał, w wielu przypadkach tworzy korzystne rozwiązania technologiczne. Wśród wprzęganych do innych procesów oddziaływań szczególne miejsce zajmują promieniowanie laserowe, drgania ultradźwiękowe, ścierniwa oraz erozja elektryczna, elektrochemiczna czy chemiczna. Używane one są do wspomagania i intensyfikowania istniejących procesów wytwarzania. Metody obróbki hybrydowej możemy podzielić na dwie kategorie [43, 49]:

- metody, w których wszystkie łączone oddziaływania uczestniczą bezpośrednio w usuwaniu nadmiaru obróbkowego. Do tej grupy możemy zaliczyć np. szlifowanie elektrochemiczne czy obróbkę elektroerozyjno - elektrochemiczną,
- metody, w których tylko jedno z łączonych oddziaływań bezpośrednio usuwa nadmiar obróbkowy, natomiast pozostałe oddziaływania korzystnie zmieniają warunki usuwania nadmiaru poprawiając wskaźniki technologiczne procesu. Do tej grupy należy, badany w ramach pracy, proces obróbki elektrochemicznej drgającą z częstotliwością ultradźwiękową elektrodą uniwersalną. Nadmiar usuwany jest w wyniku roztwarzania elektrochemicznego, natomiast drgania ultradźwiękowe elektrody roboczej powodują korzystną zmianę warunków w których zachodzi proces roztwarzania.

Wśród istniejących i rozwijanych metod hybrydowych, znaczące miejsce zajmują metody oparte na roztwarzaniu elektrochemicznym przedmiotu obrabianego. Pozytywny efekt wprowadzenia oddziaływań elektrochemicznych to zmiana gęstości dyslokacji w warstwie powierzchniowej przedmiotu obrabianego ułatwiająca odkształcenia plastyczne oraz redukująca wytrzymałość oraz twardość usuwanego materiału [38, 43, 49]. Nawet niewielkie wartości gęstości prądu powodują znaczne obniżenie H_v (Rys. 1.9). Oddziaływania elektrochemiczne mogą również wpływać na zmiany warunków fizycznych w strefie obróbki. Przykładowo, gaz będący produktem reakcji roztwarzania, może warunkować powstawanie wyładowań elektrycznych w elektrolicie [49]. Poniżej zostanie przedstawiona charakterystyka dwóch wybranych metod hybrydowych: obróbki elektrochemiczno ścierniej (ECG) oraz obróbki elektrochemicznej wspomaganiej ultradźwiękami (USECM). Obszar zastosowania obu tych



Rys. 1.9. Wpływ gęstości prądu rozpuszczania anodowego na mikrotwardość powierzchni obrabianej dla następujących materiałów: 1 - żelazo Armco, 2 - stal 3H13 [38].

metod to obróbka wykańczająca powierzchni krzywoliniowych. Zarówno ECG jak i USECM może być realizowana z zastosowaniem uniwersalnej elektrody roboczej [98]. Obie przedstawione poniżej metody wskazują możliwe kierunki rozwoju obróbki ECM - CNC, którego celem jest zwiększenie niezawodności usuwania materiału obrabianego oraz zwiększenie wydajności obróbki.

1.6.1. Obróbka elektrochemiczno - ścierna ECG

Obróbka elektrochemiczno - ścierna zaliczana jest do grupy obróbek elektrochemiczno - mechanicznych. Wzajemna kombinacja procesu rozpuszczania elektrochemicznego oraz mikroskrawania ziarnami ściernymi pozwala na dokładne i wysoko-wydajne kształtowanie materiałów trudnoobrabialnych, uzyskując przy tym wysoką jakość warstwy wierzchniej [30, 33, 104, 126]. Skrawanie ziarnami ściernymi działa depasywująco na powierzchnię obrabianą i ułatwia dostęp elektrolitu do nieroztworzonego materiału. Natomiast, dzięki rozpuszczaniu elektrochemicznemu w procesie mikroskrawania występują znacznie mniejsze siły, co zwiększa żywotność i zmniejsza zużycie ściernicy [41, 126]. W zależności od kształtu zastosowanego narzędzia do obróbki oraz wzajemnej kinematyki PO i ER możemy wyróżnić następujące odmiany kinematyczne ECG:

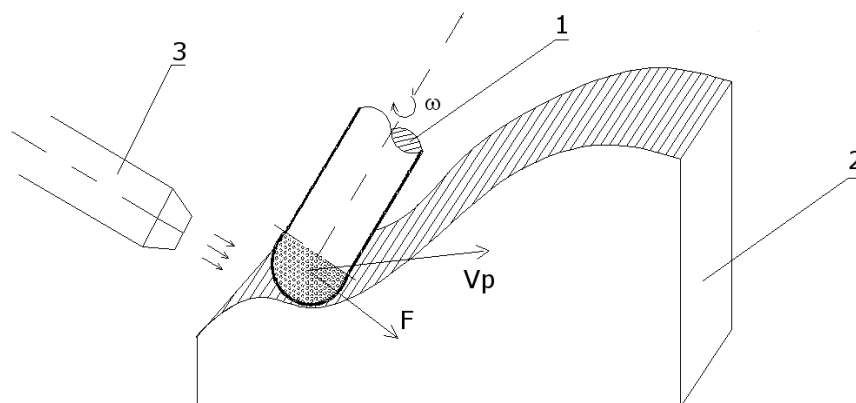
- szlifowanie elektrochemiczne,
- gładzenie elektrochemiczne,

- obróbka uniwersalną ściernicą (elektrodą) kulistą,
- obróbka luźnym ścierniwem.

Mechanizm usuwania nadmiaru w obróbce ECG oparty jest na dwóch wiodących procesach [41]:

- mikroskrawanie ziarnami ściernymi działające depasywująco na powierzchni obrabianą i ułatwiające dostęp elektrolitu do jeszcze nieobrobionej powierzchni,
- roztwarzanie elektrochemiczne powodujące zmniejszenie sił skrawania zwiększając żywotność ściernicy.

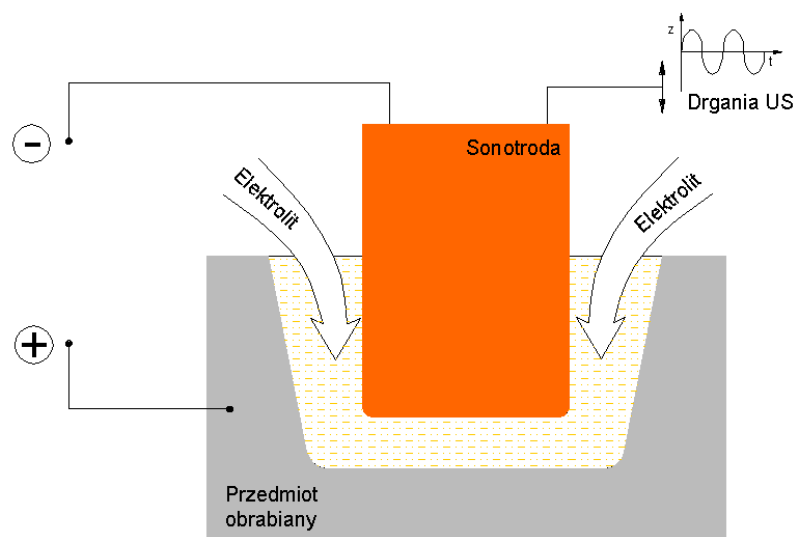
Ilościowy udział tych oddziaływań na obrabiany materiał zależy jest od parametrów procesu a głównie docisku ściernicy (obróbka z dociskiem elastycznym) lub położeniem czoła ściernicy w stosunku do materiału obrabianego. W odmianie ECG z użyciem uniwersalnej ściernicy kulistej mikroskrawanie odgrywa bardzo istotną rolę w usuwaniu warstwy pasywacyjnej powstającej na nieobrabianej w danej chwili powierzchni, która jest polewana elektrolitem. Zastosowanie obracającej się elektrody kulistej - ściernicy pozwala na wysokowydajną obróbkę czołem elektrody znajdującym się poniżej powierzchni obrabianej. Z uwagi na to, że ściernica wykonuje ruch obrotowy nawet gdy wystąpi stan zwarcia zostanie on szybko zlikwidowany. Dzięki temu proces ECG - CNC może być realizowany efektywnie gdy czoło elektrody znajduje się poniżej powierzchni obrabianej, co zdecydowanie zwiększa wydajność tego procesu [83, 86, 87, 88]. Jak wskazują wyniki badań przedstawione w [86] proces ECG - CNC może być efektywnie stosowany do obróbki wykańczającej złożonych powierzchni kształtowych, wstępnie obrobionych innymi metodami (np. klasycznym frezowaniem czy obróbką elektroerozyjną).



Rys. 1.10. Schemat szlifowania elektrochemicznego powierzchni płaskiej kulistą ściernicą; F - siła docisku elektrody, v_p - prędkość przesuwu wzdłużnego ściernicy, 1 - ER, 2 - PO, 3 - dysza doprowadzająca elektrolit [80].

1.6.2. Obróbka elektrochemiczna wspomagana ultradźwiękami

W obróbce elektrochemicznej wspomaganej ultradźwiękami mechanizm usuwania nadmiaru oparty jest na roztwarzaniu elektrochemicznym, natomiast celem wprowadzenia drgań ultradźwiękowych elektrody roboczej jest zmiana przebiegu procesu roztwarzania elektrochemicznego (ultradźwięki nie uczestniczą bezpośrednio w usuwaniu nadmiaru). Literatura dotycząca obróbki elektrochemicznej wspomaganej drganiami ultradźwiękowymi nie zawiera zbyt dużo pozycji [44, 51, 72, 73, 108, 109], jednak we wszystkich stwierdza się że drgania ultradźwiękowe elektrody powodują zwiększenie szybkości roztwarzania oraz zwiększenie szybkości odprowadzania produktów reakcji elektrodowych ze szczeliny międzyelektrodowej. Wytworzone przez ultradźwięki pole ciśnienia i prędkości powoduje mieszanie się elektrolitu co doprowadza do wyrównania koncentracji jonów, a przy optymalnie dobranych wartościach natężenia drgań może spowodować nawet całkowite usunięcie polaryzacji stężeniowej.



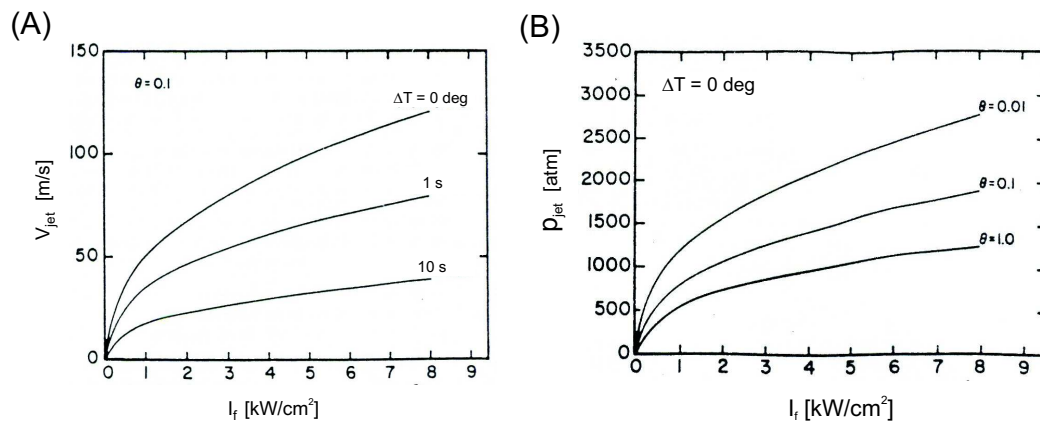
Rys. 1.11. Schemat obróbki elektrochemicznej drgającą z częstotliwością ultradźwiękową elektrodą roboczą.

W [44] autor stwierdza, że dzięki powstawaniu przy powierzchni anody *mikro - strug* następuje zwiększenie intensywności wymiany masy oraz ładunku elektrycznego, co prowadzi do wzrostu prędkości roztwarzania. Również na podstawie dotychczasowych badań przeprowadzonych przy współudziale autora w Zakładzie Niekonwencjonalnych Technologii Produkcyjnych IZTW [107, 111, 112] można stwierdzić że wprowadzenie drgań ultradźwiękowych:

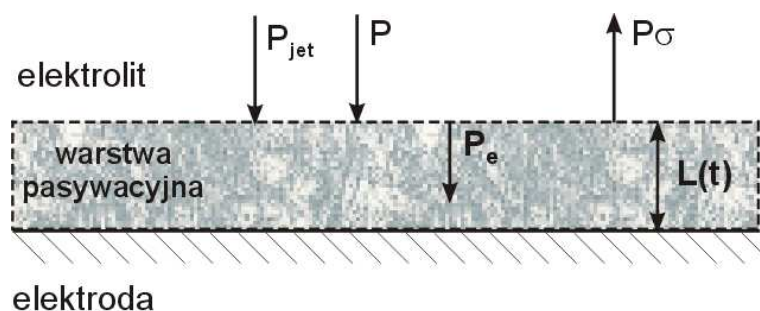
- zmienia przebieg procesu roztwarzania elektrochemicznego, głównie przez zmianę wartości E , ηk_v , κ ,
- poprawia ewakuację produktów roztwarzania elektrochemicznego z warstw przyelektrodowych.

Obszerną analizę zjawisk związanych z oddziaływaniem ultradźwięków na depasywację powierzchni przedstawiono w [72, 73], gdzie założono, że oddziaływanie ultradźwięków związane jest jedynie ze zjawiskiem kawitacji. Zapadający się pęcherzyk kawitacyjny deformuje się do postaci lejkowatego wiru skierowanego końcówką do powierzchni elektrody i doczepiony do powierzchni elektrody przekazuje mu swoją energię a następnie zapada się nieodwracalnie. W konsekwencji, lokalnie powstające *mikro - strugi* elektrolitu, mają znaczący wpływ na skład oraz właściwości warstw elektrolitu przyległych do elektrody. W [72] autorzy przedstawili analizę teoretyczną mającą na celu określenie zależności pomiędzy natężeniem drgań ultradźwiękowych a parametrami *mikro - strug*. Na podstawie modelu teoretycznego określono prędkość *mikro - strugi* ($v_{jet} \approx 100 \text{ m/s}$) i stwierdzono, że v_{jet} rośnie wraz ze wzrostem natężenia drgań ultradźwiękowych (Rys. 1.12a). Dla częstotliwości drgań $f = 1.58 \text{ MHz}$ oszacowano wartość ciśnienia powstającego podczas zapadania się pęcherzyka kawitacyjnego (Rys. 1.12b) i określono jego wpływ na depasywację powierzchni.

Zgodnie z [113] przerwanie tlenkowej warstwy pasywacyjnej nastąpi w momencie kiedy ciśnienie elektrostrykcji będzie większe od napięcia powierzchniowego (Rys. 1.13).

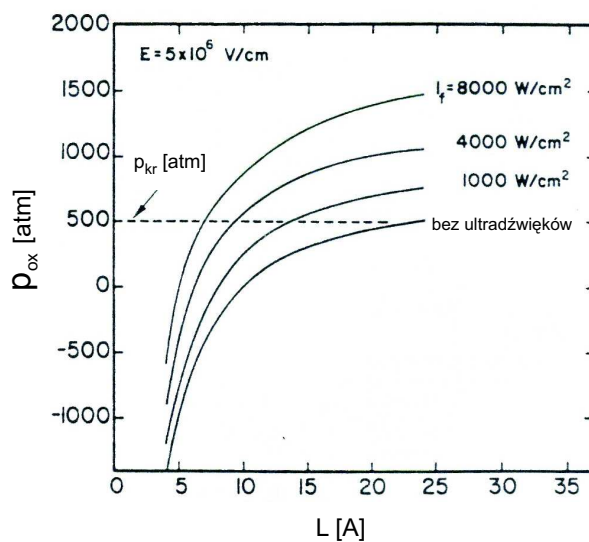


Rys. 1.12. (A) - zależność teoretyczna pomiędzy prędkością *mikro - strugi* v_{jet} a natężeniem drgań ultradźwiękowych dla czasu oddziaływania ultradźwięków 1 s i 10 s oraz przy założeniu stałej temperatury elektrolitu ($\Delta T = 0 \text{ deg}$);
 (B) - Zależność ciśnienia *mikro - strugi* od natężenia drgań ultradźwiękowych, θ - parametr określający stopień pokrycia powierzchni pęcherzykami kawitacyjnymi [72].



Rys. 1.13. Siły działające na tlenkową warstwę pasywacyjną:

P_δ - napięcie powierzchniowe, P_e - ciśnienie elektrostrykcji, P_{jet} - ciśnienie *mikrostrugi*, P - ciśnienie elektrolitu, $L(t)$ - grubość warstwy pasywacyjnej [72].



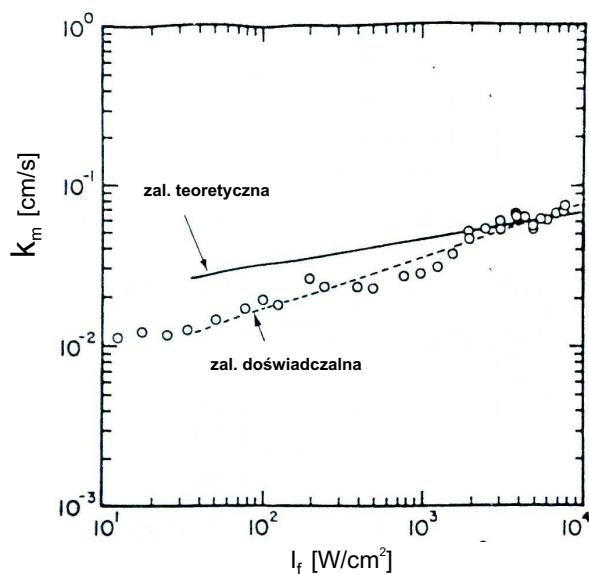
Rys. 1.14. Zależność teoretyczna pomiędzy grubością warstwy pasywacyjnej a ciśnieniem potrzebnym do jej utworzenia [72].

Oddziaływanie zapadającego się pęcherzyka kawitacyjnego zmniejsza wartości ciśnienia krytycznego potrzebnego do przzerwiania tlenkowej warstwy pasywacyjnej. Przedstawione na Rys. 1.14 zależności pomiędzy grubością warstwy pasywacyjnej a natężeniem drgań ultradźwiękowych pokazują, że wraz ze wzrostem grubości warstwy pasywacyjnej, wzrasta jej wytrzymałość. Analizując proces bez ultradźwięków, można się spodziewać, że powyżej $L_{kr} = 23 \text{ \AA}$ (czyli grubości określonej na podstawie ciśnienia krytycznego), integralność warstwy pasywacyjnej będzie się obniżać. W obecności ultradźwięków, ciśnienie uderzenia *mikro - strugi* wywiera dodatkowy wpływ, powodując obniżenie wartości L_{kr} , która również maleje wraz ze zwiększeniem natężenia drgań ultradźwiękowych. Przeprowadzone dla czystego żelaza oraz żeliwa, wodnego roztworu H_2SO_4 , $f = 1.58 \text{ MHz}$ (natężenie drgań do 7.8 kW/cm^2) badania doświadczalne potwierdziły wyniki otrzymane z analizy teoretycznej [73]. Drgania ultradźwiękowe wpływają znacząco na czas pasywacji oraz powstrzymują repasywację powierzchni. Określono również wpływ natężenia ultradźwięków na zdefiniowany przez autorów współczynnik transportu masy (Rys. 1.15a), który przedstawia się następująco [73]:

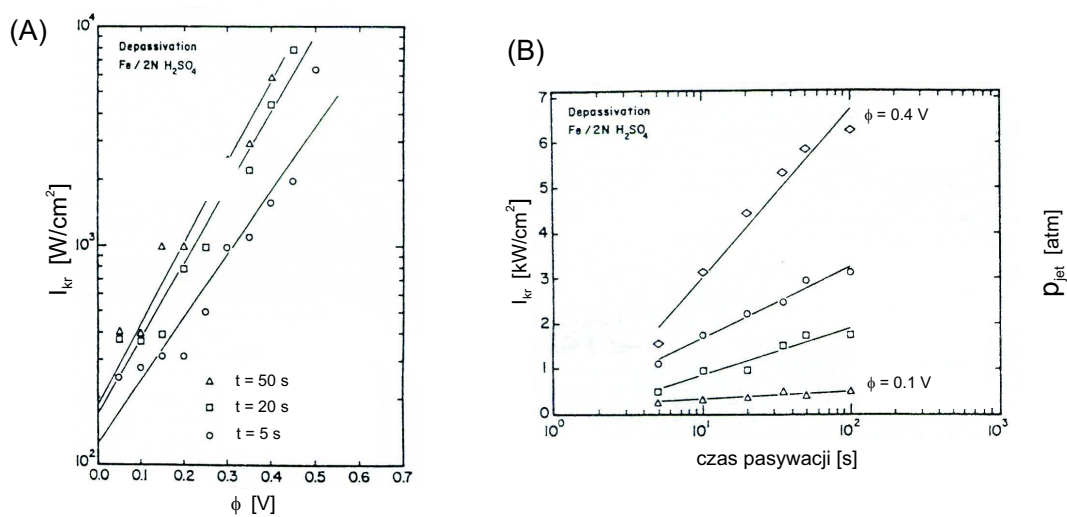
$$k_m = 0.00383 I_f^{1/3} \quad (1.21)$$

gdzie: k_m - współczynnik transportu masy, I_f - natężenie drgań ultradźwiękowych. Przeprowadzone badania pokazały również, że wartość natężenia ultradźwięków prowadząca do całkowitej depasywacji zależy od potencjału anody (Rys. 1.15b) oraz od czasu pasywacji (Rys. 1.16). Z przedstawionych informacji wynika, że kawitacja odgrywa znaczącą rolę w intensyfikacji transportu masy na granicy elektroda - elektrolit (w rozważanym przypadku przed wszystkim likwidując ograniczenia pasywacyjne). Intensywność oddziaływań ultradźwięków zależy od ilości i stopnia pokrycia powierzchni elektrody zapadającymi się pęcherzykami kawitacyjnymi.

Na podstawie powyższych informacji można stwierdzić, że wspomaganie obróbki elektrochemicznej drganiami ultradźwiękowymi umożliwia zwiększenie wydajności obróbki i poprawę jakości warstwy wierzchniej (poprzez zmniejszenie chropowatości powierzchni).



Rys. 1.15. Zależność teoretyczna i doświadczalna pomiędzy natężeniem drgań ultradźwiękowych a współczynnikiem transportu masy k_m [73].



Rys. 1.16. (A) - zależność doświadczalna pomiędzy wartością potencjału anody a krytycznym natężeniem drgań ultradźwiękowych dla różnych czasów pasywacji; (B) - zależność doświadczalna pomiędzy czasem pasywacji a krytycznym natężeniem drgań ultradźwiękowych dla różnych potencjałów anody [73].

1.7. Wnioski z analizy literatury

Przeprowadzona analiza literatury pozwoliła na wyciągnięcie następujących wniosków:

- najbardziej rozpowszechnioną odmianą kinematyczną obróbki elektrochemicznej jest drążenie;
- zapewnienie odpowiednich warunków przepływu w szczelinie jest podstawowym warunkiem poprawnego przebiegu procesu obróbki elektrochemicznej umożliwiającym osiągnięcie dobrej jakości powierzchni i dokładności wymiarowej oraz optymalnej wydajności procesu;
- dokładność modelowania procesu roztwarzania elektrochemicznego w dużym stopniu zależy od możliwości rozwiązania zagadnienia przepływu wielofazowego przez szczelinę międzyelektrodową. Charakter zjawisk zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej powoduje, że rozwiązanie równań przepływu odbywa się ze znacznymi uproszczeniami dotyczącymi rodzaju przepływu, rozkładu fazy gazowej i rozkładu temperatury;
- zastosowanie uniwersalnej elektrody roboczej umożliwia zwiększenie dokładności obróbki elektrochemicznej. Pomimo tego, że proces ten został dokładnie opisany w wielu publikacjach, ta odmiana ECM nie znalazła zastosowania przemysłowego. Powodem tego może być mała wydajność obróbki oraz mniejsza niezawodność usuwania nadmiaru obróbkowego;
- zastosowanie materiałów konstrukcyjnych o coraz wyższych właściwościach mechanicznych wymusza poszukiwanie nowych, efektywnych i tanich sposobów obróbki. Jeden z kierunków poszukiwań to kombinacje oddziaływań mechanicznych, cieplnych i chemicznych na obrabiany materiał, co w wielu przypadkach tworzy korzystne rozwiązania technologiczne. Szczególne miejsce zajmuje obróbka elektrochemiczna ECM, ponieważ jako jedna z niewielu przebiega bez działania wysokiej temperatury oraz oddziaływania mechanicznego.
- istnieją potencjalne możliwości modyfikacji obróbki ECM - CNC które mają na celu zwiększenie wydajności oraz poprawę niezawodności usuwania nadmiaru;
- stan wiedzy o wpływie drgań ultradźwiękowych elektrody na proces roztwarzania elektrochemicznego jest ograniczony, a do jego rozszerzenia konieczne są dalsze badania;
- mimo nielicznych publikacji dotyczących procesu obróbki elektrochemicznej wspomagananej ultradźwiękami można stwierdzić, że drgania ultradźwiękowe elektrody roboczej powodują zwiększenie szybkości roztwarzania, zwiększenie szybkości

odprowadzania produktów i ciepła ze szczeliny międzyelektrodowej. Powoduje to wyraźny wzrost wydajności oraz zwykle poprawę chropowatości powierzchni;

- dotychczas przeprowadzone badania procesu drążenia elektrochemicznego drgająca elektrodą nie uprawniają do sformułowania wniosków dotyczących procesu USECM - CNC wspomaganego ultradźwiękami ze względu na inną kinematykę ruchu elektrod;
- badania procesu obróbki ECM - CNC wspomaganą ultradźwiękami nie były jeszcze prowadzone.

1.8. Cel i zakres pracy

Na podstawie danych literaturowych i badań własnych określono cel pracy, którym jest poznanie procesu obróbki elektrochemicznej elektrodą uniwersalną wspomaganą drganiem ultradźwiękowymi. Cel ten został osiągnięty poprzez realizację pracy w następujących etapach

- **Modyfikacje modelu obróbki ECM - CNC** mająca na celu uwzględnienie drgań elektrody roboczej z częstotliwością ultradźwiękową. Na bazie stworzonego modelu opracowane zostało oprogramowanie do symulacji obróbki elektrochemicznej elektrodą uniwersalną wspomaganą drganiem ultradźwiękowymi. Umożliwiło ono obliczenie grubości usuniętego naddatku, błędów kształtu na granicy kolejnych przejść elektrody oraz wizualizację kształtu przedmiotu po obróbce, dla zadanych parametrów procesu takich jak: napięcie międzyelektrodowe, prędkość przesuwu elektrody, grubość początkowej szczeliny międzyelektrodowej, amplituda drgań ultradźwiękowych oraz posuw poprzeczny elektrody.
- **Opracowanie modelu numerycznego przepływu przez szczelinę międzyelektrodową.** W ramach tej części pracy określono wpływ drgań na intensyfikację i lokalizację zjawiska kawitacji w szczelinie międzyelektrodowej. Wstępna analiza literatury oraz przeprowadzone dotychczas badania własne pozwoliły na stwierdzenie, że głównymi czynnikami powodującymi zmianę charakteru roztwarzania elektrochemicznego są zjawiska wtórne związane z wprowadzeniem drgań ultradźwiękowych - głównie kawitacja oraz zjawiska cieplne, będące wynikiem lokalnych sił powstałych w ośrodku. Na podstawie prac [72, 73] można stwierdzić, że kawitacja odgrywa znaczącą rolę w procesie roztwarzania elektrochemicznego wspomaganego ultradźwiękami. W trakcie modelowania USECM - CNC główny nacisk został więc postawiony na:
 - opis warunków hydrodynamicznych w szczelinie (pole ciśnień, pole prędkości),

- wpływ amplitudy drgań ultradźwiękowych na przepływ w szczelinie międzyelektrodowej,
- określenie możliwości powstawania zjawisk kawitacyjnych i ich wpływ na procesy elektrodowe.
- **Weryfikacja doświadczalna opracowanego modelu.** Na wstępie przeprowadzono badania drążenia USECM, które miały na celu określenie podstawowych zależności związanych z wprowadzeniem drgań ultradźwiękowych. W dalszej części przeprowadzono badania USECM - CNC dla pojedynczego przejścia elektrody (badania rozpoznawcze) oraz z posuwem poprzecznym elektrody (tzw. wierszowaniem). Badania oraz analiza wyników została wykonana zgodnie z teorią eksperymentu. Jako funkcję obiektu badań przyjęto wielomiany oraz zastosowano sieci neuronowe.
- **Analiza zjawisk zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej.** W tej części pracy określone zostały warunki powstawania kawitacji w szczelinie międzyelektrodowej oraz ich wpływ na procesy zachodzące w strefie obróbki.

W ramach realizacji pracy zostały również przeanalizowane aspekty techniczne zastosowania ultradźwięków, dotyczące m. in.: projektowania elektrod, które powinny spełniać postawione wymagania dotyczące odpowiedniego wzmocnienia fali US.

Zrealizowanie pracy w przedstawionych wyżej etapach umożliwi określenie podstawowych zależności technologicznych procesu USECM - CNC. Przeprowadzona analiza numeryczna oraz badania doświadczalne umożliwią modyfikację systemu komputerowego wspomaganie i realizacji obróbki elektrochemicznej elektrodą uniwersalną.

Opracowanie modelu numerycznego przepływu w szczelinie międzyelektrodowej pozwoliło na zbadanie wpływu amplitudy drgań ultradźwiękowych na charakter zjawisk zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej. Interpretacja otrzymanych wyników oraz analiza warunków powstawania zjawisk kawitacji pozwoliła na wyjaśnienie mechanizmu zwiększenia transportu masy w szczelinie międzyelektrodowej. Należy też zaznaczyć, że opracowany model numeryczny przepływu może być z powodzeniem wykorzystany do interpretacji zjawisk zachodzących w innych procesach obróbkowych wspomaganym drganiem ultradźwiękowymi (np. USED, USM).

Rozdział 2

Fale ultradźwiękowe jako źródło energii

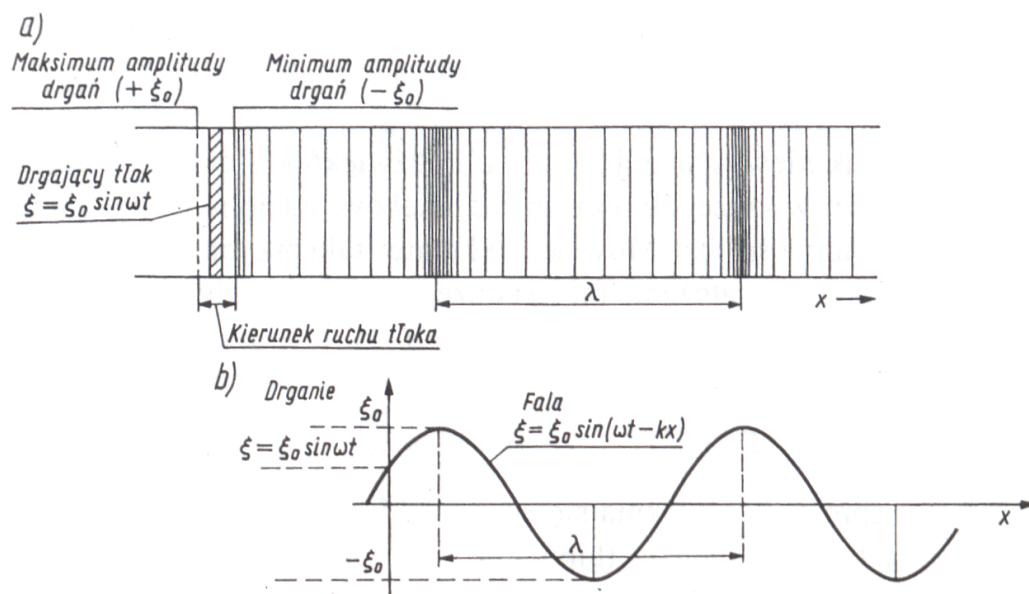
2.1. Podstawowe wiadomości o falach sprężystych

Pełny zakres fal sprężystych występujących w przyrodzie lub wytwarzanych z użyciem urządzeń technicznych obejmuje bardzo szeroki przedział częstotliwości, aż do 10^{13} Hz. Zakres ten można podzielić na [59]:

- infradźwięki, (inaczej zwane poddźwiękami) obejmujące obszar częstotliwości poniżej 16 Hz;
- dźwięki słyszalne - zakres częstotliwości 16 Hz - 16 kHz, (niektóre źródła przyjmują za górną granicę 20 kHz);
- ultradźwięki (naddźwięki), których dolną granicę wyznacza częstotliwość 16 kHz (20 kHz). Fale powyżej tej częstotliwości mogą być rejestrowane (odbierane) tylko różnymi urządzeniami, nie są natomiast rejestrowane przez ucho ludzkie. Górna granica częstotliwości ultradźwięków wynosi 10^9 Hz.
- hiperdźwięki - czyli fale sprężyste występujące w sposób naturalny jako fale cieplne związane z drganiami cząsteczek ośrodka i atomów w sieci krystalicznej. Graniczna częstotliwość dla hiperdźwięków to 10^{12} Hz. Jest ona wyznaczona przez minimalną długość fali porównywalną z odstępami międzyatomowymi.

Charakter fal sprężystych w każdym z wymienionych przedziałów częstotliwości jest taki sam. Różnica polega tylko na innej częstotliwości (innej długości fali), a sposób powstawiania i rozchodzenia się fal jest określony przez te same prawa fizyczne. Klasyczny opis rozchodzenia się fal sprężystych polega na przyjęciu założenia o ciągłości materii, bez uwzględniania jej struktury (atomy, cząsteczki). Dzięki takiemu zało-

zeniu ośrodek możemy podzielić na elementy o wymiarach liniowych bardzo małych w porównaniu z długością fali. Są to jednak elementy tak duże, że możemy do nich stosować prawa termodynamiki oparte na prawach statystycznych. W ten sposób wydzielony fragment ośrodka przy rozpatrywaniu fali sprężystej nazywamy cząstką akustyczną. Jedynie dla fal o dużym natężeniu i gdy niejednorodności ośrodka są porównywalne z długością fali tak przybliżony opis jest niewystarczający.



Rys. 2.1. Fala sprężysta w ośrodku; a) płaska fala podłużna wzbudzona ruchem tłoka, b) zmiany wychylenia ξ fali biegnącej w kierunku osi x [59].

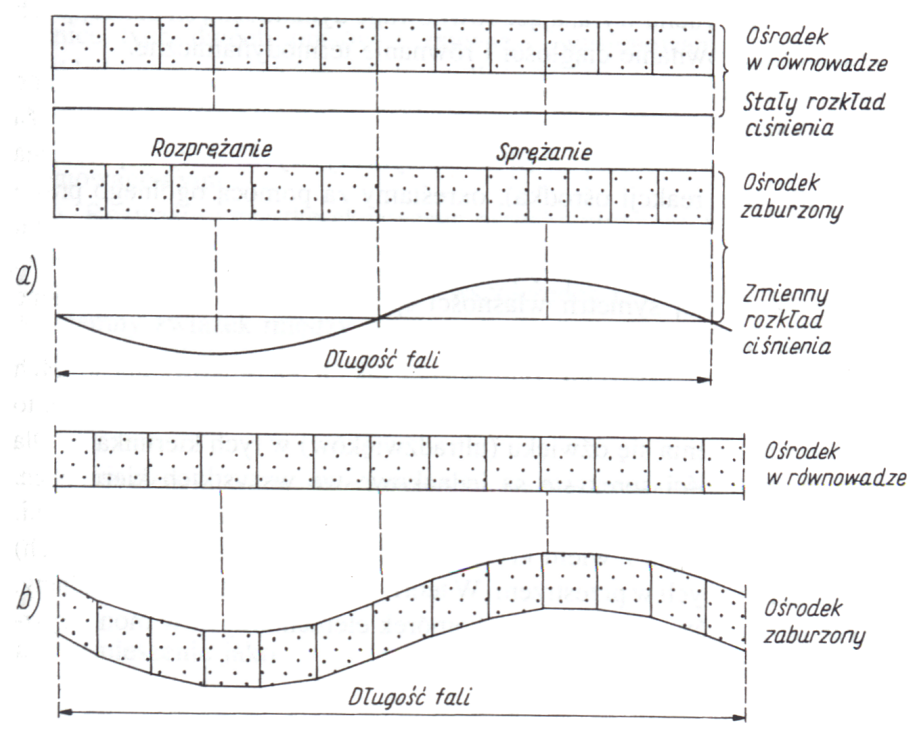
Istotą ruchu falowego jest to, że wywołane w ośrodku zaburzenie przemieszcza się od cząstki do cząstki z określoną prędkością. Zaburzenie rozchodzi się tak, że każda cząstka akustyczna ośrodka wykonując ruch drgający wokół położenia równowagi, przekazuje energię cząstkom sąsiadującym, które drgają w odpowiednio przesuniętych w czasie chwilach. Stany ruchu (fazy ruchu) powtarzają się w przestrzeni (co długość fali λ) oraz w czasie (co okres T) (Rys. 2.1). Wielkości te można powiązać ze sobą wg wzoru:

$$\lambda = cT \quad (2.1)$$

gdzie: c - jest prędkością fali w danym ośrodku. W przypadku fal rozchodzących się w powietrzu $c = 340 \text{ m/s}$, w cieczach c jest rzędu 1500 m/s , natomiast w ciałach stałych ok. 5000 m/s . Jeżeli do wzoru (2.1) wprowadzimy pojęcie częstotliwości f jako odwrotność okresu T , to przyjmie on postać:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.2)$$

Jest to podstawowa zależność, jaka występuje pomiędzy częstotliwością a długością fali sprężystej. Rozchodzące się fale ultradźwiękowe różnią się sposobem ruchu cząstek w stosunku do kierunku przemieszczania się fali. Najlepiej poznane są fale podłużne, przy których cząstki ośrodka drgają prostoliniowo, zgodnie z kierunkiem rozchodzenia się fali. W tym przypadku występuje tylko odkształcenie objętości. Fale te mogą rozchodzić się w ośrodku stałym, cieczy lub gazie. Warunkiem by w ośrodku mogła się rozchodzić fala podłużna są wystarczająco duże rozmiary względem długości fali. W przypadku kiedy kierunek drgań cząstek jest prostopadły do kierunku rozchodzenia się fali powstaje fala poprzeczna (Rys. 2.2). Przypadek taki występuje gdy w ośrodku można wywołać odkształcenie postaci. Fale poprzeczne mogą się więc rozchodzić tylko w ośrodku stałym lub bardzo lepkich płynach. W płynach nielepkich możliwe są tylko odkształcenia objętościowe.



Rys. 2.2. Deformacja cząstki akustycznej w przypadku jednowymiarowym; a) - fala podłużna, b) - fala poprzeczna [59].

Zjawisko rozchodzenia się fal sprężystych można opisać równaniem falowym, które wyprowadza się z podstawowych równań teorii ośrodków ciągłych tj.: równanie ciągłości, równanie termodynamiczne i równanie równowagi sił działających na cząstkę akustyczną. W ogólnym przypadku, dla ośrodka anizotropowego, własności rozchodzących się w nim fal ultradźwiękowych zależą od kierunku pomiaru. Ze względu

na charakter pracy przedstawiono tylko zależności dla ośrodków płynnych. Przy wyprowadzeniu równania falowego w tym przypadku korzysta się z założenia małej deformacji ośrodka ($A \ll \lambda$). W takim przypadku równanie falowe przybiera postać:

$$\frac{\delta^2 \xi}{\delta t^2} = c^2 \frac{\delta^2 \xi}{\delta x^2} \quad (2.3)$$

Rozwiązaniem szczególnym takiego równania (przy założeniu ośrodka nieograniczonego i bezstratnego), dla fali płaskiej jest równanie ruchu harmonicznego:

$$\xi = A \sin(\omega t + kx) \quad (2.4)$$

gdzie: ξ - wychylenie chwilowe cząstki akustycznej z położenia równowagi, A - amplituda fali, ω - częstotliwość kątowna, t - czas, c - prędkość rozchodzenia się fali w ośrodku, k - liczba falowa. Różniczkując kolejno (2.4) otrzymujemy równanie zmian prędkości cząstki akustycznej:

$$v = \frac{\delta \xi}{\delta t} = \omega A \cos(\omega t + kx) = v_0 \cos(\omega t + kx) \quad (2.5)$$

oraz równanie zmiany przyspieszenia:

$$a = \frac{\delta^2 \xi}{\delta t^2} = \omega^2 A \sin(\omega t + kx) = a_0 \sin(\omega t + kx) \quad (2.6)$$

Stosując powyższe zależności można wyliczyć parametry drgań mechanicznych czoła drgającej sonotrody. Przykładowo, dla częstotliwości 20 kHz, amplitudy drgań czoła elektrody 10 μm , maksymalna prędkość $v_{max} = 1.25 m/s$ a maksymalne przyspieszenie $a_{max} = 160000 m/s^2$.

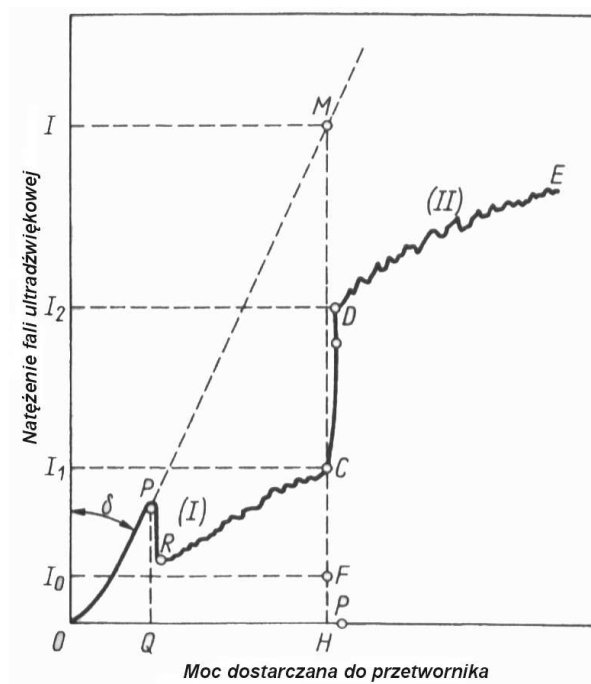
2.2. Charakterystyka zjawiska kawitacji

Na diagramie przedstawionym na Rys. 2.5 szczególną rolę odgrywa kawitacja jako zjawisko mające decydujące znaczenie dla innych procesów zachodzących w ośrodku pod wpływem ultradźwięków. Przybliżone wyznaczenie stref kawitacyjnych można przeprowadzić na podstawie analizy ciśnienia statycznego w obszarze obróbki z warunku (1.20). Ogólnie jednak kawitacja pojawia się w momencie, gdy natężenie fali ultradźwiękowej osiągnie wartość progową (Rys. 2.3), czyli tzw. próg kawitacji, [57, 59]. Wartość tego progu zależy od: rodzaju cieczy, częstotliwości fali oraz obecności w cieczy mikroskopijnych zanieczyszczeń i cząstek gazu, które są najczęściej miejscami powstawania pęcherzyków kawitacyjnych.

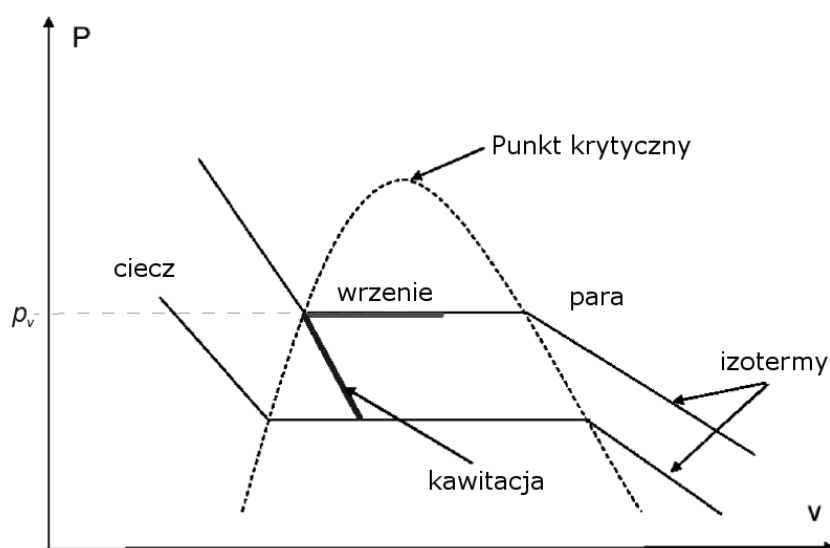
Powstawanie w cieczy pęcherzyków może odbywać się na dwa sposoby (Rys. 2.4):

- **wrzenie:** w stałym ciśnieniu p następuje wzrost temperatury, aż do temperatury saturacji T_{sat} . Różnica $\Delta T = T_{sat} - T$ określa przegrzanie cieczy, natomiast wartość ΔT_c , przy której następuje rozpoczęcie wzrostu pęcherzyka nazywamy przegrzaniem krytycznym;
- **kawitacja:** w stałej temperaturze T może nastąpić obniżenie ciśnienia p_e poniżej ciśnienia pary nasyconej p_{sat} . Różnica $\Delta p = p_{sat} - p_e$ określa naprężenie rozciągające powodujące gwałtowny wzrost pęcherzyka. Naprężenie Δp_c przy którym rozpoczyna się wzrost pęcherzyka nazywane jest wytrzymałością cieczy na rozciąganie.

Zamiana fazy w procesie wrzenia przebiega wzdłuż izotermy, przy stałym ciśnieniu cieczy p (Rys. 2.4) i charakteryzuje się ciągłym wzrostem pęcherzyka. Natomiast kawitacja to zmiana fazy, związana ze zmianą temperatury (Rys. 2.4), charakteryzująca się wzrostem, pulsacją i gwałtownym zapadaniem się pęcherzyków, któremu towarzyszą gwałtowne zmiany temperatury i ciśnienia. Kawitacja najczęściej kojarzona jest ze zjawiskiem szkodliwym powodującym zniszczenia (procesy erozji), hałas i niepożądane straty hydrodynamiczne. W wielu jednak przypadkach, celowo prowadzi się do powstawania kawitacji, aby korzystać z energetycznych efektów po-



Rys. 2.3. Próg kawitacji i pseudokawitacji: OP - bez kawitacji, RC - przy pseudokawitacji (kawitacji gazowej), DE - przy kawitacji właściwej, PM - hipotetyczny przebieg zależności, gdyby nie było strat energii na proces kawitacji [59].



Rys. 2.4. Zależność pomiędzy ciśnieniem a objętością właściwą [122].

wstawania i wzrostu pęcherzyków (czyszczenie przedmiotów, przyspieszanie reakcji chemicznych).

W zależności od miejsca powstania pęcherzyków kawitacyjnych, można wyróżnić dwa sposoby zarodkowania pęcherzyków [8]:

- **zarodkowanie homogeniczne (jednorodne)** - proces zarodkowania rozpoczyna się w miejscach mikroskopijnych luk (pustek) powstałych w wyniku ruchów termicznych cząstek elektrolitu;
- **zarodkowanie heterogeniczne (niejednorodne)** - zarodkowanie odbywa się na granicy faz pomiędzy elektrolitem a ciałem stałym (np. jedna z elektrod, produkty roztwarzania).

Z punktu widzenia obróbki elektrochemicznej, najbardziej interesujący jest proces zarodkowania heterogenicznego. Wzrost i zapadanie pęcherzyków kawitacyjnych na granicy ciało stałe - ciecz związany jest z dwoma podstawowymi mechanizmami [5, 118, 119]:

- oddziaływanie *mikro-strugi* cieczy. Energia zapadającego się pęcherzyka kawitacyjnego, który powstał na granicy ciało stałe - ciecz przekazywana jest cieczy, która w postaci gwałtownie przemieszczającej się strugi uderza w powierzchnie graniczną. Prędkość powstającej strugi cieczy jest rzędu setek m/s . Zjawisko to jest typowe dla mniejszych częstotliwości ultradźwiękowych ($f < 100 kHz$).
- fala uderzeniowa. Zapadnięcie się pęcherzyka kawitacyjnego jest źródłem powstawania niszczącej fali uderzeniowej, która jest odpowiedzialna za lokalną

erozje powierzchni. Zjawisko to jest istotne dla dużych częstotliwości (rzędu MHz), kiedy pęcherzyki kawitacyjne są znacznie mniejsze.

Zapadaniu się pęcherzyka kawitacyjnego towarzyszą lokalne, krótkotrwałe zmiany temperatury oraz ciśnienia. W miejscach zapadania się pęcherzyków temperatura może sięgać $\sim 5000\text{ K}$, ciśnienie 1000 bar , a gradienty zmian temperatury są rzędu 10^{10} K/s [5, 119], co powoduje, że to zjawisko wprowadza bardzo wyjątkowe warunki do szczeliny międzyelektrodowej.

2.3. Zastosowanie ultradźwięków

Ultradźwięki znalazły bardzo szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach techniki. W zależności od oddziaływania na ośrodek możemy wyróżnić tutaj dwa obszary wykorzystania ultradźwięków:

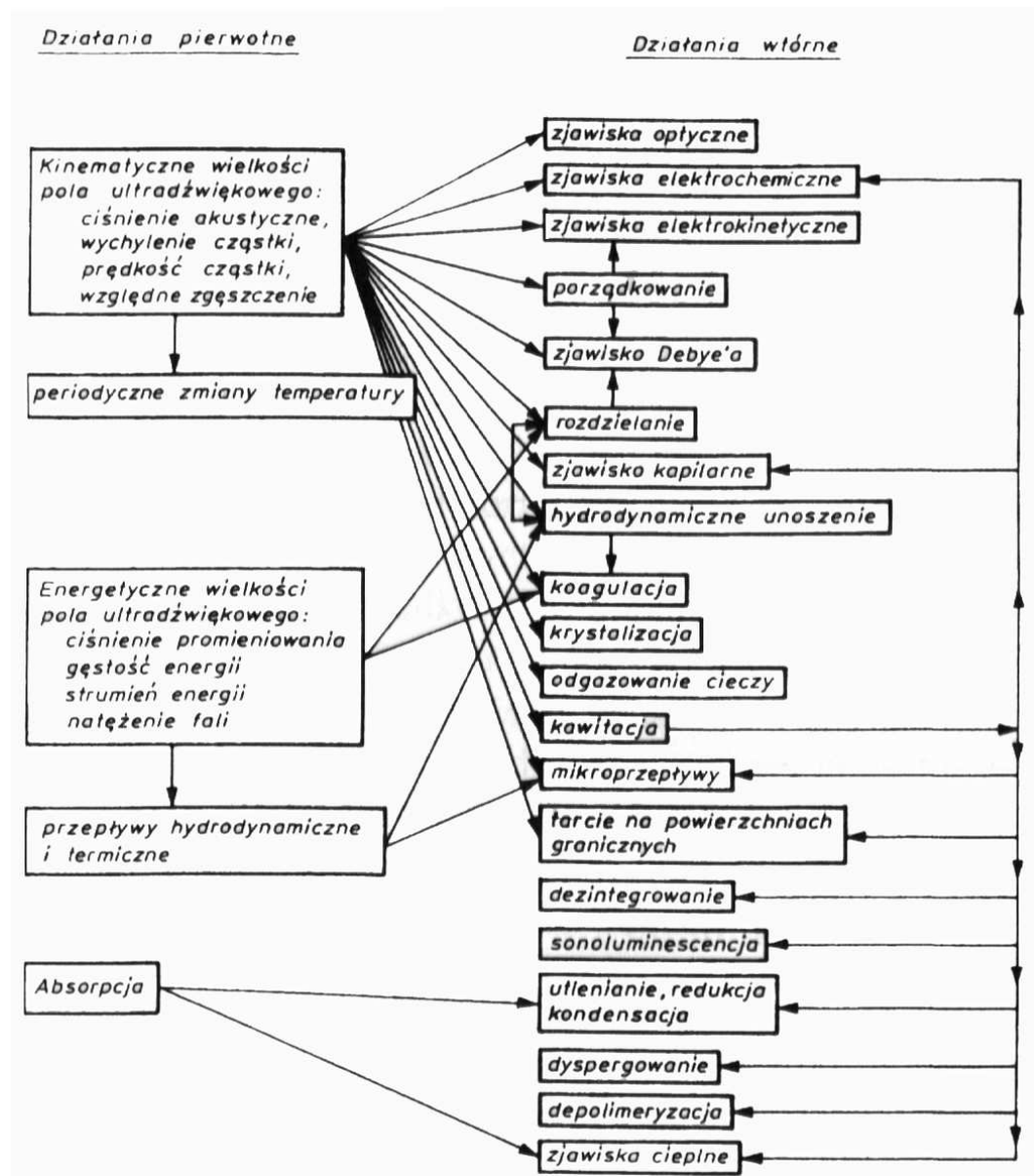
- **bierne** - to fale o małej energii (w granicach $mW \div W$) i bardzo niewielkiej amplitudzie. Działanie tych fal jest nieniszczące. Badane jest zachowanie się fali po przejściu przez ośrodek.
- **czynne** - wykorzystuje się energię fali ultradźwiękowej w celu osiągnięcia określonych zmian fizycznych lub chemicznych (Rys. 2.5).

Bierne zastosowania ultradźwięków polegają na wytwarzaniu i detekcji fal sprężystych o natężeniach nieniszczących struktury badanego ośrodka [67]. Obszar tego typu zastosowań jest bardzo szeroki i obejmuje m.in. badania strukturalne, diagnostykę materiałową, diagnostykę medyczną (ultrasonografia), sterowanie procesami technologicznymi oraz hydrolokacje. Interesującym przykładem jest zastosowanie drgań ultradźwiękowych do pomiaru grubości szczeliny międzyelektrodowej przedstawione w pracy [19].

Czynne działanie ultradźwięków powoduje powstanie dużych sił lokalnych, które prowadzą do zmian makroskopowych ośrodka. Oddziaływanie może polegać na powstaniu nowych procesów, jak również na wpływaniu na przebieg procesów już zachodzących przed włączeniem ultradźwięków. Mechanizmy czynnego działania ultradźwięków dzieli się na (Rys. 2.5):

- pierwotne, czyli określające podstawowe wielkości pola akustycznego - najważniejsze z nich to periodyczne ciśnienie akustyczne,
- wtórne, które są wynikiem lokalnych sił powstałych w ośrodku.

Zależą one od charakteru i warunków fizycznych w jakich się znajduje ośrodek. Do najważniejszych z nich zaliczamy kawitację oraz absorpcję energii ultradźwiękowej. Zjawiskom tym towarzyszy wydzielanie się ciepła, co powoduje dalsze wtórne działanie. Istotnym zjawiskiem, które występuje w wyniku kawitacji, są reakcje so-



Rys. 2.5. Czynne działanie ultradźwięków [59].

nochemiczne, które zachodzą wewnątrz pęcherzyków kawitacyjnych i na granicach międzyfazowych [117, 119].

Typowym przykładem czynnego zastosowania ultradźwięków jest mycie i czyszczenie ultradźwiękowe [6]. Korzystając z działania chemicznego i dyspergującego zapadających się pęcherzyków kawitacyjnych następuje usunięcie niepożądanych substancji zanieczyszczających dany obiekt. Urządzenia do mycia i czyszczenia ultradźwiękami, zwane myjkami lub płuczkami ultradźwiękowymi to zbiorniki z cieczą, na których dnie zamocowane są przetworniki ultradźwiękowe. Periodyczne rozchodzenie się fali ciśnienia powoduje powstawanie w zbiorniku obszarów o obniżonym ciśnieniu, gdzie tworzy się olbrzymia ilość pęcherzyków kawitacyjnych. Oddziaływanie implodujących pęcherzyków powoduje oderwanie się warstwy osadu z mytego elementu. Za pomocą myjek ultradźwiękowych usuwa się zanieczyszczenia, których usunięcie w tradycyjny sposób byłoby praktycznie niemożliwe. Wanny z przetwornikami ultradźwiękowymi, o analogicznej konstrukcji jak myjki ultradźwiękowe stosowane są również w procesach galwanizacyjnych, gdzie oddziaływanie ultradźwięków powoduje znaczne przyspieszenie zachodzących procesów jak również umożliwia uzyskanie lepszej jakości pokrycia.

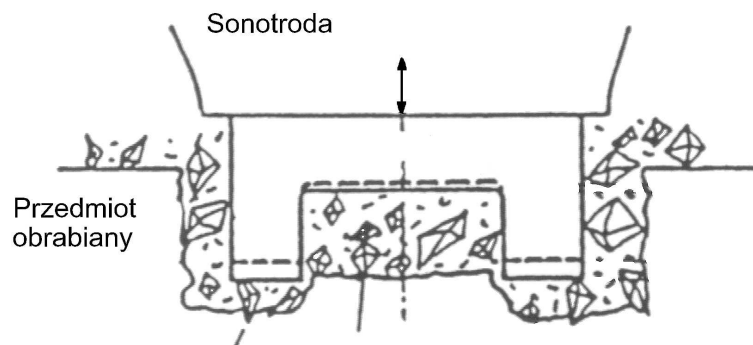
2.4. Drgania ultradźwiękowe w procesach obróbkowych

2.4.1. Obróbka ultradźwiękowa (USM)

Obróbka ultradźwiękowa (USM), nazywana również obróbką udarowo - ścierną lub udarową należy do grupy obróbek niekonwencjonalnych. Schemat obróbki pokazano na Rys. 2.6. Narzędzie robocze, zwane sonotrodą lub falowodem, drga wzdłuż osi prostopadłej do przedmiotu obrabianego z częstotliwością $\leq 20 \text{ kHz}$ i amplitudą w granicach $5 \div 50 \mu\text{m}$ [4, 18, 29, 55, 56, 123, 125]. Moc najczęściej stosowana mieści się w szerokim przedziale $50 \div 3000 \text{ W}$. Medium roboczym jest mieszanina wody z ośrodkiem ściernym, którym najczęściej jest, ze względu na swoją dużą twardość i małą gęstość węgiel boru B_4C . Mechanizm ubytku materiału jest złożony i można w nim wyróżnić:

- oddziaływanie mechaniczne ziaren ściernych na przedmiot obrabiany, w którym dochodzi do przekazania energii drgań poprzez ziarno. Wytwarzane są małe mikropęknięcia, które doprowadzają do systematycznego usuwania małych fragmentów materiału. Oddziaływania mechaniczne mają wiodące znaczenie przy obróbce kruchych i twardych materiałów tj.: ceramika, szkło, kompozyty, kwarc, kamienie szlachetne, półprzewodniki.

- erozję kawitacyjną, spowodowaną szybkimi zmianami ciśnienia w medium transportującym ziarna ściernie, która powoduje dalsze rozprzestrzenianie się mikropeknięć, czyli wzmacnia działanie i usuwanie zużytego materiału z przestrzeni obróbkowej. Kawitacja odgrywa znaczącą rolę przy obróbce porowatych materiałów np. grafit, ceramika porowata.



Rys. 2.6. Schemat obróbki ultradźwiękowej.

Ultradźwięki o dużych natężeniach z powodzeniem są używane do obróbki materiałów twardych i kruchych, gdzie konwencjonalna obróbka mechaniczna jest bardzo trudna, lub w niektórych przypadkach niemożliwa. USM umożliwia wykonywanie złożonych kształtów w elementach konstrukcyjnych o dowolnej niemal twardości (stopy tytanowe, german, krzem, stopy magnetyczne, ferryty, materiały ceramiczne, szkło, kwarc, diamenty i inne). Zastosowanie USM nie jest ograniczone własnościami fizycznymi i chemicznymi materiału. Jest ona równie skutecznie stosowana przy obróbce materiałów przewodzących jak i nieprzewodzących, najczęściej do wykonywania części z materiałów o twardości powyżej 40 *HRC*. Wydajność obróbki USM zależy od rodzaju materiału obrabianego i mieści się w szerokim przedziale od kilkuset mm^3/min dla materiałów o wysokiej kruchości i porowatości (np. szkło, krzem), poprzez kilkadziesiąt mm^3/min dla materiałów trudnoobrabialnych, czyli mniej kruchych i porowatych (kamienie szlachetne, ceramika). W skrajnym przypadku wydajność może osiągnąć kilka mm^3/min dla bardzo twardych lub ciągliwych materiałów, których nie da się obrabiać innymi sposobami. Przedstawione mechanizmy erozji materiału działają obustronnie tzn. na przedmiot obrabiany i sonotrodę, dlatego jednym z głównych parametrów charakteryzujących efektywność USM jest zużycie sonotrody. Również zmienia się ono w szerokim zakresie od 1 % dla pierwszej grupy wymienionych wyżej materiałów poprzez 10 % dla materiałów trudnoobrabialnych a może nawet osiągnąć 100 % dla trzeciej grupy. Interesujący jest wpływ parametrów akustycznych na wydajność obróbki USM. Głównym czyn-

nikiem warunkującym wydajność jest amplituda drgań. Od niej zależy ilość energii dostarczonej do strefy obróbki czyli ilość energii przekazanej ziarnom ściernym. Zakładając oddziaływanie ziaren na obrabianą powierzchnię jako główny mechanizm ubytku materiału, wydajność procesu Q zależy od prędkości cząstek ściernych:

$$Q = v^n \quad (2.7)$$

gdzie: n - zależy od materiału obrabianego i rodzaju ziaren. Jako że prędkość jest wprost proporcjonalna do amplitudy - zwiększenie amplitudy powoduje zwiększenie wydajności. Również zastosowana częstotliwość drgań sonotrody wpływa na przebieg procesu. Wzrost częstotliwości zwiększa sprawność i wydajność erozji materiału, jednak wraz ze wzrostem częstotliwości pojawiają się ograniczenia co do innych parametrów systemu akustycznego. Większa częstotliwość związana jest z mniejszą amplitudą, co nie wpływa korzystnie na wydajność. Przykładowo przy częstotliwości 20 kHz można osiągnąć amplitudę w granicach 20 ÷ 50 μm , ale już przy 40 kHz amplituda jest ograniczona do 5 ÷ 20 μm . Kolejnym efektem zwiększenia częstotliwości jest ograniczenie wymiarów sonotrody, ponieważ aby osiągnąć maksymalne wzmocnienie sygnału akustycznego narzędzie projektowane jest aby jego długość była zbliżona do połowy fali akustycznej:

$$l = \frac{1}{2}\lambda = \frac{c}{2f} \quad (2.8)$$

Przykładowo dla stali przy 20 kHz optymalna długość sonotrody jest około 125 mm , natomiast dla 40 kHz wynosi 62.5 mm . Zwiększenie częstotliwości to również ograniczenie wymiarów przekroju poprzecznego sonotrody, czyli wymiarów obrabianej powierzchni.

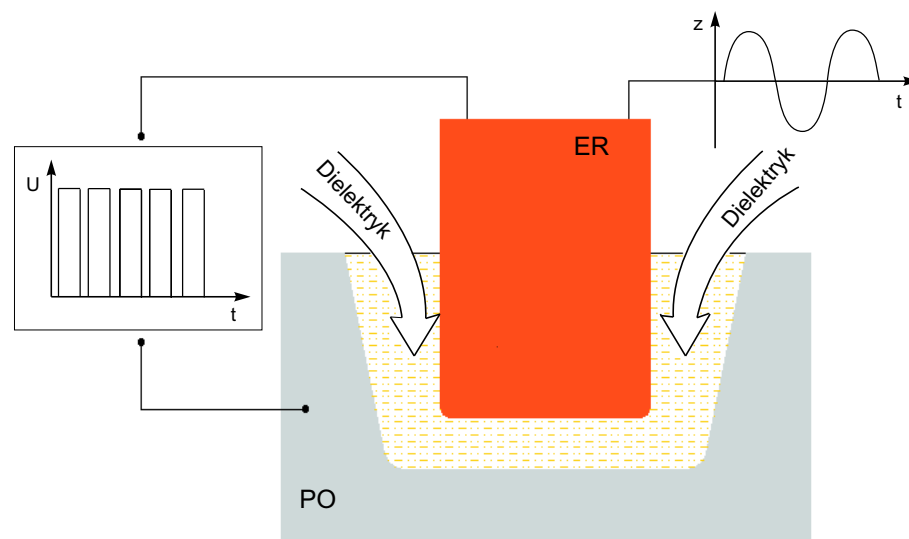
Dokładność obróbki USM zależy od następujących czynników: początkowa dokładność elektrody, zużycie elektrody, rozmiar ziaren ściernych i parametrów pracy i może osiągnąć dla obróbki zgrubnej $\pm 10 \mu m$ a dla warunków wykańczających $\pm 5 \mu m$. Obróbka USM jest szczególnie stosowana do wykonywania małych otworów, szczelin, czasami bardziej skomplikowanych powierzchni. USM jest często stosowana do wykonywania równocześnie wielu detali w jednej operacji (równoczesne wykonanie kilkuset otworów lub szczelin w jednym elemencie).

2.4.2. Ultradźwięki w procesach hybrydowych

Zastosowanie drgań ultradźwiękowych jako dodatkowego źródła energii staje się coraz powszechniejszym sposobem wspomaganie procesów obróbkowych. Najwięcej publikacji z tego zakresu dotyczy obróbki elektroerozyjnej wspomaganie drganiami ultradźwiękowymi [10, 11, 14, 16, 24, 50, 51, 54, 129]. Celem zastosowania drgającej

elektrody roboczej w obróbce elektroerozyjnej jest poprawa transportu produktów erozji ze szczeliny międzyelektrodowej. Efektem tego jest zwiększenie sprawności oraz wydajności obróbki. Na podstawie danych literaturowych można stwierdzić, że wprowadzenie drgań ultradźwiękowych elektrody powoduje zwiększenie wydajności w granicach od 4 do 20 razy [16, 17, 54, 129]. Dzięki większej niezawodności usuwania produktów erozji, następuje również poprawa właściwości warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego (mniejsze naprężenia termiczne, mniejsza grubość zmienionej termicznie powierzchni) [54, 129]. Badania obróbki USEDAM przeprowadzone w Zakładzie Niekonwencjonalnych Technologii Produkcyjnych IZTW [10, 16] potwierdzają, że proces USEDAM umożliwia znaczące zwiększenie wydajności obróbki (Rys. 2.8) oraz widoczne zwłaszcza dla niskich wartości prądu roboczego zmniejszenie zużycia elektrody roboczej (Rys. 2.9). Oddziaływanie drgającej elektrody roboczej nie powoduje większych zmian chropowatości powierzchni. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że ta obróbka może być stosowana do kształtowania niewielkich powierzchni.

Kolejnym przykładem zastosowania ultradźwięków jako źródła energii w procesach hybrydowych jest obróbka elektrochemiczno - ultradźwiękowo - ścierna - AECUSM, czyli metoda kształtowania materiałów, w której naddatek usuwany jest w wyniku roztwarzania elektrochemicznego oraz mikroskrawania wspomaganego drganiami ultradźwiękowymi. Do szczeliny pomiędzy przedmiotem obrabianym, a drgającą elektrodą dostarczana jest mieszanina elektrolitu i ziaren ściernych



Rys. 2.7. Schemat obróbki elektroerozyjnej wspomagananej drganiami ultradźwiękowymi (USEDAM).

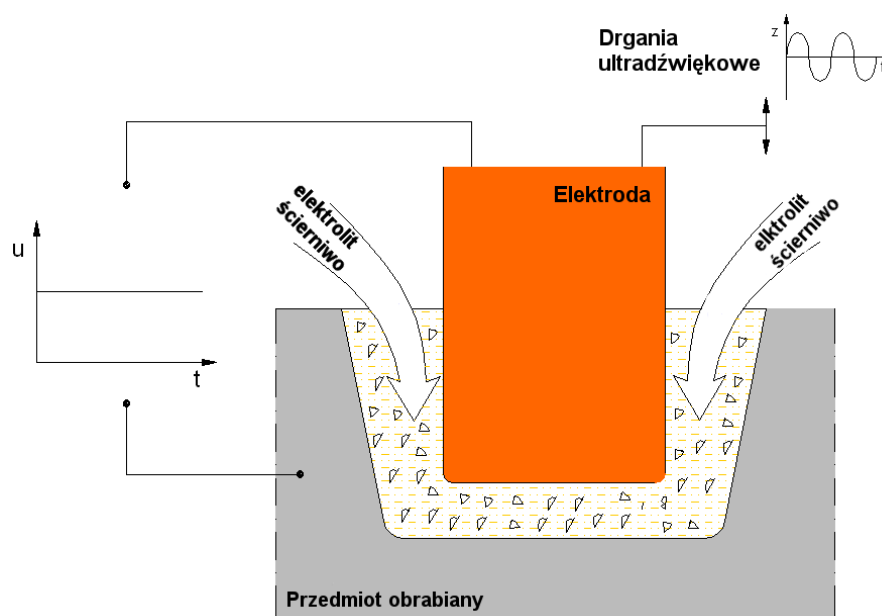
Parametry obróbki	Wydajność obróbki V_w [mm^3/min]			
	bez US	P = 30 W A = 2.7 μm	P = 90 W A = 5.7 μm	P = 150 W A = 9.7 μm
$I = 1 \text{ A}$, $t_i = 25 \mu\text{s}$, $t_o = 10 \mu\text{s}$, $U = 60 \text{ V}$	0.03 niestabilna obróbka	0.253	0.487	0.494
$I = 2 \text{ A}$, $t_i = 40 \mu\text{s}$, $t_o = 6 \mu\text{s}$, $U = 55 \text{ V}$	0.12	0.95	0.96	1.04
$I = 3 \text{ A}$, $t_i = 60 \mu\text{s}$, $t_o = 10 \mu\text{s}$, $U = 50 \text{ V}$,	0.41	2.14	2,29	2.49

Rys. 2.8. Porównanie wydajności obróbki V_w dla EDM i USED, średnica próbki: 8 mm (opracowano na podst. [16]).

Parametry obróbki	Zużycie elektrody ϑ [%]			
	bez US	P = 30 W A = 2.7 μm	P = 90 W A = 5.7 μm	P = 150 W A = 9.7 μm
$I = 1 \text{ A}$, $t_i = 25 \mu\text{s}$, $t_o = 10 \mu\text{s}$, $U = 60 \text{ V}$	91.0	60.2	56.8	68.7
$I = 2 \text{ A}$, $t_i = 40 \mu\text{s}$, $t_o = 6 \mu\text{s}$, $U = 55 \text{ V}$	9.1	5.1	6.1	5.3
$I = 3 \text{ A}$, $t_i = 60 \mu\text{s}$, $t_o = 10 \mu\text{s}$, $U = 50 \text{ V}$,	4.2	2.1	2.0	2.0

Rys. 2.9. Porównanie zużycia elektrody roboczej ϑ dla obróbki EDM i USED, średnica próbki 8 mm (opracowano na podst. [16]).

(Rys. 2.10). Drgająca elektroda robocza i fale ultradźwiękowe kierują ziarna ściernie w stronę materiału obrabianego. Ziarna ściernie uderzając w powierzchnię obrabianą przekazują swoją energię materiałowi obrabianemu powodując równocześnie jego wykruszanie lub lokalne odkształcenia plastyczne. Efekt oddziaływania ziaren ściernych na materiał zależy od grubości szczeliny międzyelektrodowej, wymiaru ziaren i amplitudy drgań elektrody. Z punktu widzenia efektywnego wykorzystania ziaren ściernych w procesie ECM ich wymiar jest istotnie mniejszy od najmniejszej grubości szczeliny ($Z < S_u - A$). Umożliwia to swobodny przepływ mieszaniny przez szczelinę międzyelektrodową i ziarna ściernie mogą oddziaływać na powierzchnię obrabianą przez mikroskrawanie i mikroodkształcenia plastyczne poprawiając właściwości warstwy wierzchniej. Równocześnie oddziaływanie ziaren ściernych wspomaga oddziaływanie depasywacyjne i depolaryzacyjne ultradźwięków.



Rys. 2.10. Schemat obróbki elektrochemiczno - ultradźwiękowo - ścierniej. (AECUSM).

Przeprowadzone w IZTW badania procesu AECUSM [89] pokazały, że w przypadku toczenia drgającą elektrodą uniwersalną, przy optymalnie dobranych wartościach parametrów proces obróbka ta umożliwia istotne zmniejszenie chropowatości powierzchni ($R_a < 0.10 \mu m$, $R_z < 1.0 \mu m$) w stosunku do klasycznego szlifowania.

Również przedstawione w poprzednim rozdziale wyniki badań dotyczących USECM są przykładem czynnego zastosowania ultradźwięków.

2.5. Wnioski

Przedstawiona powyżej analiza literatury dotyczącej wykorzystania drgań ultradźwiękowych jako źródła energii umożliwiła sformułowanie następujących wniosków:

- głównym zjawiskiem odpowiedzialnym za czynne oddziaływanie ultradźwięków jest kawitacja oraz jej następstwa. Kawitacja najczęściej kojarzona jest ze zjawiskiem szkodliwym powodującymi zniszczenia (procesy erozji), hałas i niepożądane straty hydrodynamiczne. W wielu jednak przypadkach celowo prowadzi się do powstawania kawitacji, aby korzystać z energetycznych efektów powstawania i wzrostu pęcherzyków (np. czyszczenie przedmiotów, przyspieszanie reakcji chemicznych);
- zjawiska kawitacji heterogenicznej na granicy faz, z powodzeniem wykorzystywane w sonochemii, mogą okazać się głównym mechanizmem poprawiającym wskaźniki technologiczne procesu USECM - CNC;
- drgania ultradźwiękowe z powodzeniem wykorzystywane są w procesach obróbkowych, gdzie bezpośrednio uczestniczą w usuwaniu nadmiaru (USM) lub powodują zwiększenie możliwości istniejących metod obróbkowych (np. USEDMD);
- z technicznego i ekonomicznego punktu widzenia, wprowadzenie drgań ultradźwiękowych narzędzi do obróbki elektroerozyjnej czy elektrochemicznej nie stanowi większego problemu. Głowice ultradźwiękowe nie należą do urządzeń drogie i są powszechnie dostępne na rynku. Jedynym ograniczeniem technologicznym jest warunek (2.8) związany z długością i kształtem elektrody roboczej, co bezpośrednio związane jest z parametrami drgań ultradźwiękowych.

Rozdział 3

Modelowanie matematyczne procesu obróbki USECM - CNC

3.1. Założenia do modelu

W przypadku obróbki elektrochemicznej celem modelowania matematycznego, niezależnie od kinematyki ruchu ER - PO oraz kształtu stosowanej elektrody roboczej, jest opis matematyczny zmiany kształtu powierzchni obrabianej w czasie obróbki [9, 45]. Warunki analizowanego procesu obróbki elektrochemicznej USECM - CNC obejmują następujące parametry:

- rodzaj elektrody roboczej, czyli jej kształt, wymiary, szczegóły konstrukcyjne związane m. in. z doprowadzeniem elektrolitu,
- parametry ruchu względnego elektrody roboczej i przedmiotu obrabianego,
- właściwości elektrolitu (skład, właściwa przewodność elektryczna κ , temperaturowy współczynnik przewodności elektrycznej α , gęstość ρ_e oraz lepkość elektrolitu μ_e),
- właściwości materiału obrabianego (skład, równoważniki elektrochemiczne składników stopowych, gęstość),
- charakterystyki elektrochemiczne układu materiał obrabiany - elektrolit w postaci zależności współczynnika obrabialności elektrochemicznej $\eta^{k_v}(j)$ oraz krzywych polaryzacyjnych $E(j)$,
- napięcie robocze U między elektrodą roboczą a przedmiotem obrabianym,
- początkowy kształt powierzchni obrabianej F_0 ,
- początkowe położenie elektrody roboczej względem przedmiotu obrabianego

- czas zakończenia obróbki t_k lub końcowe położenie elektrody roboczej względem przedmiotu obrabianego,
- częstotliwość f oraz amplituda A drgań elektrody roboczej.

W wyniku modelowania matematycznego uzyskiwany jest kształt powierzchni obrabianej F w dowolnej chwili czasu, a w szczególności po zadanym czasie obróbki t_k . Szczegółowo model matematyczny ECM - CNC wraz z przyjętymi założeniami upraszczającymi i ich uzasadnieniem został przedstawiony w pracach [9, 45, 46]. Przyjmując układ współrzędnych związany z przedmiotem obrabianym, i przedstawiając równanie powierzchni obrabianej w postaci jawnej $F = z - Z(x, y, t)$, zmiana kształtu powierzchni obrabianej elektrochemicznie opisana jest następującym układem równań:

$$\frac{\delta Z}{\delta t} = \eta k_v j \sqrt{1 + \left(\frac{\delta Z}{\delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta Z}{\delta y}\right)^2} \quad (3.1)$$

z warunkiem początkowym $F(t = 0) = F_0$.

$$j = \kappa |\text{grad } u| \quad (3.2)$$

prawo Ohma w postaci różniczkowej pozwalające wyznaczyć rozkład gęstości prądu $j(x, y, z)$ na anodzie.

$$\text{div}(\kappa \text{grad } u) = 0 \quad (3.3)$$

rozkład potencjału elektrycznego w obszarze przepływu prądu elektrycznego, gdzie:

- κ - przewodność właściwa elektrolitu przy powierzchni anody,
- $j = j(x, y, z)$ rozkład gęstości prądu w kartezjańskim układzie współrzędnych,
- ηk_v - współczynnik obrabialności elektrochemicznej. Jest on funkcją gęstości prądu na anodzie, czyli na powierzchni obrabianej.

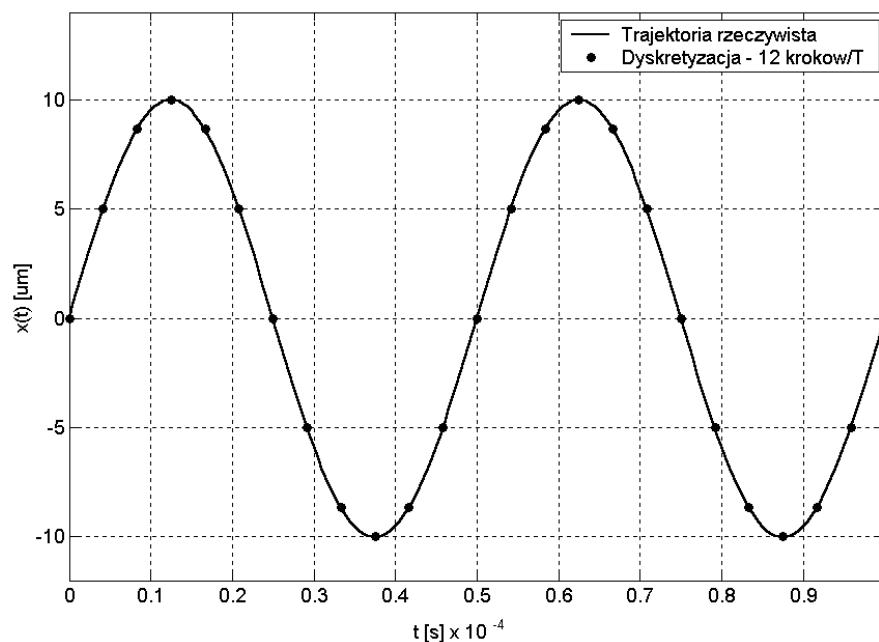
Ze względu na niewielki obszar obróbki w modelowaniu matematycznym można założyć:

- stałość przewodności właściwej elektrolitu κ ,
- całkowite wypełnienie elektrolitem obszaru obróbki (pominięto również możliwości wystąpienia nieciągłości roztwarzania anodowego),
- brak wpływu przepływu elektrolitu na procesy elektrodowe (czyli na ηk_v i E).

Układ równań opisujący proces kształtowania powierzchni jest rozwiązany z zastosowaniem metody różnic skończonych ze względu na czas. Wprowadzając stały przyrost czasowy t , współrzędną czasu można przedstawić jako zbiór punktów:

$$t_n = t_0 + n\Delta t \quad (3.4)$$

gdzie: $n = 1, 2, 3 \dots M$, natomiast $M = t_k / \Delta t$.



Rys. 3.1. Dyskretyzacja trajektorii elektrody roboczej, 12 kroków czasowych, błąd dopasowania nie przekraczający 2 % [71].

Gdy rozważamy obróbkę elektrodą drgającą z częstotliwością ultradźwiękową musimy przyjąć górne ograniczenie na wartość Δt związane z częstotliwością drgań elektrody roboczej. Krok czasowy należy tak dobrać, aby osiągnąć jak najmniejszy błąd dopasowania. Opisuując krzywą zmian położenia ER 12 punktami (Rys. 3.1) otrzymamy błąd dopasowania nie przekraczający 2 % [70]. Dobierając przyrost czasowy dla częstotliwości drgań ultradźwiękowych 20 kHz otrzymamy:

$$T = 50 \mu s \quad (3.5)$$

$$\Delta T = 4.16(6) \mu s \quad (3.6)$$

Przyjęcie takiego kroku czasowego powoduje, że dla 60 s obróbki mamy 14400000 kroków czasowych.

Wyznaczając rozkład gęstości prądu na anodzie metodą linearyzacji potencjału odległość danego punktu PO od elektrody wynosi D (Rys. 3.2). Przyjmując układ współrzędnych związanych z PO odległość tą można opisać następująco:

$$D = \sqrt{(x_A - x_E)^2 + (y_A - y_E)^2 + (z_A - z_E)^2} \quad (3.7)$$

gdzie:

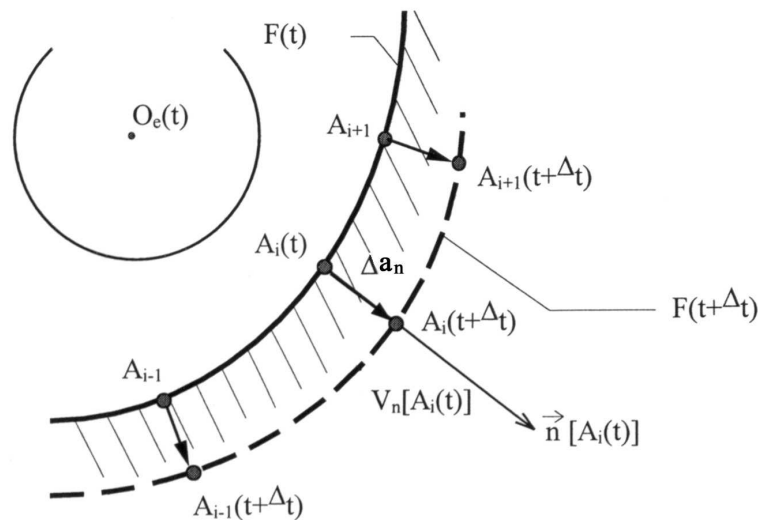
- x_A, y_A, z_A - współrzędne punktu powierzchni obrabianej,

- $x_E = x_E(t), y_E = y_E(t), z_E = z_E(t) + A \sin(\omega t)$ - współrzędne środka elektrody roboczej opisujące jej aktualne położenie w czasie,
- A - amplituda drgań elektrody roboczej,
- $\omega = 2\pi f$, f - częstotliwość drgań elektrody roboczej.

Grubość usuniętego nadkładu Δa_n w każdym kroku czasowym Δt (liczona w kierunku normalnym do powierzchni elektrody roboczej - Rys. 3.2) jest opisana następującym wyrażeniem:

$$\Delta a_n = \eta k_{vA} j_A \Delta t = \eta k_{vA} \kappa \frac{U - E}{D} \Delta t = V_n \Delta t \quad (3.8)$$

Usunięty w danym punkcie obrabianej powierzchni nadkład opisany jest sumą $\sum_{t=t_p}^{t=t_k} \Delta a_n$ dla kolejnych kroków czasowych. W przypadku dużych rozmiarów powierzchni obrabianej mogą powstać utrudnienia związane z czasem obliczeń. Aby tego uniknąć, w przedstawionym modelu wykorzystano fakt zaniku roztwarzania elektrochemicznego wraz z wzrostem odległości punktu obrabianego od elektrody roboczej. Wprowadzony do modelu parametr S_p opisuje obrabiany w danym kroku czasowym obszar anody.



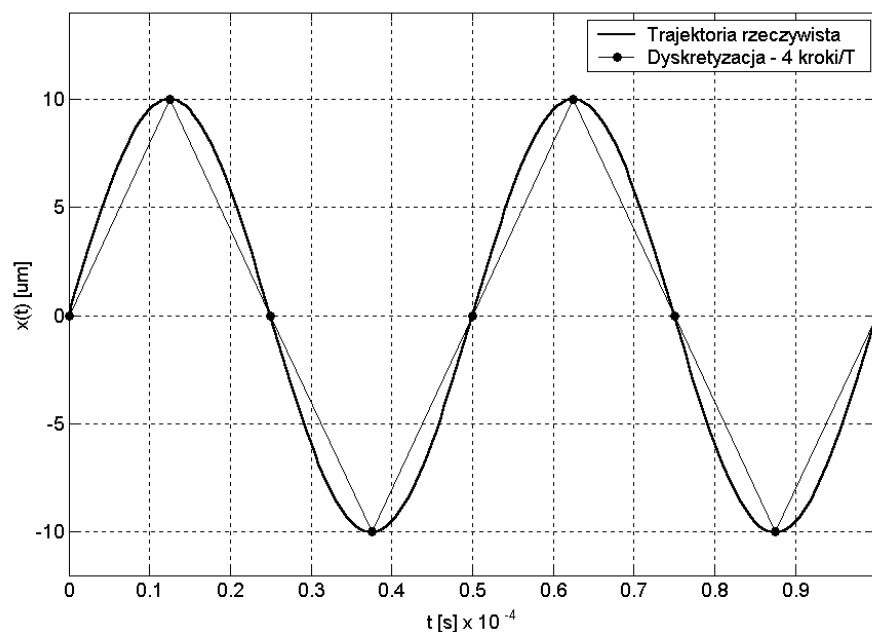
Rys. 3.2. Schemat opisujący zmiany powierzchni obrabianej w czasie Δt ; Δa_n - przemieszczenie powierzchni obrabianej w jednym kroku czasowym Δt [9].

3.2. Opracowanie oprogramowania do symulacji obróbki elektrochemicznej elektrodą uniwersalną

Na podstawie przedstawionego modelu opracowane zostało oprogramowanie do symulacji obróbki USECM - CNC. Stworzony program posiada następujące możliwości:

- umożliwia przeprowadzenie symulacji z drgającą elektrodą roboczą,
- jest niezależny od platformy CAD,
- umożliwia wizualizację rozkładu gęstości prądu na powierzchni obrabianej, wartości wektorów translacji oraz granic obszaru roztwarzania elektrochemicznego. Wszystkie te dane możliwe są do wygenerowania w dowolnej chwili symulowanego procesu,
- sposób rejestracji danych związanych z kształtem szczeliny roboczej umożliwia ich dalszą analizę (przykładowo eksport kształtu szczeliny do preprocesora MES i analizę numeryczną zjawisk hydrodynamicznych w dowolnej chwili obróbki).

Wspomniane we wcześniejszym paragrafie górne ograniczenie kroku czasowego, związane z częstotliwością drgań elektrody roboczej powoduje, że ogromnym problemem przy rozwiązywaniu równań opisujących zmianę kształtu PO jest czas obliczeń. Aby zminimalizować ilość kroków czasowych zdecydowano się na zmniejszenie ilości punktów opisujących jeden okres drgań do 4. Powoduje to transformację sinusoidalnej trajektorii do postaci piłokształtnej (Rys. 3.3). Pozwala to na zmniejszenie trzykrotnie liczby kroków czasowych (60 s – 4800000 kroków), a jednocześnie oddaje charakter zmian szczeliny międzyelektrodowej w trakcie obróbki.



Rys. 3.3. Transformacja trajektorii elektrody do postaci piłokształtnej.

W praktyce obróbka elektrodą uniwersalną stosowana jest do kształtowania skomplikowanych powierzchni krzywoliniowych i prowadzona jest z zastosowaniem wielokrotnego przejścia elektrody. W rezultacie tak duża liczba kroków czasowych powoduje, że symulacja tego procesu w warunkach przemysłowych jest praktycznie

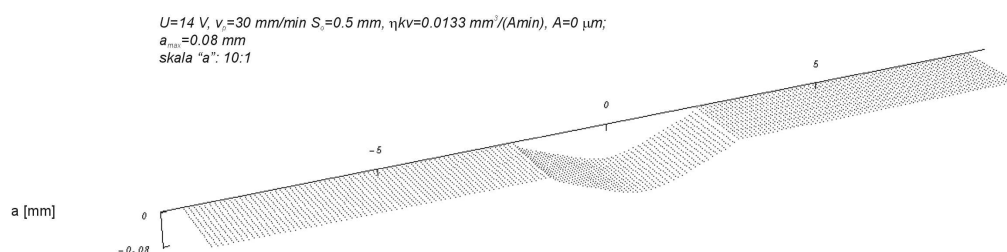
niemożliwa. Ze względu na ograniczone możliwości obliczeniowe wykorzystywanego do symulacji sprzętu komputerowego zdecydowano się na przeprowadzenie prostych testów. Poniżej przedstawiono zastosowane w trakcie badań ograniczenia, pozwalające przeprowadzić symulacje w rozsądnym czasie:

- przedmiot obrabiany to płaszczyzna o wymiarach $2 \times 20 \text{ mm}$,
- trajektoria elektrody to linia prosta o długości 16 mm ,
- kierunek obróbki wzdłuż krótszego boku płaszczyzny (długość obrabianego odcinka to 2 mm).

Pozostałe parametry symulacji zostały określone w oparciu o plan badań, który został zastosowany w trakcie badań doświadczalnych. Symulacje zostały przeprowadzone dla wybranych parametrów technologicznych. Następujące parametry procesu przyjęto w trakcie symulacji jako czynniki stałe:

- elektroda kulista o promieniu $R = 5 \text{ mm}$,
- przewodność elektrolitu $\kappa = 0.0135721 \text{ 1}/\Omega\text{mm}$ (odpowiada to 17.5 % roztworowi NaNO_3 w temperaturze 26°C),
- założono spadek potencjału w warstwach przyelektrodowych na poziomie $E = 1 \text{ V}$.

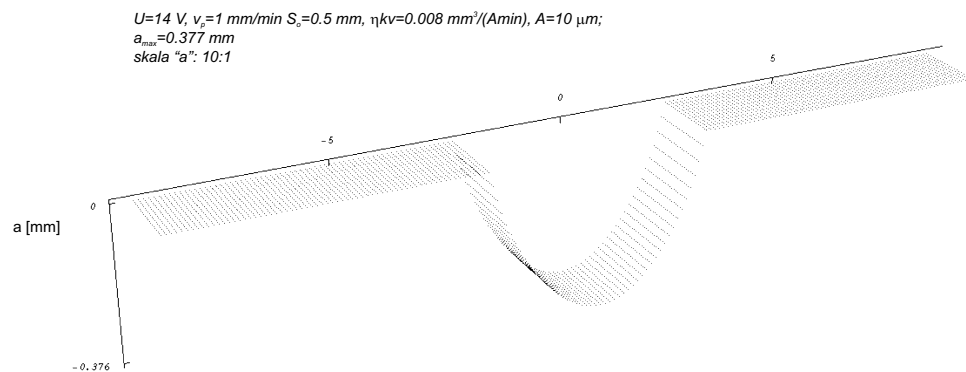
Przykładowe powierzchnie otrzymane po symulacji pokazano na Rys. 3.4 i Rys. 3.5.



Rys. 3.4. Powierzchnia płaska po symulacji obróbki z następującymi parametrami: $U = 14 \text{ V}$, $S_o = 0.1 \text{ mm}$, $v_p = 30 \text{ mm}/\text{min}$, $\eta k_v = 0.0133 \text{ mm}^3/\text{As}$, bez drgań ultradźwiękowych, $a_{max} = 0.08 \text{ mm}$.

3.3. Analiza wyników przeprowadzonych symulacji

Na Rys. 3.6 przedstawiono zależność $a(S_o)$ dla wyników otrzymanych z symulacji USECM - CNC oraz z przeprowadzonych prób technologicznych. Porównanie otrzymanych zależności pokazuje, że wyniki otrzymane z symulacji obróbki z drganiami ultradźwiękowymi elektrody zgodne są z teorią roztwarzania elektrochemicznego -



Rys. 3.5. Powierzchnia płaska po symulacji obróbki z następującymi parametrami:
 $U = 14\text{ V}$, $S_o = 0.5\text{ mm}$, $v_p = 1\text{ mm/min}$, $k_v = 0.008\text{ mm}^3/As$, $A = 10\text{ }\mu\text{m}$,
 $a_{max} = 0.377\text{ mm}$.

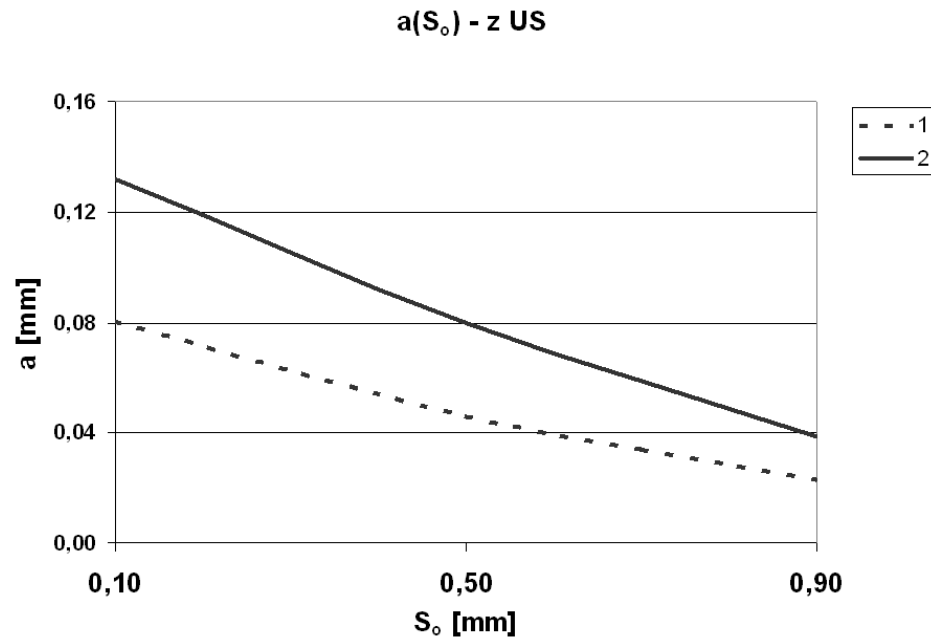
w jednym jak i w drugim przypadku grubość usuniętego naddatku maleje wraz ze zwiększeniem początkowej szczeliny międzyelektrodowej S_o , jednak różnica w wartościach a sięga 50 %. Porównanie wielkości a (Rys. 3.7) otrzymanych z:

- symulacji obróbki ECM - CNC,
- symulacji obróbki USECM - CNC,
- prób technologicznych USECM - CNC,

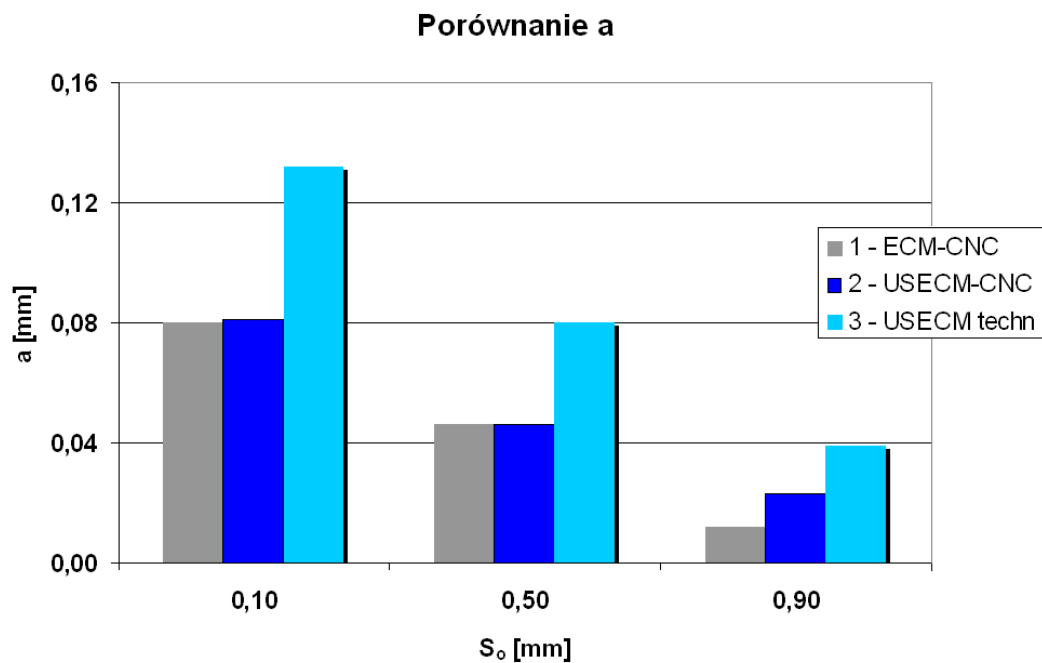
pokazuje, że dla przypadków 1 i 2 nie ma znaczących różnic w wielkości usuniętego naddatku. Wykorzystany do opracowania symulacji model matematyczny zakłada, że szczelina międzyelektrodowa jest wypełniona całkowicie elektrolitem, i jego właściwości nie zmieniają się w trakcie obróbki. Wprowadzenie do tego modelu okresowych, z częstotliwością 20 kHz , zmian szczeliny międzyelektrodowej nie spowodowało istotnego zwiększenia wielkości usuniętego naddatku.

Rys. 3.8 pokazuje, że zwiększenie amplitudy drgań do $50\text{ }\mu\text{m}$ (co w symulowanym przypadku jest na poziomie 50 % S_o) powoduje zwiększenie a jedynie o 0.003 mm . Potwierdza to przypuszczenia, że drgania ultradźwiękowe elektrody roboczej oddziałują na proces roztwarzania elektrochemicznego w sposób pośredni, poprzez zmianę hydrodynamiki elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej.

Analizując wyniki symulacji należy zwrócić również uwagę na czas trwania obliczeń, który dla stałej długości toru elektrody roboczej zależy od prędkości przesuwu elektrody v_p (Rys. 3.9). Konieczność oddania zmian położenia elektrody roboczej ogranicza możliwości wydłużenia pojedynczego kroku symulacji Δt . Pomijając czas niezbędny do przygotowania pliku z trajektorią elektrody, czas trwania symulacji obróbki powierzchni płaskiej o szerokości 2 mm z prędkością 30 mm/min oraz



Rys. 3.6. Porównanie zależności $a(S_o)$ dla $U = 14 V$, $v_p = 30 mm/min$; 1 - wyniki otrzymane z symulacji dla amplitudy drgań ultradźwiękowych $A = 10 \mu m$, 2 - dane otrzymane na podstawie prób technologicznych, amplituda drgań elektrody roboczej $A = 5.7 \mu m$.

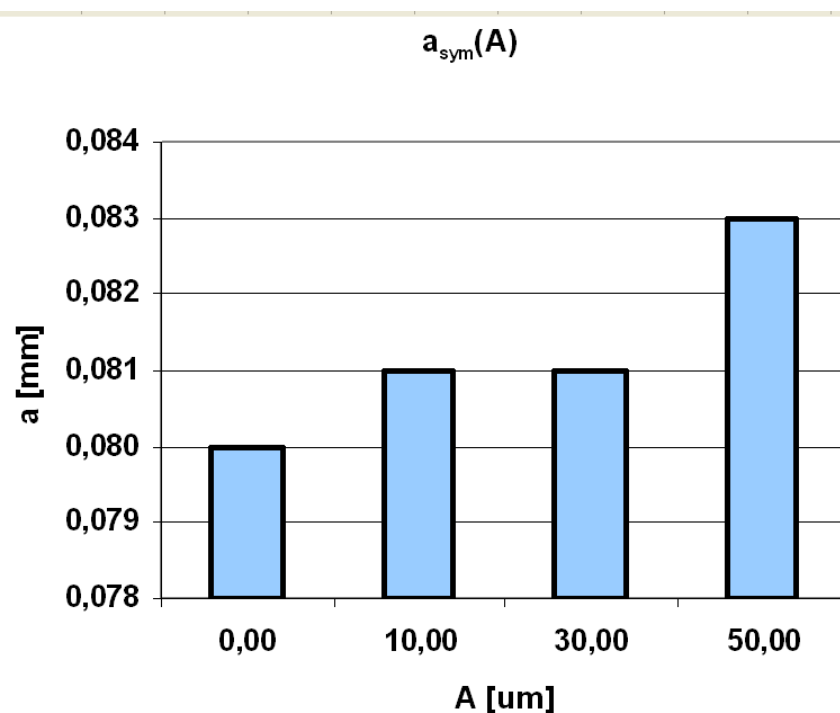


Rys. 3.7. Porównanie grubości usuniętego naddatku dla różnych wartości S_o , 1 - symulacja obróbki bez drgań ultradźwiękowych, 2 - symulacja obróbki z drganiami ultradźwiękowymi elektrody roboczej, 3 - dane otrzymane na podstawie prób technologicznych.

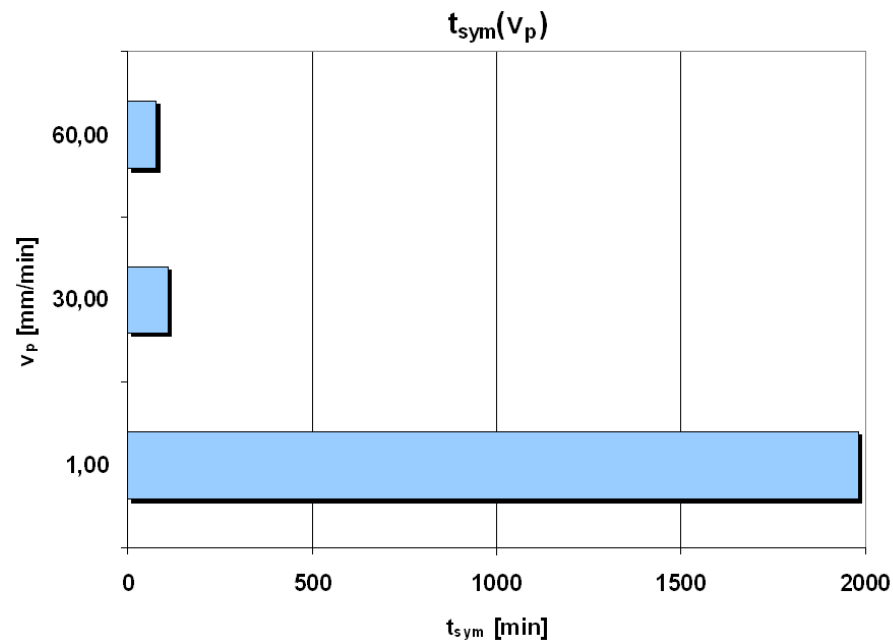
60 mm/min to odpowiednio ok. 70 min i 120 min. W skrajnym przypadku, przy prędkości 1 mm/min symulacja wzdłuż tej samej trajektorii zajęła ok. 2000 min. Ogranicza to zastosowanie tej metody do symulacji obróbki w zastosowaniach przemysłowych (np. na etapie projektowania procesu technologicznego).

Na podstawie wyników przeprowadzonych symulacji można sformułować następujące wnioski:

- przy założeniu stałych parametrów elektrolitu w szczelinie wprowadzenie do modelu okresowych zmian szczeliny międzyelektrodowej z częstotliwością ultradźwiękową nie daje żadnych efektów;
- z przedstawionych danych wynika, że drgania elektrody roboczej wpływają na proces roztwarzania elektrochemicznego w sposób pośredni, poprzez zmianę parametrów hydrodynamicznych przepływającego przez szczelinę elektrolitu;
- czas przygotowania danych oraz realizacji obliczeń jest bardzo długi i praktycznie uniemożliwia symulacje obróbki z zastosowaniem skomplikowanych trajektorii.



Rys. 3.8. Grubość usuniętego naddatku a otrzymane z symulacji dla różnych wartości amplitudy drgań ultradźwiękowych A .



Rys. 3.9. Przyrost czasu trwania symulacji wraz ze zmniejszaniem prędkości przesuwu elektrody roboczej; komputer z procesorem Intel Celeron 2.4 GHz, 512 MB RAM, system Windows XP Home.

3.4. Analiza możliwości zastosowania modelu ECM - CNC

Otrzymane przy pomocy opracowanego oprogramowania wyniki symulacji obróbki USECM - CNC odbiegają od wartości otrzymanych z prób technologicznych. Spowodowane jest to założeniem, że szczelina międzyelektrodowa jest w całości wypełniona elektrolitem o stałych parametrach (κ, T_e, β). W przypadku obróbki elektrodą uniwersalną założenie to jest w pełni uzasadnione, a otrzymane z symulacji ECM - CNC wyniki są bliskie wynikom otrzymanym z prób technologicznych [9].

W przypadku obróbki drgającą elektrodą uniwersalną można wprowadzić pojęcie quasi - ustalania się procesu ECM podobnie jak to ma miejsce w przypadku impulsowej obróbki elektrochemicznej [40]. W stanie quasistacjonarnym funkcja opisująca kształt szczeliny międzyelektrodowej może być potraktowana jako funkcja okresowa o okresie T . Można to zapisać:

$$F_s(x, y, t) = F_s(x, y, t + nT) \text{ dla } n = \dots - 2, -1, 0, 1, 2 \dots \quad (3.9)$$

Niezbędnym warunkiem osiągnięcia tego stanu jest wystarczająco długi czas obróbki, po którym warunki obróbki zmieniają się cyklicznie wraz ze zmianami położenia (drganiami elektrody). Warunek (3.9) jest spełniony w przypadku obróbki elektrochemicznej wspomaganą ultradźwiękami. W stanie quasistacjonarnym, w czasie

trwania jednego okresu drgań, przemieszczenie dowolnego punktu powierzchni obrabianej A w kierunku normalnym Δa_n wynosi:

$$\Delta a_n(t) = \int_0^T \eta k_v(t) i_A(t) dt \quad (3.10)$$

i zachodzi równość:

$$\Delta a_n(t) = \Delta(t + nT) \text{ dla } n = \dots - 2, -1, 0, 1, 2 \dots \quad (3.11)$$

Analizując proces kształtowania powierzchni drgającą z częstotliwością ultradźwiękową elektrodą roboczą, opierając się na doniesieniach literaturowych [42, 51, 72, 73], można założyć, że ultradźwięki wpływają na proces wymiany masy, ciepła oraz na warunki panujące w warstwie przyległej do anody. Powoduje to zmianę charakterystyki układu elektrochemicznego elektroda robocza - elektrolit - przedmiot obrabiany, która jest opisana funkcją zmiany obrabialności elektrochemicznej $\eta k_v = (j, v, T)$, oraz funkcją spadku potencjału na elektrodach $E_a - E_k = E(j, v, T)$. Zastosowane w analizie oprogramowanie umożliwia wprowadzenie tych parametrów obróbki w postaci dowolnej funkcji takich zmiennych jak: napięcie międzyelektrodowe U , odległość elektrody od analizowanego punktu anody S , przewodność elektrolitu κ , prędkość ruchu elektrody roboczej v_p , co pozwala w pierwszym przybliżeniu stosować model kształtowania powierzchni obróbką ECM - CNC również do obróbki USECM - CNC.

Pewnym problemem może być fakt, że w przypadku obróbki kulistą elektrodą uniwersalną oddziaływanie ultradźwięków na proces roztwarzania elektrochemicznego może zależeć od kąta α pomiędzy normalną do powierzchni obrabianej, a kierunkiem drgań ultradźwiękowych Rys. 3.10:

$$\frac{A_n}{A} = \cos \alpha \Rightarrow A_n = A \cos \alpha \quad (3.12)$$

gdzie: α zmienia się w przedziale $\langle 0, \alpha_{max} \rangle$, wartość α_{max} wynika z warunku na minimalną wartość gęstości prądu, przy którym zachodzi jeszcze proces roztwarzania (najczęściej $j_g = 10 \text{ A/cm}^2$).

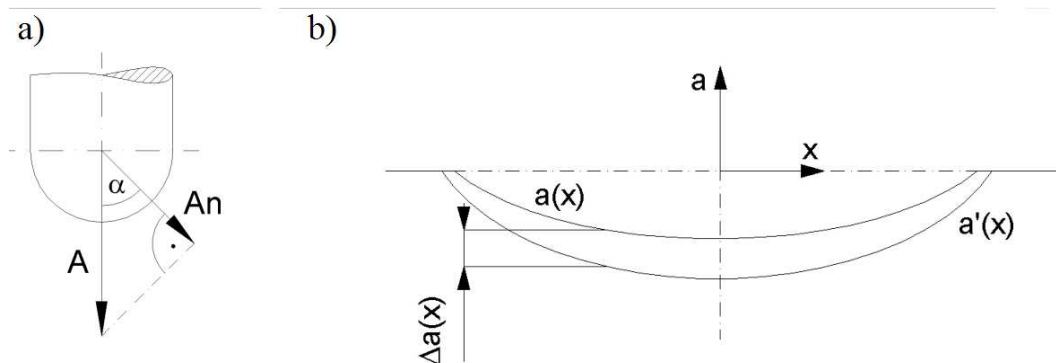
Można więc przyjąć, że zwiększenie grubości usuniętego naddatku $\Delta a(x)$ spowodowane drganiami ultradźwiękowymi nie jest jednakowe dla każdego punktu powierzchni obrabianej i zmniejsza się wraz ze wzrostem α (Rys. 3.10).

3.4.1. Przykładowe zależności otrzymane z symulacji

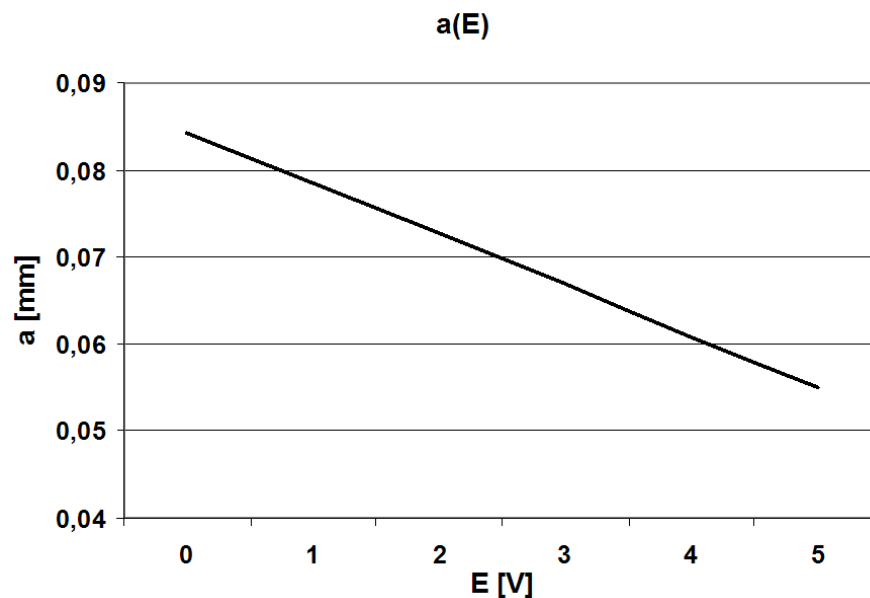
Korzystając z oprogramowania do symulacji ECM - CNC przeprowadzono symulacje obróbki dla pojedynczego przejścia elektrody roboczej i na ich podstawie

określono zależność grubości usuniętego naddatku a od wartości spadku potencjału w warstwach przyelektrodowych E . Wyniki symulacji przedstawione na Rys. 3.11 pokazują, że wraz ze wzrostem E następuje wyraźny spadek grubości usuniętego naddatku a . Ten dobrze znany fakt jest bardzo przydatny do analizy wyników badań obróbki USECM - CNC. Nie bez znaczenia są również zmiany kształtu przekroju powierzchni obrabianej w kierunku prostopadłym do kierunku obróbki Rys. 3.12.

Przeprowadzono również symulację zmian grubości usuniętego naddatku a oraz wydajności V_w dla różnych wartości E w przypadku wierszowania elektrodą robo-

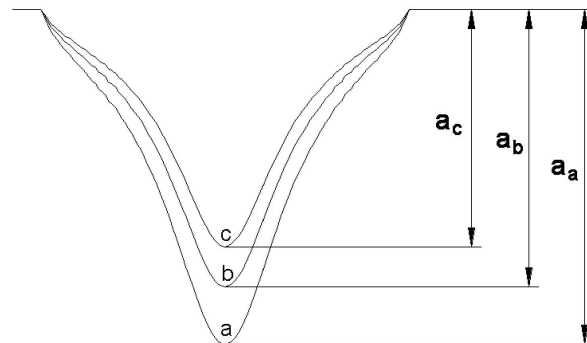


Rys. 3.10. Oddziaływanie ultradźwięków na powierzchnię obrabianą: a) zależność $A_n(a)$; b) rozkład $a(x)$ i $a'(x)$; $a(x)$ - grubość usuniętego naddatku w czasie obróbki ECM - CNC $a'(x)$ - grubość usuniętego naddatku w czasie obróbki USECM - CNC.

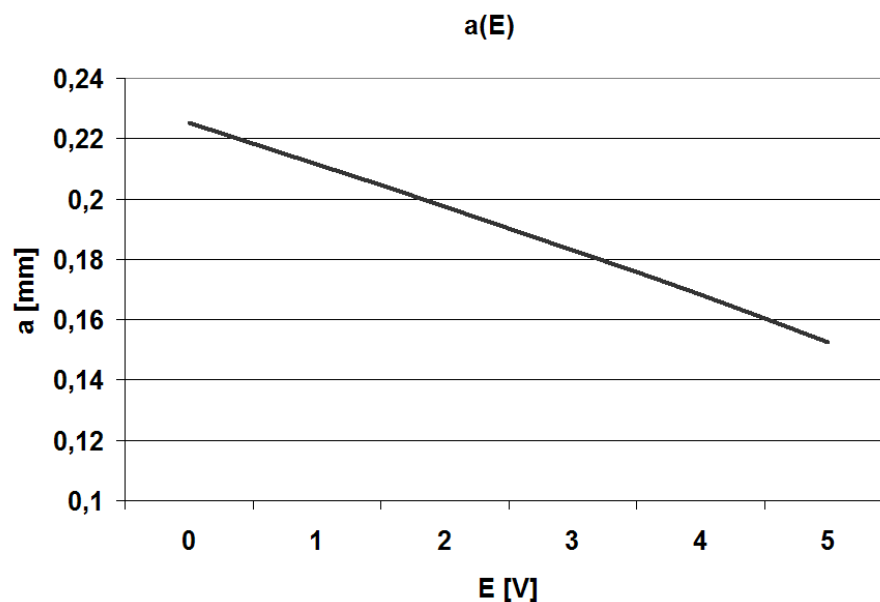


Rys. 3.11. Zależność grubości usuniętego naddatku a od spadku potencjału na elektrodach E , warunki symulacji: $U = 14 V$, $v_p = 30 mm/min$, $S_o = 0.5 mm$, $R = 5 mm$, $\kappa = 0.0136 1/(\Omega mm)$, $\eta k_v = 0.0213 mm^3/(As)$.

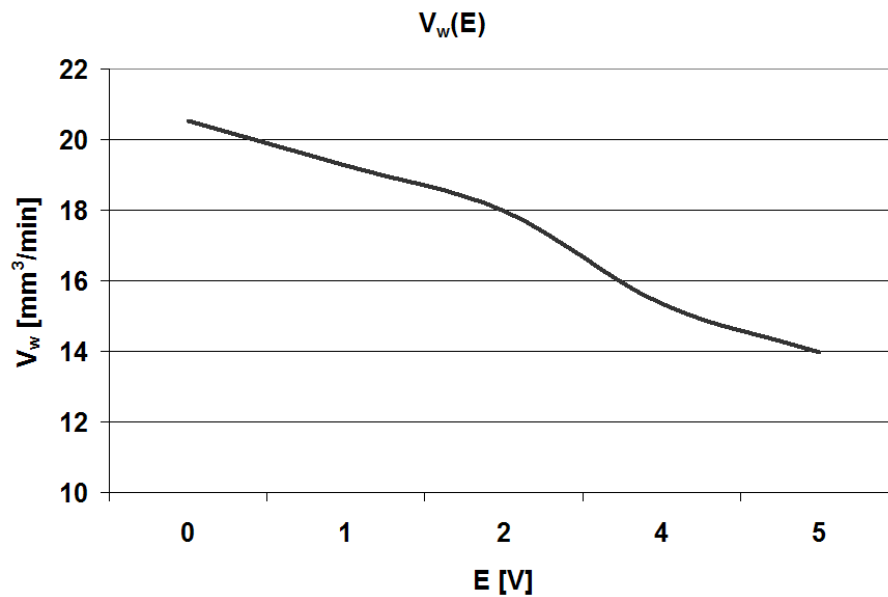
czą. Wyniki symulacji pokazały, że grubość usuniętego naddatku, jak i wydajność obróbki wyraźnie maleje wraz ze zwiększaniem się spadku potencjału na elektrodach E (Rys. 3.13, Rys. 3.14). Pokazane na Rys. 3.15, otrzymane z symulacji dla różnych wartości E , przekroje powierzchni obrabianej w kierunku prostopadłym do kierunku obróbki, pokazują w jaki sposób zmienia się grubość usuniętego naddatku wraz ze wzrostem E .



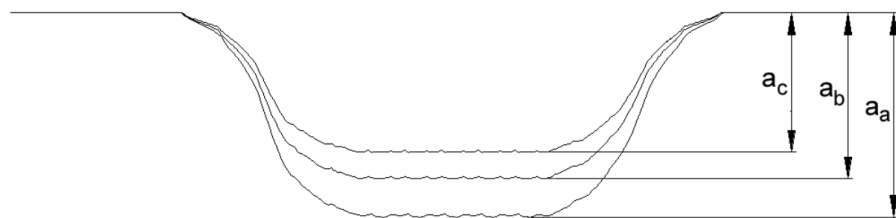
Rys. 3.12. Przekroje powierzchni obrabianej w kierunku prostopadłym do kierunku przesuwu elektrody, warunki symulacji jak na Rys. 3.11; a_a : $E = 5 V$, a_b : $E = 3 V$, a_c : $E = 0 V$.



Rys. 3.13. Zależność grubości usuniętego naddatku a od spadku potencjału E ; warunki symulacji: $U = 14 V$, $v_p = 45 mm/min$, $S_o = 0.1 mm$, $R = 5 mm$, $\kappa = 0.012 1/(\Omega mm)$, $\eta k_v = 0.0213 mm^3/As$, $c = 2 mm$, elektroda wykonuje 10 przejść.



Rys. 3.14. Zależność wydajności obróbki V_w od spadku potencjału E ; warunki symulacji: $U = 14 V$, $v_p = 45 mm/min$, $S_o = 0.1 mm$, $R = 5 mm$, $\kappa = 0.012 1/(\Omega mm)$, $\eta k_v = 0.0213 mm^3/As$, $c = 2 mm$, elektroda wykonuje 10 przejść.



Rys. 3.15. Porównanie przekrojów powierzchni obrabianej w kierunku prostopadłym do kierunku obróbki otrzymanych z symulacji obróbki ECM - CNC z wierszowaniem dla różnych wartości E ; a_a : $E = 0 V$, a_b : $E = 3 V$, a_c : $E = 5 V$.

Rozdział 4

Modelowanie numeryczne przepływu przez szczelinę międzyelektrodową w USECM

4.1. Wprowadzenie

W warunkach obróbki ECM przepływ w szczelinie międzyelektrodowej jest trójwymiarowy, wielofazowy i niestacjonarny. Istnieje wiele czynników kształtujących przepływ w strefie obróbki (Rys. 1.1), a najważniejsze z nich to ukształtowanie wlotu, chropowatość powierzchni oraz wstępne parametry doprowadzonego elektrolitu [40]. Ze względu na kształt i zmienną grubość szczeliny międzyelektrodowej wzdłuż kierunku przepływu, trudnością jest również jednoznaczne stwierdzenie rodzaju przepływu. Przepływ laminarny w szczelinie międzyelektrodowej może zmieniać się w turbulentny i odwrotnie. Wszystkie powyższe fakty powodują spore trudności w kompleksowym zamodelowaniu zjawisk związanych z przepływem elektrolitu w trakcie obróbki. Zdecydowana większość modeli przepływu w szczelinie międzyelektrodowej opiera się na uśrednieniu właściwości elektrolitu wzdłuż grubości szczeliny i rozwiązaniu zagadnienia przy zmieniających się właściwościach elektrolitu wraz z kierunkiem przepływu [23, 25, 40, 70, 71]. Takie podejście jest w zupełności wystarczające w przypadku analizy zmian kształtu przedmiotu obrabianego w trakcie procesu roztwarzania elektrochemicznego. Jednak rozważając obróbkę elektrochemiczną wspomaganą ultradźwiękami takie podejście do zagadnienia przepływu jest niewystarczające. Okresowe zmiany położenia czoła elektrody roboczej wprowadzają dodatkową składową prędkości i ciśnienia w kierunku poprzecznym do kierunku przepływu elektrolitu. Idealnym narzędziem do rozwiązania tego problemu jest Numeryczna Mechanika Płynów (Computational Fluid Dyna-

Tabela 4.1. Przykłady zastosowań Numerycznej Mechaniki Płynów.

Lotnictwo, badania kosmiczne	opływy okrętów podwodnych, samolotów, wentylacja kabin i pomieszczeń, zbiorniki paliwa, rurociągi
Przemysł biomedyczny	przepływy krwi w sztucznych i naturalnych organach, przepływy w urządzeniach biomedycznych, oczyszczanie powietrza
Przemysł chemiczny	przepływ ciepła i masy w reaktorach chemicznych z uwzględnieniem reakcji chemicznych, procesy mieszania w zbiornikach, procesy separacyjne (filtracja)
Przemysł elektroniczny	przepływy powietrza, rozkład temperatur wokół podzespołów elektronicznych i płytek drukowanych
Przemysł metalurgiczny	odlewanie metali (przemiany fazowe), konwekcja w zbiornikach wlewowych
Przemysł motoryzacyjny	obliczanie współczynników oporu powietrza, klimatyzacja wnętrz pojazdów, chłodzenie bloków silnika, projektowanie radiatorów i dysz
Energetyka cieplna	wymienniki ciepła, regeneratory ciepła, projektowanie systemów ogrzewczych i klimatyzacyjnych, spalanie paliw płynnych, stałych i gazowych

mics - CFD). Jest to burzliwie rozwijająca się dziedzina wykorzystująca metody numeryczne do analizy zjawisk związanych z przepływem płynów. Numeryczne rozwiązanie równań opisujących analizowany problem umożliwia uzyskanie informacji o rozkładzie pola prędkości, pola ciśnienia, przepływie ciepła (pole temperatury) i masy (również z uwzględnieniem reakcji chemicznych). Możliwości tych metod są bardzo szerokie, dlatego też oprogramowanie to znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i przemysłu (Tab. 4.1).

U podstaw CFD leży dyskretyzacja analizowanego obszaru przepływu i czasu, oraz rozwiązanie równań opisujących przepływ jedynie w węzłach rozpiętej na analizowanym obszarze siatki. W pozostałych punktach obszaru rozwiązanie otrzymane jest poprzez interpolację wartości w pobliskich węzłach. Celem przeprowadzo-

nej dyskretyzacji jest zamiana układu równań różniczkowych cząstkowych na układ równań algebraicznych (ich liczba zależna jest od ilości węzłów siatki). Niezależnie od zastosowania, rozwiązanie problemu składa się z następujących etapów [20]:

1. **Sformułowanie problemu oraz przygotowanie geometrii.** Jest to pierwszy etap analizy w trakcie którego następuje określenie geometrii, warunków przepływu oraz postawienie celów symulacji. Geometria najczęściej definiowana jest na podstawie pomiarów obiektu rzeczywistego lub powiązana jest z kolejnym etapem projektowania obiektu. Warunki przepływ określa np. liczba Reynoldsa, liczba Macha itp. Na tym etapie analizy należy określić również wymaganą dokładność, związany z tym czas symulacji oraz wybrać kryterium oceny poprawności symulacji (np. parametry przepływu w określonym punkcie).
2. **Wybór równań modelu matematycznego. Definicja warunków brzegowych.** Równania opisujące przepływ oparte są na zasadzie zachowania masy, zasadzie zachowania pędu oraz zasadzie zachowania energii. Na podstawie tych praw otrzymujemy układ równań różniczkowych cząstkowych. W zależności od rozwiązywanego zagadnienia, możliwe jest rozwiązanie uproszczonej formy [32], np.:

- dla przepływu płynu nielepkiego - równania Eulera,
- dla przepływu potencjalnego - równanie ciągłości i równanie zachowania energii (dla gazu).

Powyższe równania mogą opisywać przepływ stacjonarny, niestacjonarny, ściśliwy lub nieściśliwy. Do warunków brzegowych zadania zaliczamy: definicję ściany, definicję wlotów i wylotów, określenie osi symetrii itp. Jeżeli jest to konieczne, na tym etapie należy dokonać wyboru modelu opisującego zjawiska fizyczne, do których opisu zastosowane wcześniej równania są niewystarczające. Przykładem jest tutaj przepływ turbulentny. W tym przypadku rozwiązanie równań N-S prowadzi do niepełnego układu równań Reynoldsa. Aby otrzymać rozwiązanie należy je uzupełnić o związki pomiędzy turbulencją i polem prędkości głównych (tzw. model turbulencji). Odpowiedni wybór rozwiązywanych równań, jest bardzo ważnym elementem mającym wpływ na rezultaty analizy.

3. **Wybór metody tworzenia siatki oraz sposobu rozwiązania równań.** Na tym etapie należy wskazać algorytm podziału obszaru przepływu na pojedyncze komórki lub elementy siatki. Istnieje sporo metod dyskretyzacji analizowanego obszaru, które umożliwiają otrzymanie m.in. siatki strukturalnej, niestrukturalnej lub hybrydowej. Siatka może również podlegać adaptacji w trakcie rozwiązywania. Metody numeryczne używane w CFD to m. in. metoda różnic skończonych, metoda objętości skończonych oraz metoda elementów skończo-

nych. Wybór metody numerycznej jest ściśle związany z przyjętą strategią dyskretyzacji przestrzeni (np. użycie metody różnic skończonych jest ograniczone jedynie do siatki strukturalnej). Otrzymane wyniki w dużym stopniu zależą od właściwego wyboru metody dyskretyzacji oraz sposobu rozwiązania równań opisujących przepływ.

4. **Opracowanie i interpretacja wyników. Postprocessing.** Ten etap związany jest z analizą otrzymanych wyników. Prezentacja wyników możliwa jest w postaci wykresów, trójwymiarowych rozkładów wartości parametrów (prędkości, temperatury, ciśnień, itd), prezentacji zmian wartości w czasie, historia wybranych elementów płynu. Na tym etapie dokonuje się oszacowania błędów przeprowadzonej analizy.

Jak już wcześniej wspomniano metody CFD znajdują bardzo szerokie zastosowanie do rozwiązywania i optymalizacji zagadnień związanych z transportem masy (również reakcje chemiczne), ciepła, przepływem wielofazowym i przepływem turbulentnym. Modelowanie tych zjawisk w sposób tradycyjny jest bardzo trudne oraz czasochłonne, czasami wręcz niemożliwe, dlatego też w tych obszarach metody numeryczne znalazły najszersze zastosowanie. Pomimo dużych możliwości, CFD nie znalazło szerokiego zastosowania do modelowania zjawisk związanych z wytwarzaniem części maszyn. Literatura dotycząca zastosowań metod lub oprogramowania CFD do tych celów jest bardzo uboga i obejmuje jedynie zagadnienia związane z procesem cięcia wodą (lub mieszaniną wody i ścierniwa) (np. [2]).

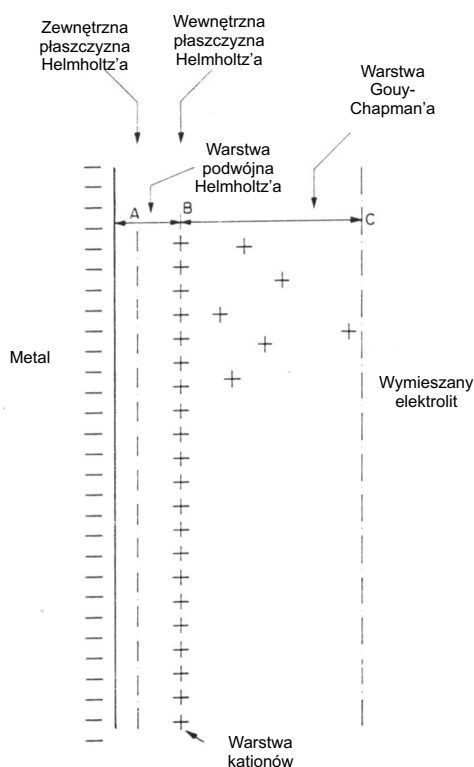
W trakcie realizacji pracy przeanalizowano możliwości wykorzystania dostępnych na rynku komercyjnych pakietów umożliwiających symulacje przepływów i na tej podstawie podjęto decyzję o zastosowaniu oprogramowania Fluent. Obliczenia zostały przeprowadzone w Akademickim Centrum Komputerowym Cyfronet AGH (nr grantu: MNiI/SGI2800/IOS/003/2004).

4.2. Cel, zakres i koncepcja modelowania numerycznego

Analiza literatury dotyczącej USECM pokazała, że wpływ ultradźwięków na proces roztwarzania elektrochemicznego uwidacznia się poprzez intensyfikację zjawiska kawitacji w szczelinie międzyelektrodowej [5, 117, 118, 119]. Wzrost i gwałtowne zapadanie się pęcherzyków kawitacyjnych w pobliżu powierzchni elektrod i powstający przy tym gradient ciśnienia umożliwia powstawanie przy powierzchni anody i katody *mikro - strug*, które powodują zwiększenie intensywności wymiany masy, ładunku elektrycznego i ciepła. Jak pokazały przedstawione w poprzednim rozdziale, rezultaty modelowania matematycznego obróbki USECM - CNC rozwiązanie rów-

nań opisujących proces kształtowania elektrochemicznego, przy założeniu stałych parametrów elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej prowadzi do takich samych rezultatów jak dla ECM - CNC. Otrzymane wyniki obliczeń teoretycznych znacznie odbiegają od danych otrzymanych z prób technologicznych.

Prędkość roztwarzania elektrochemicznego zależy od prędkości reakcji elektrochemicznych oraz od szybkości dyfuzji jonów przez warstwę przyelektrodową. Na granicy faz elektroda - roztwór elektrolitu powstaje obszar różniący się strukturą i składem chemicznym od wnętrza obu graniczących faz, który nazywamy podwójną warstwą elektryczną [114]. Struktura warstwy podwójnej jest bardzo złożona, jednak do opisu procesów zachodzących w ECM wystarczające jest przybliżenie przedstawione na Rys. 4.1, gdzie przyjmuję się, że warstwa podwójna składa się z dwóch charakterystycznych obszarów: podwójnej warstwy Helmholtz'a i warstwy Gay - Chapman'a.



Rys. 4.1. Schemat podwójnej warstwy elektrycznej [60].

Grubość podwójnej warstwy Helmholtz'a jest rzędu 10^{-7} mm, natomiast grubość warstwy Gay - Chapman'a jest rzędu 10^{-3} mm. Jony powierzchni metalu utrzymywane są przez siły sieci krystalicznej, i do ich przejścia do roztworu wymagana jest pewna energia. Z drugiej strony, jony w roztworze, utrzymywane są przez siły hydratacji, i do ich przejścia na powierzchnię elektrody również wymagana jest pewna

energia. W stanie równowagi dynamicznej, ilość kationów osadzających się na powierzchni metalu, jest równa liczbie atomów ulegających jonizacji i przechodzących do roztworu. W stanie równowagi dynamicznej ustala się potencjał elektrody metalowej, który można obliczyć z równania Nernsta:

$$E = E_o + \frac{RT}{zF} \ln a \quad (4.1)$$

gdzie: E_o - potencjał normalny elektrody, R - stała gazowa, T - temperatura, F - stała Faradaya, a - aktywność jonów metalu. Po przyłożeniu napięcia U do elektrod ich potencjały ulegną zmianie i będą wynosić:

$$\Phi_a = U - \phi_a \quad (4.2)$$

$$\Phi_k = U - \phi_k \quad (4.3)$$

Aby mogło zachodzić roztwarzanie elektrochemiczne, potencjał anody powinien przyjmować wartości bardziej dodatnie w stosunku do potencjału równowagi anody. Równocześnie w warstwie przykatodowej, pod wpływem sił pola elektrycznego rośnie stężenie kationów (czyli wzrasta ładunek dodatni), co powoduje przesunięcie potencjału katody w kierunku wartości ujemnych. Różnice pomiędzy potencjałem elektrody niezbędnym do zapewnienia odpowiedniej prędkości reakcji, a potencjałem równowagi nazywamy nadnapięciem aktywacyjnym η_a .

Wraz ze wzrostem prędkości roztwarzania elektrochemicznego rośnie stężenie anionów (kationów) w pobliżu anody (katody). Powoduje to zmianę potencjału równowagi o wartość η_s nazywaną nadnapięciem stężeniowym. W przypadku gdy do anody przyłożone jest napięcie zewnętrzne, jej potencjał określony jest zależnością:

$$\Phi_a = U - (E_a + \eta_a + \eta_s) \quad (4.4)$$

Sumaryczny przyrost potencjału elektrody nazywany jest polaryzacją elektrody (anody lub katody). Sumaryczna polaryzacja elektrod E może być wyznaczona z równania:

$$E = \Phi_a - \Phi_k \quad (4.5)$$

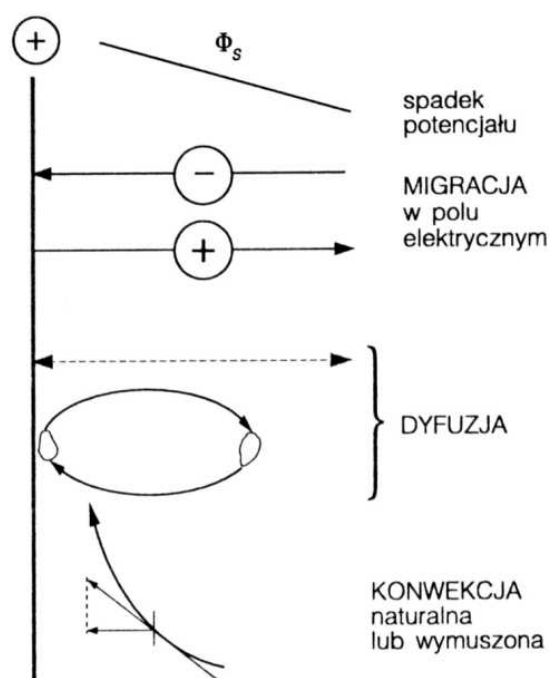
Nadnapięcie aktywacyjne η_a , opisane jest równaniem Tafel'a, które przedstawia nieliniową zależność η_a od wartości prądu:

$$\eta_a = a + b \lg J \quad (4.6)$$

gdzie a , b - stałe Tafel'a. Dla wartości prądu roztwarzania anodowego rzędu 10^2 A/cm^2 można wyliczyć, że nadnapięcie aktywacyjne η_a jest rzędu 1 V . O ile η_a można z

pewnym przybliżeniem oszacować z równania (4.6), o tyle obliczenie wartości η_s dla procesu obróbki elektrochemicznej nie jest już takie proste. Udział nadnapięcia stężeniowego jest znaczny w warstwach przyelektrodowych, dyfuzyjnych i podwójnych. Poza nimi koncentracja jonów zmienia się nieznacznie i wewnątrz szczeliny o rozkładzie potencjału decyduje spadek omowy. Transport jonów na granicy faz elektroda - elektrolit oparty jest na trzech podstawowych mechanizmach (Rys. 4.2):

- migracja, czyli transport pod wpływem oddziaływania sił pola elektrycznego,
- konwekcja (unoszenie),
- dyfuzja.



Rys. 4.2. Mechanizmy transportu jonowego w roztworze;
 Φ_s - spadek potencjału [114].

Powstawanie nadnapięcia stężeniowego związane jest z różnicą pomiędzy szybkością roztwarzania elektrochemicznego a szybkością dyfuzji jonów anody do roztworu w głąb szczeliny międzyelektrodowej. Koncentracja jonów w warstwie przyelektrodowej rośnie, powodując powstawanie gradientu stężenia jonów, który zgodnie z prawem Fick'a związany jest z gęstością prądu dyfuzyjnego następującym równaniem:

$$j = -z_i F D_i \frac{dC}{dy} \quad (4.7)$$

gdzie: z_i - wartościowość jonów, D_i - współczynnik dyfuzji, $\frac{dC}{dy}$ - gradient stężenia jonów, F - stała Faraday'a. Gdy większy jest gradient stężenia jonów anody przechodzących do roztworu elektrolitu, tym większa jest prędkość roztwarzania. Gradient

koncentracji jonów w warstwach przyelektrodowych jest więc głównym czynnikiem określającym przepływ prądu w tym obszarze. Udział migracji i konwekcji w transporcie jonów na granicy faz jest znikomy. Znaczenie tego mechanizmu dla przepływu prądu wzrasta wraz z oddaleniem się od powierzchni elektrody.

Wartość nadnapięcia stężeniowego η_s związana jest z pojęciem grubości warstwy dyfuzyjnej δ . Dla przepływu turbulentnego wartość δ może być oszacowana na podstawie grubości podwarstwy lepkiej z następującej zależności [58]:

$$\delta = \left(\frac{D\delta_l^3}{\gamma u_f} \right)^{1/4} \quad (4.8)$$

gdzie δ_l - grubość podwarstwy lepkiej, u_f - prędkość tarcia, γ - stała otrzymana doświadczalnie, w przybliżeniu równa jedności. Prędkość elektrolitu w podwarstwie lepkiej zmienia się prostoliniowo wg następującej zależności:

$$v(y) = \frac{\tau_0}{\rho\nu}y \quad (4.9)$$

gdzie naprężenie styczne jest naprężeniem niutonowskim $\tau_o = \mu \left(\frac{dU}{dy} \right)$ [32].

Zgodnie z przedstawioną powyżej analizą, zmniejszenie polaryzacji stężeniowej w warstwach przyelektrodowych powoduje zwiększenie szybkości roztwarzania elektrochemicznego. Wartości η_s związana jest z warunkami hydrodynamicznymi panującymi w szczelinie międzyelektrodowej. Dlatego też niezbędnym do wyjaśnienia zjawisk w trakcie USECM - CNC jest rozwiązanie zagadnienia przepływu w szczelinie międzyelektrodowej. Rozwiązanie zagadnienia przepływu turbulentnego w stanie quasiustalonym obróbki USECM umożliwi oszacowanie wpływu drgań ultradźwiękowych na zjawiska zachodzące w szczelinie międzyelektrodowej. Określenie rozkładu ciśnienia oraz prędkości w trakcie okresowych zmian położenia elektrody roboczej, pozwoli na zweryfikowanie doniesień literaturowych dotyczących zjawisk odpowiedzialnych za polepszenie wskaźników technologicznych.

Ze względu na ograniczone możliwości zweryfikowania otrzymanych rezultatów, celem zaprezentowanej analizy jest jakościowe wyjaśnienie zjawisk zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej. Weryfikacja otrzymanych wyników w warunkach roztwarzania elektrochemicznego jest praktycznie niemożliwa (przeszkodą jest przede wszystkim mała szczelina oraz bardzo krótki czas trwania zjawisk kawitacyjnych). Wpływ ultradźwięków obserwowany jest przede wszystkim poprzez zmianę wskaźników technologicznych roztwarzania elektrochemicznego, czyli zwiększenie grubości usuniętego naddatku, zwiększenie wydajności obróbki oraz zmianę chropowatości powierzchni. Dlatego też otrzymane wyniki analizy numerycznej zostaną wykorzystane do interpretacji rezultatów analizy doświadczalnej.

4.3. Założenia do modelu

4.3.1. Założenia dotyczące modelowanego ośrodka

W celu zamodelowania przepływu w trakcie obróbki USECM założono, że przez szczelinę międzyelektrodową przepływa mieszanina następujących składników:

- elektrolit,
- para elektrolitu
- nie kondensującego gazu, który jest traktowany jako faza równomiernie rozproszona w całej analizowanej objętości

Nawet niewielkie ilości rozpuszczonego w przepływającej cieczy gazu wpływają znacząco na rozwój zjawiska kawitacji [8, 116]. Spowodowane to jest rozprężaniem się gazu w obszarach niskiego ciśnienia, co zwiększa lokalnie jego zawartość objętościową α_g i ma znaczący wpływ na gęstość, prędkość oraz rozkład ciśnienia. Rozpuszczony w cieczy gaz powoduje również podniesienie progu kawitacji [8], jednak z powodu braku wzajemnej korelacji efekt ten nie został uwzględniony w przedstawionym modelu. W trakcie modelowania pominięto fazę stałą, którą tworzą wodorotlenki metalu.

Numeryczna Mechanika Płynów umożliwia modelowanie przepływów wielofazowych za pomocą dwóch metod [1]:

Euler - Lagrange. Ciecz traktowana jest jako ośrodek ciągły, rozwiązywane są uśrednione w czasie równania N-S, natomiast rozkład fazy dyskretnej (np. cząstki stałe, pęcherzyki powietrza) otrzymywany jest poprzez śledzenie zmian położenia tych cząstek wraz z przepływem cieczy.

Euler - Euler. Ośrodek wielofazowy traktowany jest jak ośrodek ciągły, natomiast wprowadzone jest pojęcie objętościowego udziału danej fazy α . Współczynnik α dla każdej fazy jest ciągłą funkcją czasu i przestrzeni, i dla układu n faz spełniona jest zależność:

$$\sum_{k=1}^n \alpha_k = 1 \quad (4.10)$$

Dla każdej z faz układu obliczane jest równanie ciągłości. Otrzymany układ równań opisujący przepływ domykany jest równaniami empirycznymi.

Do rozwiązania problemu postawionego na wstępie tego rozdziału wybrano tzw. "Mixture model", który oparty jest na drugim z wyżej wymienionych sposobów traktowania mieszaniny wielofazowej. "Mixture model" umożliwia wprowadzenie zjawiska transportu masy pomiędzy fazami oraz wprowadza pojęcie prędkości poślizgu (czyli umożliwia poruszanie się składników układu z różnymi prędkościami). Dla

Tabela 4.2. Dane cieczy przepływającej przez szczelinę.

Mieszanina	ciecz + para wodna + gaz
Temperatura mieszaniny	$T = 300 \text{ K}$
Ciśnienie prężności pary	$P_{sat} = 3540 \text{ Pa}$
Napięcie powierzchniowe	$\gamma = 0.0717 \frac{\text{N}}{\text{m}}$

przyjętej na wstępie mieszaniny cieczy i pary równanie (4.10) przyjmie następująca postać:

$$\alpha_e + \alpha_v + \alpha_g = 1 \quad (4.11)$$

gdzie: α_e - udział objętościowy elektrolitu, α_v - udział objętościowy pary elektrolitu, α_g - udział objętościowy gazu.

W trakcie realizacji pracy napotkano spore trudności w znalezieniu niezbędnych do zamodelowania przepływu danych materiałowych dla typowych elektrolitów używanych w ECM. W związku z tym założono, że przez szczelinę przepływa słaby elektrolit i przyjęto dane materiałowe jak dla wody (Tab. 4.2). Założono, że wydatek przepływającego przez szczelinę elektrolitu jest na tyle duży, że nie ma istotnego przyrostu temperatury elektrolitu T_e oraz stężenia objętościowego wodoru C_H , czyli $\kappa = const$. Zakłada się, że jedyny wpływ ultradźwięków na przebieg procesu rozwarzania to powstawanie pęcherzyków kawitacyjnych w obszarach przeelektrodowych. Intensywność powstawania pęcherzyków wpływa na E oraz ηk_v a tym samym na S , a i Ra .

4.3.2. Równania przepływu mieszaniny

Przepływ mieszaniny przez szczelinę międzyelektrodową opisany jest następującym układem równań [1]:

1. Równanie ciągłości dla mieszaniny:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = \dot{m} \quad (4.12)$$

gdzie \vec{v}_m - "uśredniona masowo" prędkość zdefiniowana następującym równaniem:

$$\vec{v}_m = \frac{\alpha_e \rho_e \vec{v}_e + \alpha_v \rho_v \vec{v}_v + \alpha_g \rho_g \vec{v}_g}{\rho_m} \quad (4.13)$$

gdzie \dot{m} po lewej stronie równania (4.27) opisuje wymianę masy pomiędzy fazami, natomiast ρ_m określa gęstość mieszaniny:

$$\rho_m = \alpha_e \rho_e + \alpha_v \rho_v + \alpha_g \rho_g \quad (4.14)$$

2. Równanie zachowania pędu dla mieszaniny otrzymujemy poprzez zsumowanie równań dla poszczególnych jej składników. Przy założeniu, że nie ma poślizgów pomiędzy fazami równanie to przyjmuje postać:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m(\nabla \vec{v}_m) + \nabla \vec{v}_m^T] + \vec{F} \quad (4.15)$$

Lepkość mieszaniny μ_m obliczana jest na podstawie następującego wyrażenia:

$$\mu_m = \alpha_e \mu_e + \alpha_v \mu_v \quad (4.16)$$

3. Ostatnim równaniem jest równanie opisujące zmiany udziału objętościowego pary, otrzymane z równania ciągłości dla fazy lotnej:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{v}_m) = 0 \quad (4.17)$$

Numeryczne rozwiązanie powyższych równań umożliwia otrzymanie poszukiwanych rozkładów prędkości $\vec{v}_m(x, y, t)$, ciśnienia $p_m(x, y, t)$ oraz $\alpha_v(x, y, t)$.

Model turbulencji

Parametrem określającym rodzaj przepływu w szczelinie jest liczba Reynolds'a Re . Dla najczęściej stosowanych elektrolitów i grubości szczeliny międzyelektrodowej minimalne wartości Re są w granicach $10^3 \div 10^4$. Nie pozwala to na jednoznaczne określenie, jaki charakter przepływu jest w szczelinie, jednak ze względu na spore trudności w trakcie modelowania, przyjmuje się, że jest on laminarny. Modelując przepływ przez szczelinę międzyelektrodową, obejmujący zjawisko kawitacji, nie możemy przyjąć takiego założenia, ponieważ turbulencje mają istotny wpływ na rozwój pęcherzyków kawitacyjnych.

W przepływie turbulentnym podstawowe jego parametry, jak prędkość, ciśnienie i gęstość w każdym punkcie ulegają szybkim, niewielkim zmianom o przypadkowym charakterze. Są to losowe funkcje położenia i czasu, lokalnie niestacjonarne (nawet gdy przepływ jest globalnie stacjonarny). Fluktuacje prędkości i ciśnienia mogą być niewielkie (określa to skala turbulencji) i zachodzić z dużą częstotliwością, dlatego też numeryczne rozwiązanie równań N-S dla przepływu turbulentnego wymaga zastosowania bardzo gęstej siatki (uwzględnienie skali turbulencji) oraz bardzo dużej ilości kroków czasowych. Już symulacja bardzo prostego przypadku przepływu turbulentnego wymaga ok. 10 milionów węzłów siatki [7]. Dlatego też, przy rozwiązaniu równań N-S dla przepływu turbulentnego dokonujemy dekompozycji zmiennych określających przepływ. Przykładowo zmienną zależną, jaką jest prędkość w dowolnym punkcie P analizowanego obszaru przedstawiamy jako sumę dwóch składników:

$$v(P, t) = \bar{v}(P, t) + v'(P, t) \quad (4.18)$$

gdzie: $\bar{v}(P, t)$ - prędkość główna będąca wartością średnią, $v'(P, t)$ - pulsacja prędkości (prędkość poboczna), czyli odchyłka od wartości średniej. Podstawienie do równania ciągłości i równania N-S uśrednionych wartości (4.18) prowadzi do równań uśrednionych przepływu turbulentnego, które są nazywane równaniami Reynoldsa [20, 32]. Ilość niewiadomych w tym układzie równań (dla rozważanego przypadku płaskiego dwie składowe prędkości, ciśnienie, trzy składowe naprężenia turbulentnego) jest większa niż ilość równań (równanie ciągłości, 2 równania N-S). Istnieje szereg modeli, które wprowadzane są w celu domknięcia układu równań Reynoldsa. Można je podzielić na cztery grupy [20]:

1. modele algebraiczne. Na podstawie równania algebraicznego obliczana jest lepkość turbulentna. Tensor naprężeń Reynoldsa obliczany jest na podstawie założenia Boussinesq'a, które wiąże tensor naprężeń Reynoldsa z gradientem prędkości i lepkością turbulentną;
2. modele jednorównaniowe. Rozwiązywane jest równanie opisujące transport wielkości turbulentnej (najczęściej jest to energia kinetyczna turbulencji k). Druga wielkość opisująca turbulencję (zwykle skala turbulencji) otrzymywana jest na podstawie wyrażenia algebraicznego. Lepkość turbulentna obliczana jest na podstawie założenia Boussinesq'a;
3. modele dwurównaniowe. Rozwiązywane są dwa równania opisujące transport dwóch skalarów. Najczęściej jest to energia kinetyczna turbulencji k oraz dysypacja energii kinetycznej ε . Tensor naprężeń Reynoldsa otrzymywany jest na podstawie założenia Boussinesq'a;
4. model naprężeń Reynoldsa. Rozwiązywane jest równanie transportu dla tensora naprężeń Reynoldsa. Wprowadza się również równanie określające skalę turbulencji - najczęściej w zależności od ε .

Zdecydowana większość modeli turbulencji przystosowana jest do modelowania przepływu jednofazowego, natomiast istnieje niewiele informacji dotyczących doboru odpowiedniego modelu dla przepływu wielofazowego (z uwzględnieniem kawitacji). Biorąc to pod uwagę zdecydowano o wyborze modelu $k - \varepsilon$ [1, 7, 20, 32]. Model ten zapewnia zadowalającą dokładność dla bardzo szerokiej grupy przepływów turbulentnych.

4.3.3. Transport masy. Model kawitacji

Zastosowany w pracy model kawitacji to *Full Cavitation Model*, opracowany przez Singhal'a i in. i przedstawiony w pracy [116]. Gęstość mieszaniny wypełniającej szczelinę międzyelektrową określana jest na podstawie zależności pomiędzy

współczynnikiem f , określającego udział masowy fazy gazowej w mieszaninie, a jej gęstością ρ [116]:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{f_v}{\rho_v} + \frac{f_g}{\rho_g} + \frac{1 - f_v - f_g}{\rho_e} \quad (4.19)$$

Współczynniki f_v i f_g określają odpowiednio udział masowy pary i gazu w mieszaninie i są funkcją ciągłą przestrzeni i czasu. Udział objętościowy pary można obliczyć z zależności:

$$\alpha_v = f_v \frac{\rho}{\rho_v} \quad (4.20)$$

natomiast udział objętościowy gazu z zależności:

$$\alpha_g = f_g \frac{\rho}{\rho_g} \quad (4.21)$$

Współczynnik f_v obliczany jest poprzez rozwiązanie równania transportu [116]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_v) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} f_v) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla f_v) + R_e - R_c \quad (4.22)$$

Zmienne R_e i R_c opisują odpowiednio tworzenie się (ewaporację) i kondensację pary. Wartości R_e i R_c są zależne od właściwości cieczy oraz od parametrów przepływu. Określenie współczynników R_e i R_c wymaga następujących założeń upraszczających:

- poślizg pomiędzy cieczą a fazą gazową jest pomijalnie mały, dlatego też zakłada się, że ciecz i para poruszają się z tą samą prędkością. Warto zauważyć również, że obszary zmniejszonego ciśnienia ($p < p_v$), gdzie powstają pęcherzyki kawitacyjne, to obszary gdzie prędkość przepływu mieszaniny jest bardzo duża, dlatego też błąd związany z tym uproszczeniem jest niewielki.
- Para powstała w wyniku lokalnych spadków ciśnienia, przybiera kształt drobnych pęcherzyków. Rozwiązanie takiego przepływu wymaga potraktowania pęcherzyków pary jako fazy dyskretnej. Jednak otrzymane rozwiązanie w znacznym stopniu zależy od modelu fizycznego zastosowanego do obliczenia lokalnych sił unoszenia oraz od rozmiarów poszczególnych pęcherzyków. Niestety, słabym punktem takiego podejścia jest brak uniwersalnego modelu opisującego zjawiska lokalnego wzrostu pęcherzyków i umożliwiające uwzględnienie poślizgów pomiędzy cieczą a pęcherzykami pary. Z praktycznego punktu widzenia wprowadzenie pęcherzyków jako fazy dyskretnej, związane jest ze znacznym zwiększeniem zasobów sprzętowych wymaganych do obliczeń.

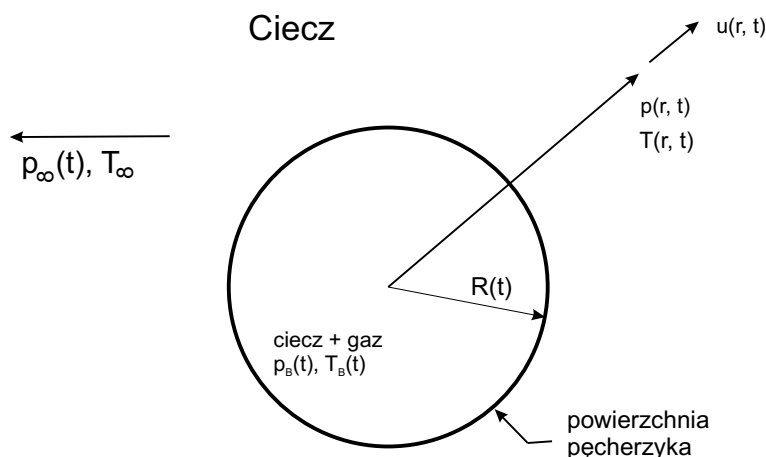
Dynamika pęcherzyków kawitacyjnych

Dynamika pęcherzyków kawitacyjnych opisana jest za pomocą równania Rayleigh - Plasset'a (R-P), które opisuje zachowanie się pojedynczego pęcherzyka kawitacyj-

nego, w nieskończonym otoczeniu cieczy (Rys. 4.3). Pomijając poślizg pomiędzy fazami, równanie R-P przyjmuje następującą postać [8]:

$$\frac{p_b(t) - p_\infty(t)}{\rho_e} = R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{\nu_e}{R} \frac{dR}{dt} + \frac{2S}{\rho_e R} \quad (4.23)$$

gdzie $R = R(t)$ - promień pęcherzyka, γ - napięcie powierzchniowe.



Rys. 4.3. Schemat pojedynczego pęcherzyka kawitacyjnego w otoczeniu cieczy; $p_B(t)$, $T_B(t)$ - ciśnienie i temperatura w środku pęcherzyka; $p(r, t)$, $T(r, t)$, $u(r, t)$ - ciśnienie, temperatura i prędkość cieczy w odległości r od środka pęcherzyka; $p_\infty(t)$, $T_\infty = const$ - ciśnienie i temperatura w nieskończonej odległości od środka pęcherzyka [8].

Zawartość objętościowa pary w mieszaninie może być powiązana z ilością pęcherzyków kawitacyjnych następującą zależnością:

$$\alpha_v = n \frac{4}{3} \pi R^3 \quad (4.24)$$

gdzie n określa ilość pęcherzyków w rozważanej objętości. Aby otrzymać zależność określającą wymianę masy pomiędzy fazami cieczy i pary, konieczne jest określenie równania ciągłości dla cieczy:

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1 - \alpha_v - \alpha_g) \rho_e] + \nabla \cdot ((1 - \alpha_v - \alpha_g) \rho_e \vec{v}) = -R_t \quad (4.25)$$

pary:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{v}) = R_t \quad (4.26)$$

i mieszaniny:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (4.27)$$

gdzie R_t określa szybkość wymiany masy pomiędzy fazami i jest równe $(R_e - R_c)$. Na podstawie (4.23) (z pominięciem wpływu lepkości i napięcia powierzchniowego -

3 i 4 człon po prawej stronie równania), (4.24), (4.25), (4.26) otrzymujemy równanie określające transport masy pomiędzy fazami:

$$R_t = (n4\pi)^{1/3}(3\alpha_v)^{2/3} \frac{\rho_e \rho_v}{\rho} \left[\frac{2}{3} \left(\frac{p_b(t) - p_\infty(t)}{\rho_e} \right) - \frac{2}{3} R \frac{d^2 R}{dt} \right]^{1/2} \quad (4.28)$$

Ostatecznie, po pominięciu w równaniu (4.28) członu związanego z przyspieszeniem ($\frac{d^2 R}{dt}$) i wstawieniu (4.28) do (4.22) otrzymujemy:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho f_v) + \nabla \cdot (\rho f_v \vec{v}) = (n4\pi)^{1/3}(3\alpha)^{2/3} \frac{\rho_e \rho_v}{\rho} \left[\frac{2}{3} \left(\frac{p_b(t) - p_\infty(t)}{\rho_e} \right) \right]^{1/2} \quad (4.29)$$

Powyższe równanie zostało otrzymane na podstawie równania R-P, które opisuje jedynie wzrost pęcherzyka w nieograniczonym obszarze cieczy. Prawa strona równania (4.29) opisuje więc szybkość powstawania pary w analizowanym obszarze (R_e). Gdy $p_b(t) < p_\infty(t)$ następuje zjawisko zapadania się pęcherzyka kawitacyjnego. Wprowadzając pod pierwiastek równania (4.29) $|p_b(t) - p_\infty(t)|$ i traktując prawą stronę (4.29) jako "źródło ujemne" możemy z pewnym przybliżeniem obliczyć prędkość zanikania pęcherzyków kawitacyjnych R_c . Gdy $p_b(t) < p_\infty(t)$ przyjmuje się $p_b = p_{sat}$, natomiast $p_\infty = p$, gdzie p to ciśnienie obliczone dla środka aktualnie analizowanej pojedynczej komórki siatki numerycznej.

Wpływ lokalnych turbulencji

Dla procesu kawitacji nie bez znaczenia jest przyjęty model przepływu. W analizowanym przypadku założono, że przepływ przez szczelinę ma charakter turbulentny (model $k - \varepsilon$). Jak wynika z równania R-P (4.23), ciśnienie w otoczeniu pęcherza kawitacyjnego p_∞ , jest czynnikiem regulującym wzrost i zapadanie się pęcherzyka. Ciśnienie w przepływie turbulentnym p_∞ podlega okresowym, stochastycznym fluktuacjom. Można to zapisać w następujący sposób:

$$p_\infty = \bar{p}_\infty + p'_\infty \quad (4.30)$$

Fluktuacje p'_∞ , mogą być określone na podstawie następującej zależności [34]:

$$p'_\infty = 0.39 \rho k \quad (4.31)$$

W zastosowanym modelu wpływ turbulencji został uwzględniony poprzez zwiększenie progu kawitacji [116]:

$$p_v = (p_{sat} + \frac{p'_\infty}{2}) \quad (4.32)$$

Ostatecznie, równania opisujące generację i zanikanie pary w mieszaninie przyjmują następującą postać [116]:

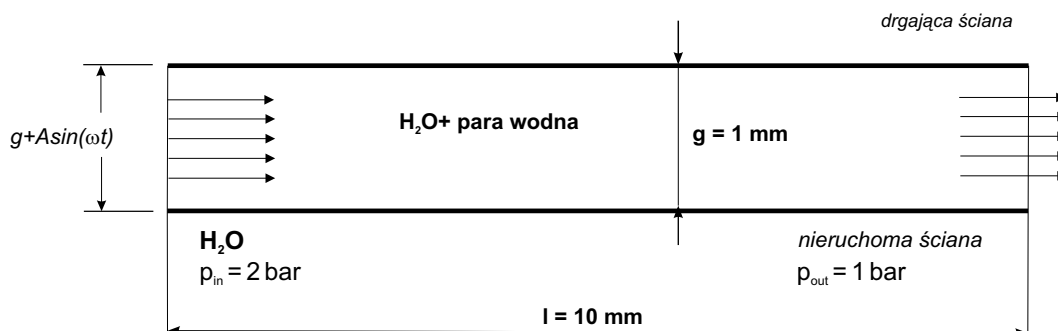
$$R_e = C_e \frac{\sqrt{k}}{\sigma} \rho_e \rho_v \left[\frac{2 p_{sat} - p_\infty}{\rho_e} \right]^{1/2} (1 - f_v - f_g) \quad (4.33)$$

$$R_c = C_c \frac{\sqrt{k}}{\sigma} \rho_e \rho_e \left[\frac{2 p_\infty - p_{sat}}{\rho} \right]^{1/2} f_v \quad (4.34)$$

gdzie: C_e i C_c są stałymi empirycznymi otrzymanymi i sprawdzonymi w wielu przypadkach przepływów z uwzględnieniem kawitacji [116]. Ich wartości wynoszą: $C_e = 0.02$ i $C_c = 0.01$.

4.3.4. Geometria zagadnienia. Generacja siatki

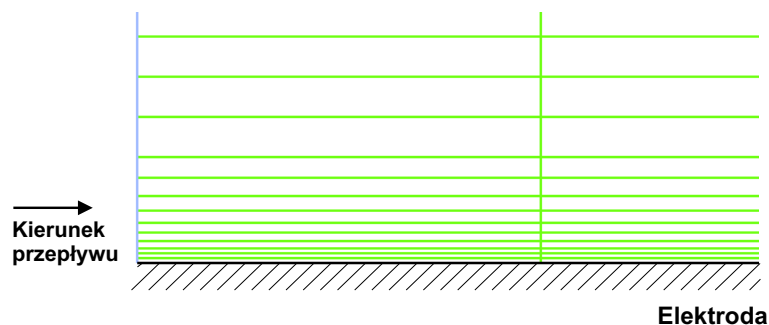
W zaprezentowanym modelu rozważono przepływ mieszaniny (elektrolit, para, gaz) pomiędzy dwoma elektrodami. Jedna z elektrod jest nieruchoma (anoda) natomiast druga porusza się ruchem drgającym z częstotliwością 20 kHz . Przeprowadzono symulacje dla następujących wartości amplitudy drgań: $10 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$ i $2.5 \mu\text{m}$. W trakcie wstępnych symulacji, przy typowych dla ECM grubościach szczelin $g \leq 0.5 \text{ mm}$, nie uzyskiwano zbieżności rozwiązania. W związku z tym przyjęto $g = 1 \text{ mm}$ dla której wszystkie rozwiązania były zbieżne. Schemat przyjętej w zadaniu geometrii, wraz z przyjętymi warunkami brzegowymi przedstawiono na Rys. 4.4.



Rys. 4.4. Schemat przedstawiający geometrię modelowanej szczeliny międzyelektrowej.

Siatka do obliczeń numerycznych została wygenerowana za pomocą programu GAMBIT. Ze względu na specyfikę symulowanych zjawisk należy zwrócić uwagę na dobór właściwego rozmiaru elementów siatki. Powstawaniu i zapadaniu się pęcherzyków kawitacyjnych towarzyszy duży gradient ciśnienia oraz prędkości. W obszarach tych gęstość elementów siatki powinna być jak największa, jednak zawsze jest to pewien kompromis pomiędzy dokładnością i możliwościami obliczeniowymi. Niestety, w literaturze brakuje informacji na których można by się oprzeć przy doborze rozmiaru elementów siatki dla analizowanej szczeliny. Można przypuszczać, że kawitacja może występować w całym obszarze szczeliny. Należy zaznaczyć, że kształt symulowanego obszaru przepływu nie jest skomplikowany co daje pewną swobodę w wyborze gęsto-

ści siatki. W związku z tym zastosowano siatkę strukturalną, o rozmiarze elementów $10 \times 100 \mu m$ ($100 \mu m$ - wymiar zgodny z kierunkiem przepływu - znacznie mniejsze gradienty). Dla warstwy przyściennej, gdzie występują największe gradienty prędkości, zastosowano zmienną wysokość elementów siatki, od $1 \mu m$ do $10 \mu m$ (Rys. 4.5). Tak przygotowana siatka składała się z ≈ 13000 komórek, i ≈ 13000 węzłów.



Rys. 4.5. Fragment siatki przedstawiający rozmieszczenie elementów w warstwie przyściennej.

Zmianę położenia drgającej elektrody roboczej zrealizowano, korzystając z metody dynamicznego tworzenia kolejnych warstw siatki (*Dynamic Layering Method*) [1]. Rozmiar tych warstw, położonych przy powierzchni drgającej elektrody, wynosił $1 \mu m$. Kroki czasowe w jakich dokonywano obliczeń to $0.2 \mu s$ i $0.5 \mu s$.

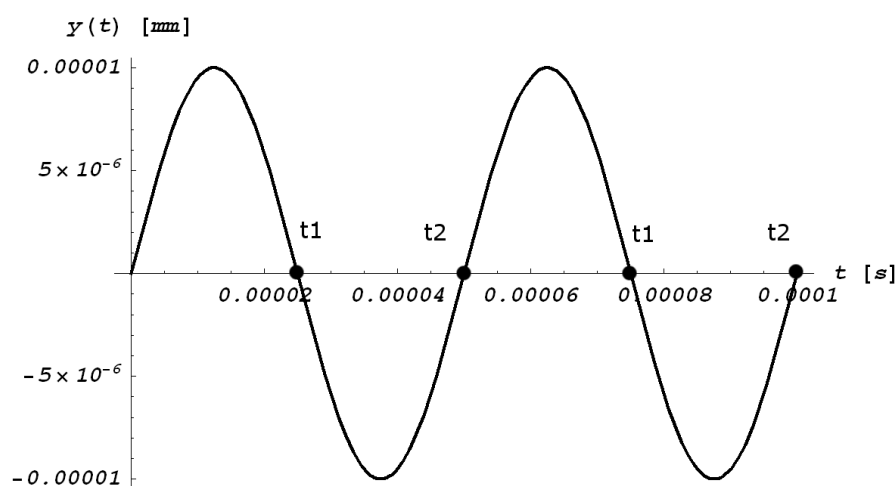
4.4. Wyniki symulacji

Otrzymane wyniki zostały przeanalizowane głównie pod kątem zmian ciśnienia, prędkości i zawartości fazy lotnej α_v . Z otrzymanych danych wynika, że przepływ w szczelinie ma charakter periodyczny o okresie zgodnym z okresem drgań ultradźwiękowych T . Dokładna analiza otrzymanych rozkładów ciśnienia i ich zmian w czasie pokazuje, że w ramach jednego okresu $T = 50 \mu s$ istnieją dwie charakterystyczne chwile $t_1 \approx [(2n + 1) \cdot 25] \mu s$ i $t_2 \approx n \cdot 50 \mu s$. W chwilach t_1 i t_2 grubość szczeliny międzyelektrodowej jest taka sama (Rys. 4.6).

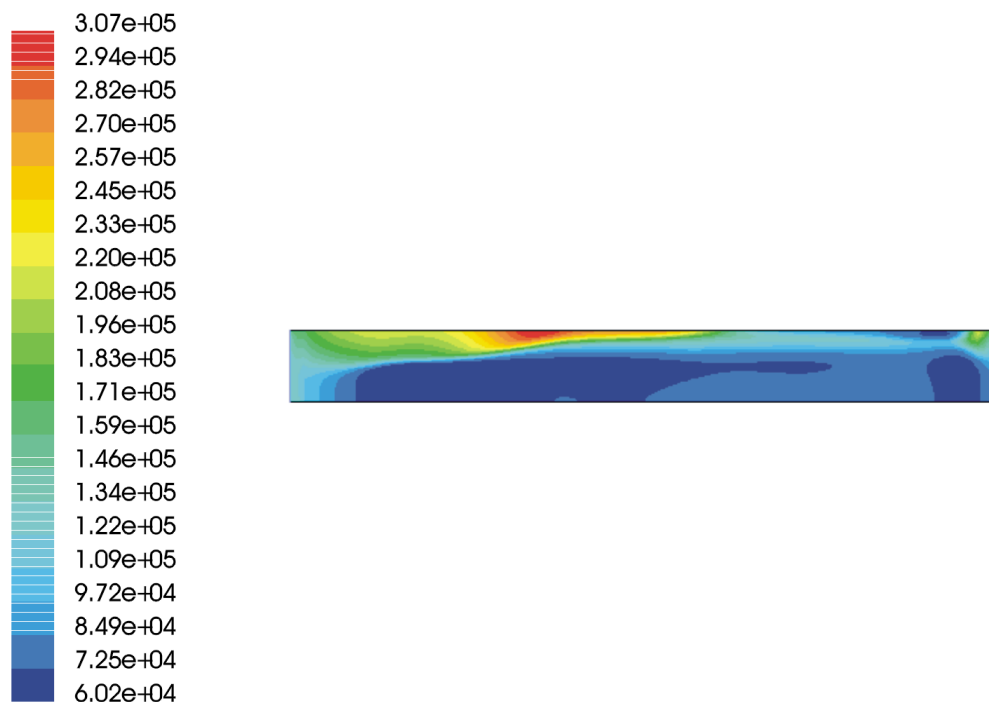
Dla każdej z analizowanych amplitud zmiany warunków w szczelinie międzyelektrodowej przebiegają w bardzo podobny sposób. Na podstawie konturów ciśnienia można stwierdzić, że ultradźwięki wprowadzają poprzeczny do kierunku przepływu, zmienny w czasie gradient ciśnienia. W chwili t_1 , kiedy elektroda porusza się w kierunku przedmiotu obrabianego, ciśnienie w warstwie przykatodowej jest największe, natomiast w warstwie przyanodowej najmniejsze. W chwili t_1 obszar przyanodowy jest miejscem, gdzie powstają korzystne warunki powstawania pęcherzyków kawita-

cyjnych. Grubość warstwy oraz ilość pęcherzyków kawitacyjnych zależy od amplitudy drgań elektrody roboczej. W kolejnej fazie ruchu ER fala ciśnienia poruszająca się w kierunku PO powoduje, że ciśnienie w warstwie przyanodowej rośnie, a powstałe chwilę wcześniej pęcherzyki gwałtownie się zapadają. W chwili t_2 , kiedy ER porusza się w kierunku przeciwnym, w obszarze przykatodowym powstają korzystne warunki do powstawania pęcherzyków kawitacyjnych. Opisane zjawiska powtarzają się w czasie, zgodnie z okresem drgań ultradźwiękowych $T = 50 \mu s$.

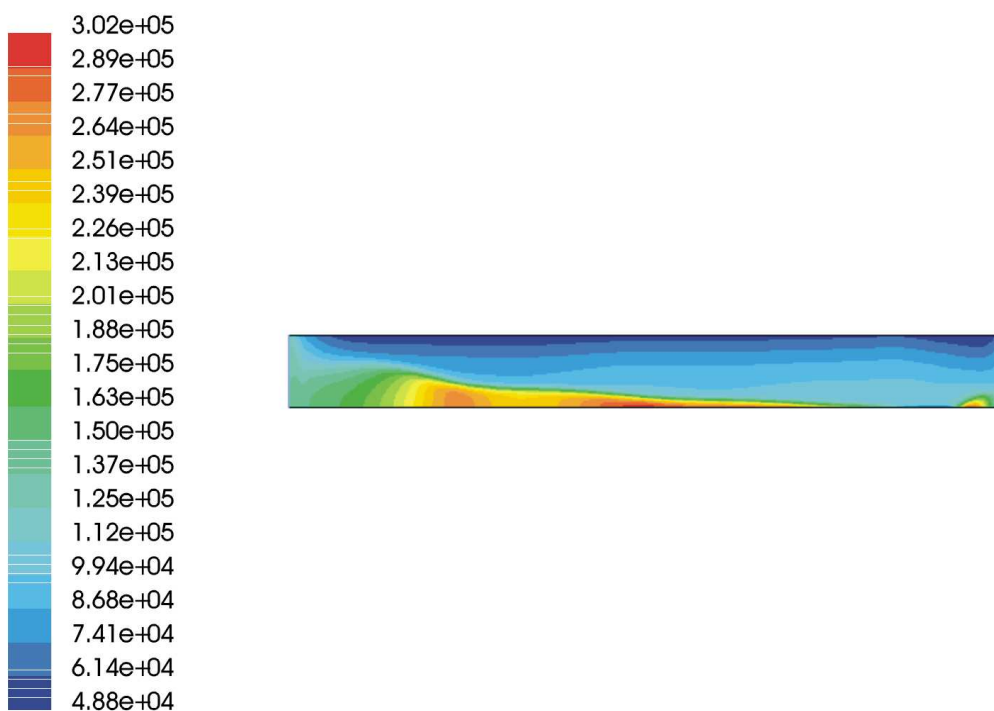
Rozkłady ciśnienia dla analizowanych amplitud w chwilach t_1 oraz t_2 przedstawiono na Rys. 4.7, 4.8, 4.11, 4.12, 4.15 i 4.16, natomiast na Rys. 4.9, 4.10, 4.13, 4.14, 4.17, i 4.18 przedstawiono rozkłady objętościowego udziału fazy gazowej, odpowiadające analizowanym chwilom t_1 i t_2 . Z zależności tych widać, że w momencie kiedy ER porusza się w kierunku PO ($t = t_1$), w obszarze przyległym do PO ciśnienie jest niższe niż $p_{in} = 2 \text{ bar}$. Do obszaru tego napływa świeży elektrolit, powodując wyrównanie warunków roztwarzania. W kolejnej fazie ruchu ER ($t = t_2$), fala ciśnienia przemieszcza się w kierunku PO natomiast ciśnienie w obszarze przykatodowym jest mniejsze od $p < p_{in}$. W szczelinie występuje efekt *zasysania* elektrolitu do strefy obróbki. Należy zauważyć, że w szczelinie międzyelektrodowej istnieją obszary, gdzie ciśnienie spada poniżej ciśnienia p_{out} , co w warunkach obróbki ECM może oznaczać, że nie tylko czysty elektrolit zassany jest do szczeliny. Może występować efekt cofnięcia zanieczyszczonego elektrolitu, który chwilę wcześniej przepływał przez rozpatrywany odcinek.



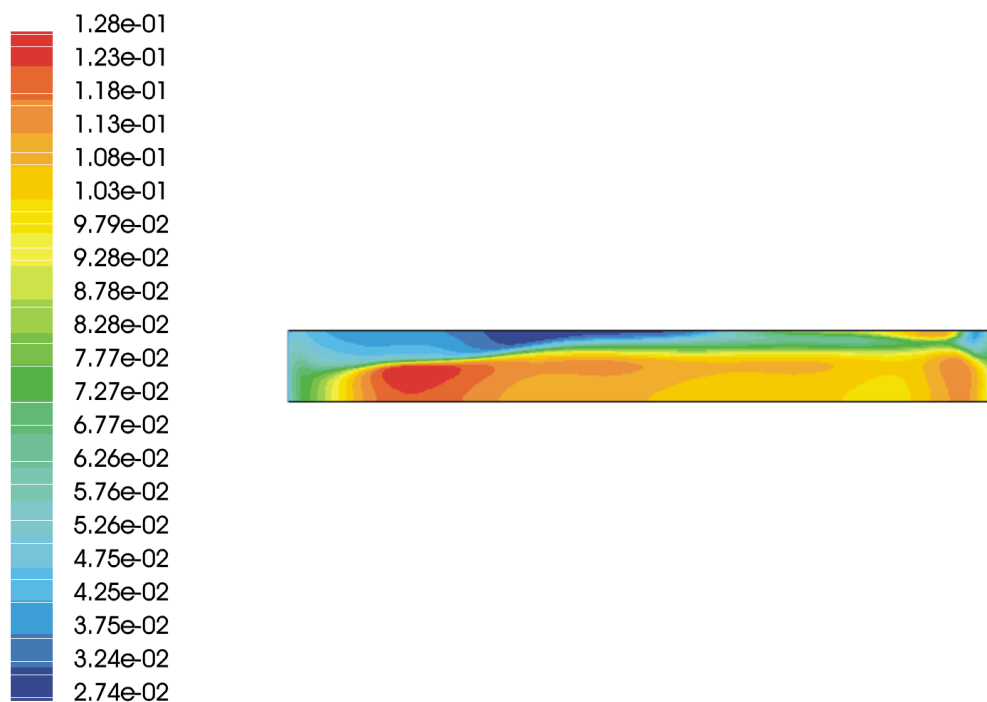
Rys. 4.6. Punkty $t_1 \approx (2n + 1) \cdot 25 \mu s$ i $t_2 \approx n \cdot 50 \mu s$ dla których przedstawiono otrzymane wyniki.



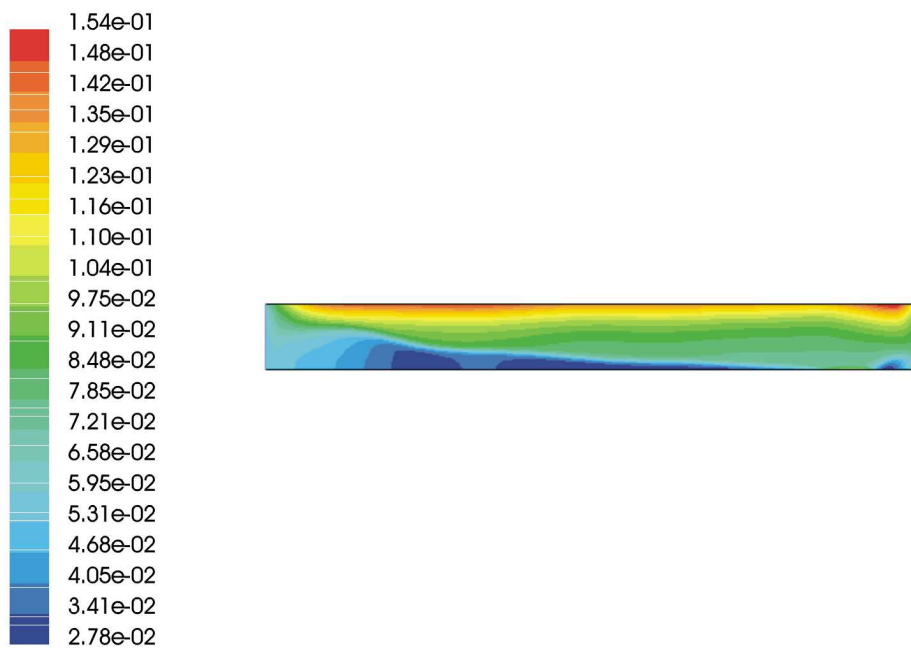
Rys. 4.7. Rozkład ciśnienia w szczelinie w chwili t_1 , $A = 10 \mu\text{m}$.



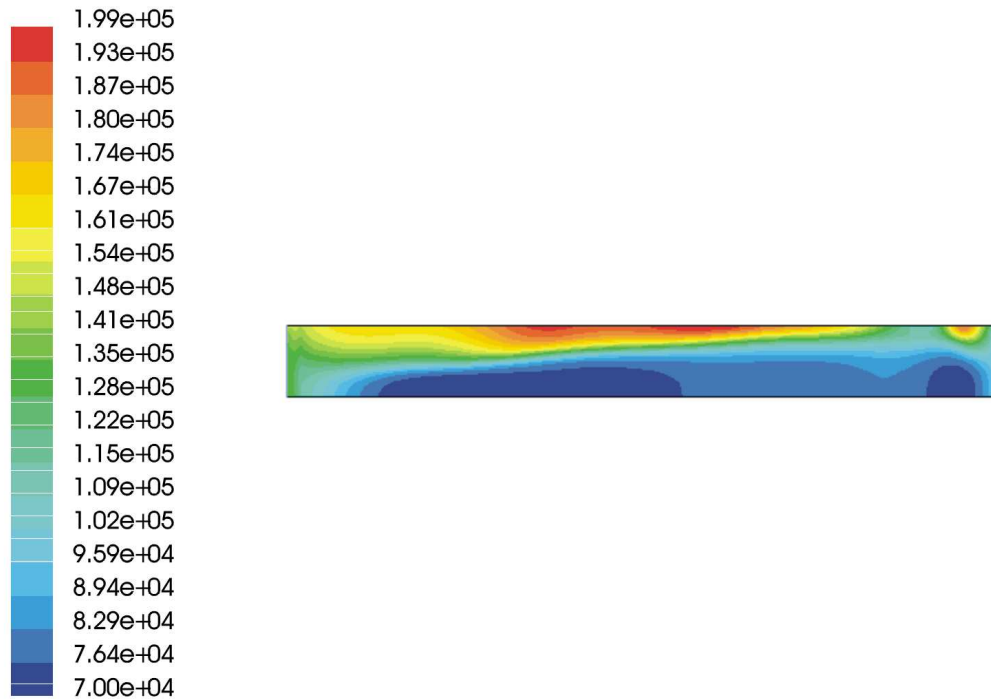
Rys. 4.8. Rozkład ciśnienia w szczelinie w chwili t_2 , $A = 10 \mu\text{m}$.



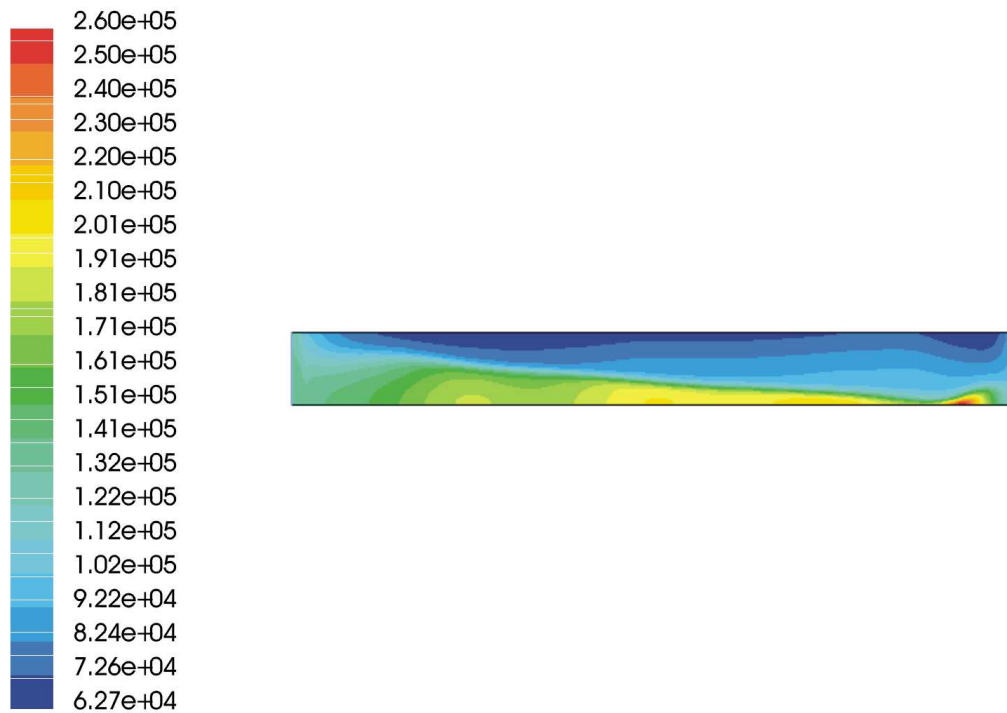
Rys. 4.9. Rozkład udziału objętościowego pary wodnej α_v w szczelinie w chwili t_1 , $A = 10 \mu m$.



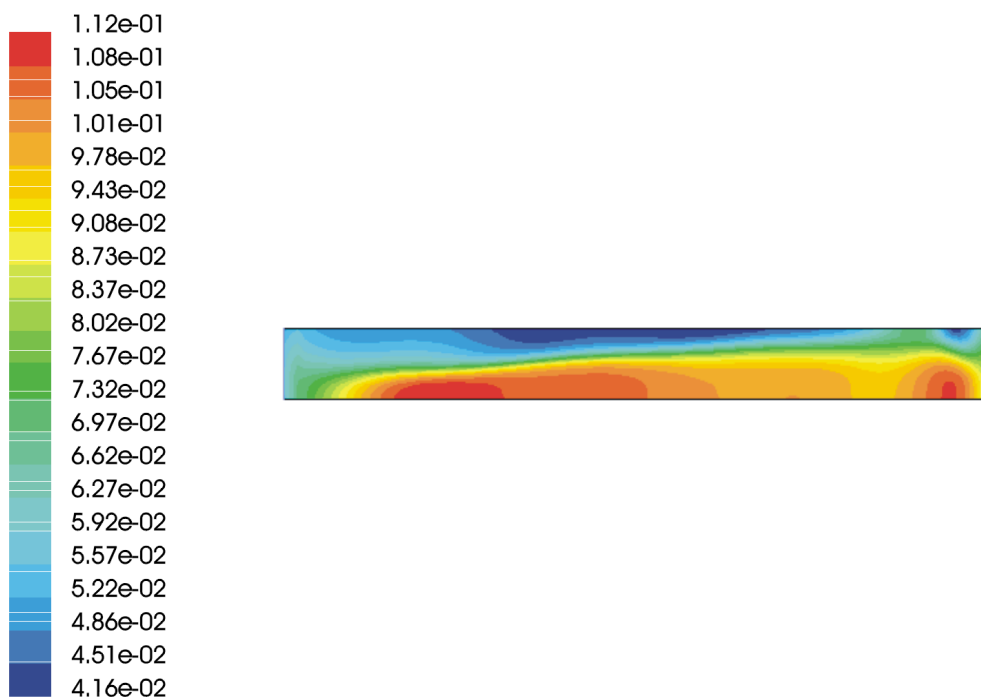
Rys. 4.10. Rozkład udziału objętościowego pary wodnej α_v w szczelinie w chwili t_2 , $A = 10 \mu m$.



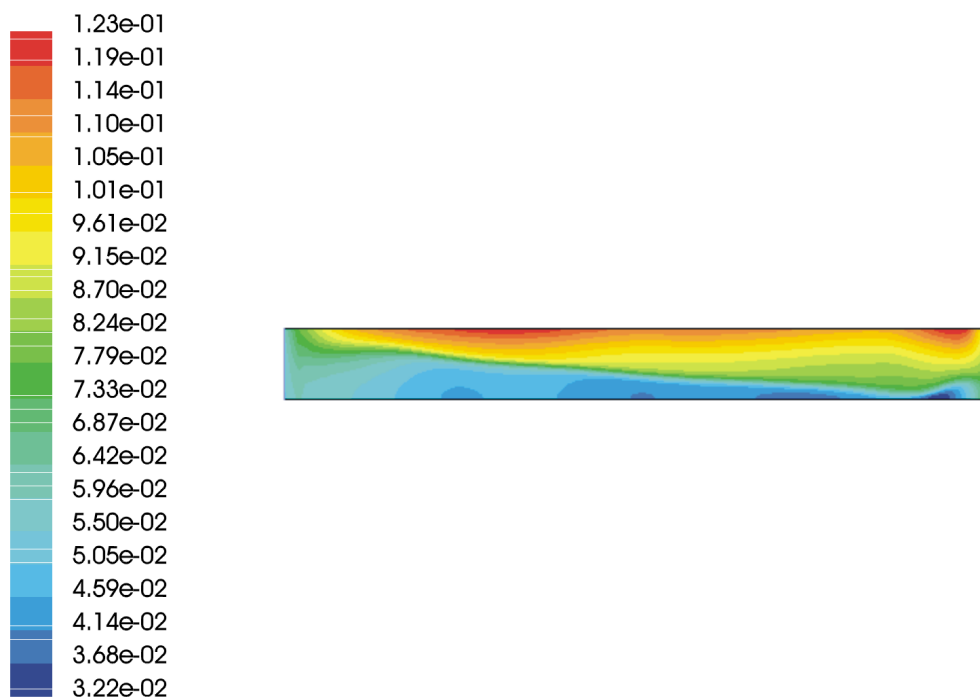
Rys. 4.11. Rozkład ciśnienia w szczelinie w chwili t_1 , $A = 5 \mu\text{m}$.



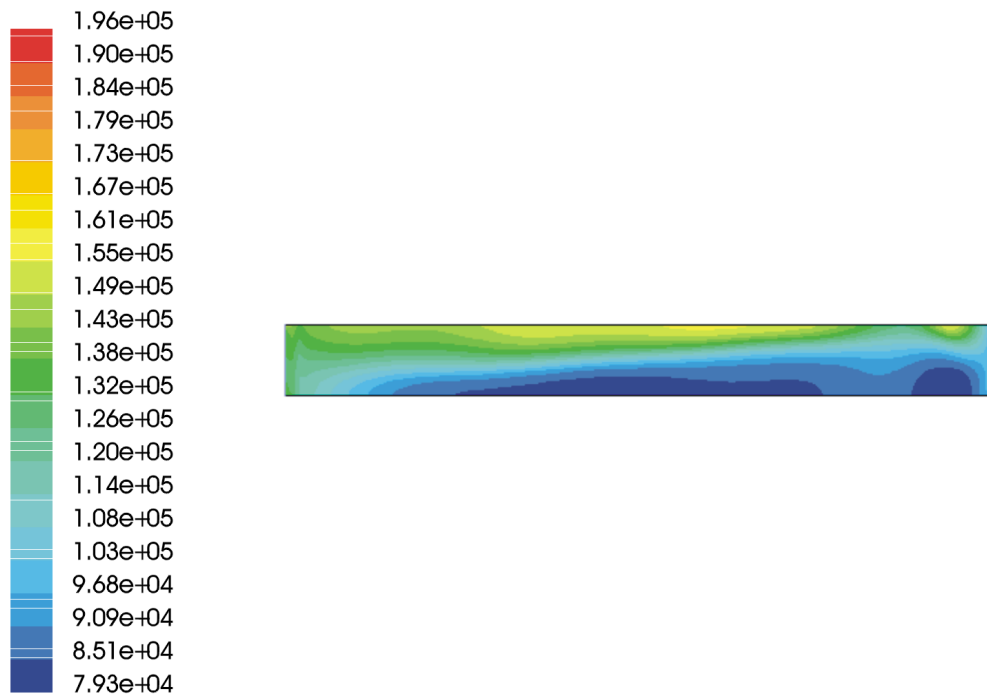
Rys. 4.12. Rozkład ciśnienia w szczelinie w chwili t_2 , $A = 5 \mu\text{m}$.



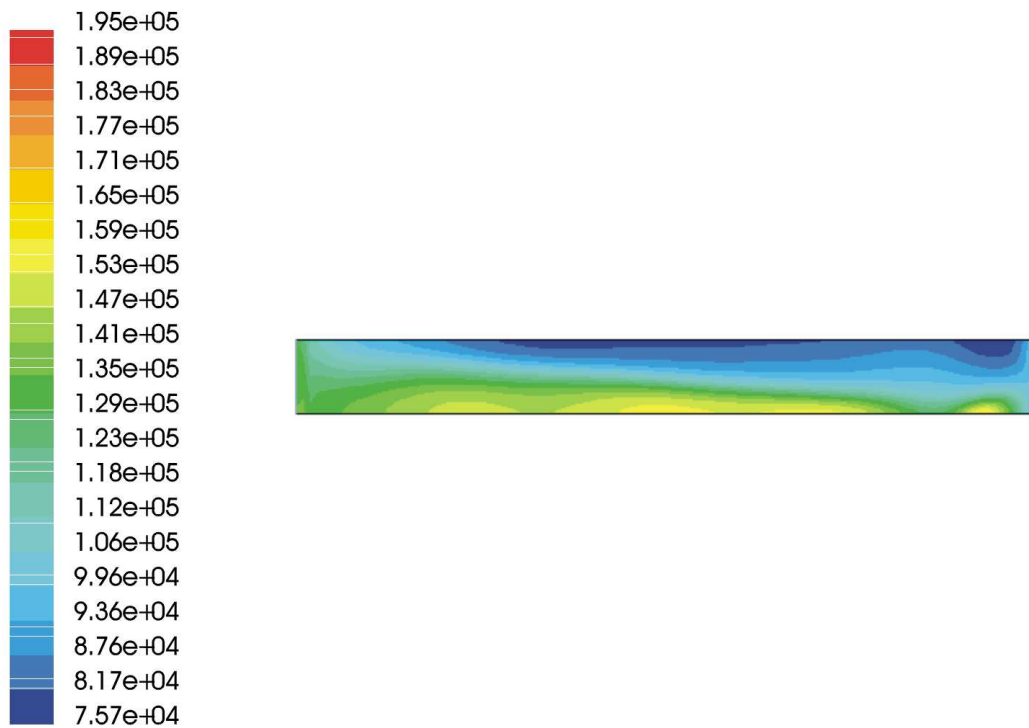
Rys. 4.13. Rozkład udziału objętościowego pary wodnej α_v w szczelinie w chwili t_1 , $A = 5 \mu m$.



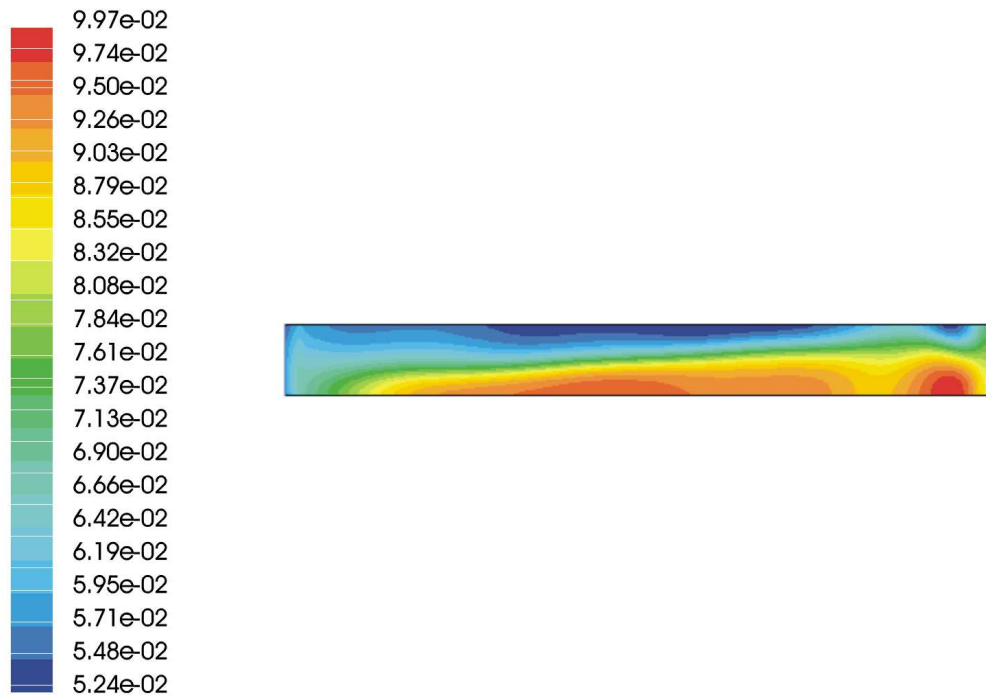
Rys. 4.14. Rozkład udziału objętościowego pary wodnej α_v w szczelinie w chwili t_2 , $A = 5 \mu m$.



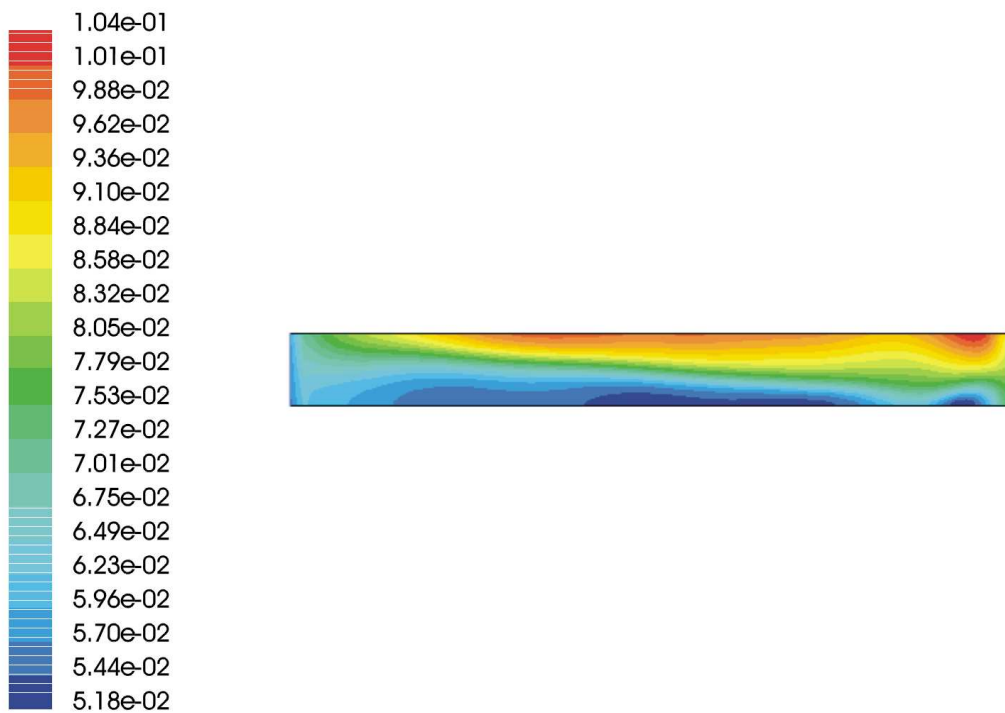
Rys. 4.15. Rozkład ciśnienia w szczelinie w chwili t_1 , $A = 2.5 \mu m$.



Rys. 4.16. Rozkład ciśnienia w szczelinie w chwili t_2 , $A = 2.5 \mu m$.



Rys. 4.17. Rozkład udziału objętościowego pary wodnej α_v w szczelinie w chwili t_1 ,
 $A = 2.5 \mu\text{m}$.

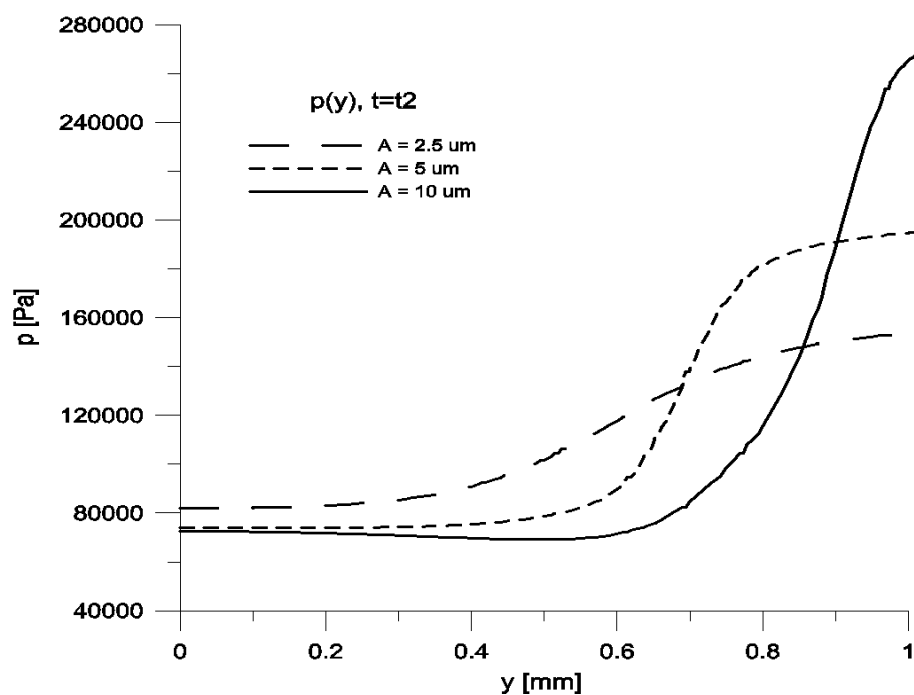


Rys. 4.18. Rozkład udziału objętościowego pary wodnej α_v w szczelinie w chwili t_2 ,
 $A = 2.5 \mu\text{m}$.

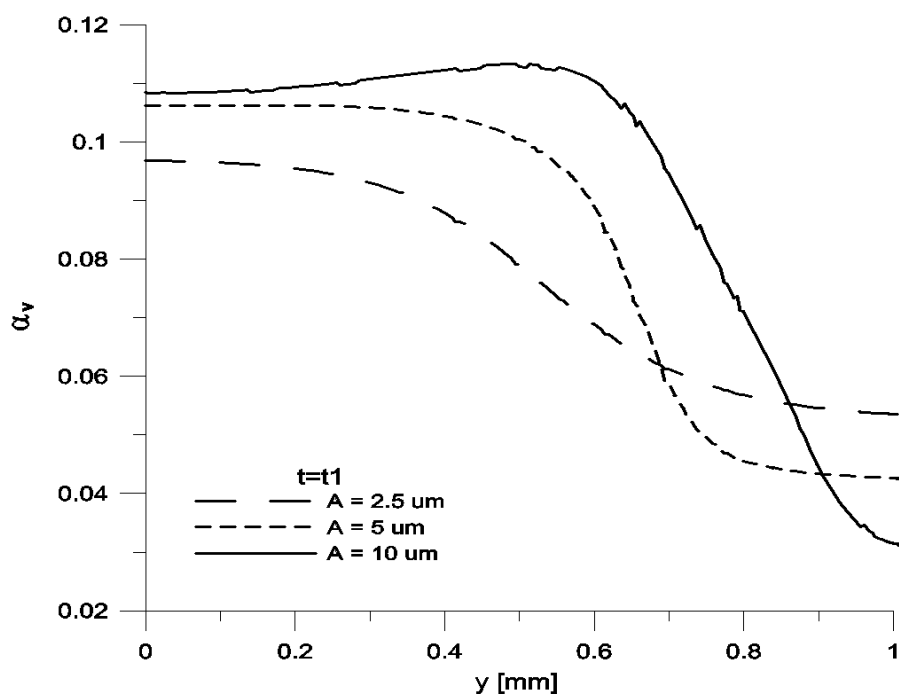
Na Rys. 4.19, 4.20, 4.21 i 4.22 przedstawiono porównanie rozkładów ciśnienia oraz udziału objętościowego fazy gazowej wzdłuż grubości szczeliny dla trzech badanych amplitud w analizowanych fazach ruchu ER. Na podstawie tych zależności można wysunąć następujące wnioski:

- dla $t = t_1$ wartość maksymalnego ciśnienia p_{max} w szczelinie międzyelektrodowej zależy od amplitudy drgań ER i jest największa dla $A = 10 \mu m$. Największy spadek ciśnienia w szczelinie jest dla $A = 10 \mu m$. Istotne jest, że dla $A = 10 \mu m$, wartość najmniejszego ciśnienia przypada dla $y = 0.6 mm$. W tym obszarze powstaje również najwięcej pęcherzyków kawitacyjnych ($\alpha_v \approx 0.15$). Przedstawione zależności potwierdzają również przypuszczenia związane z powstawaniem i zapadaniem się pęcherzyków na granicy faz. Dla wszystkich analizowanych amplitud, ciśnienie oraz zawartość objętościowa pary przy powierzchni anody mają zbliżoną wartość ($p = 0.8 bar$, $\alpha_v \approx 0.1$). Z przedstawionych wykresów widać również, że rozkład ilości pęcherzyków kawitacyjnych wzdłuż grubości szczeliny jest nierównomierny. Dla $A = 5 \mu m$ i $A = 2.5 \mu m$ największa intensywność zjawisk kawitacyjnych występuje w pobliżu anody.
- dla $t = t_2$ wartości maksymalnego ciśnienia p_{max} w szczelinie międzyelektrodowej zależy od amplitudy drgań ER i jest największa dla $A = 10 \mu m$. Warto zaznaczyć, że dla każdej z amplitud $p_{max}(t_2) > p_{max}(t_1)$. Najmniejsza wartość ciśnienia jest w pobliżu katody, i w niewielkim stopniu zależy od amplitudy drgań. Również w pobliżu katody występuje największa intensywność zjawisk kawitacyjnych.

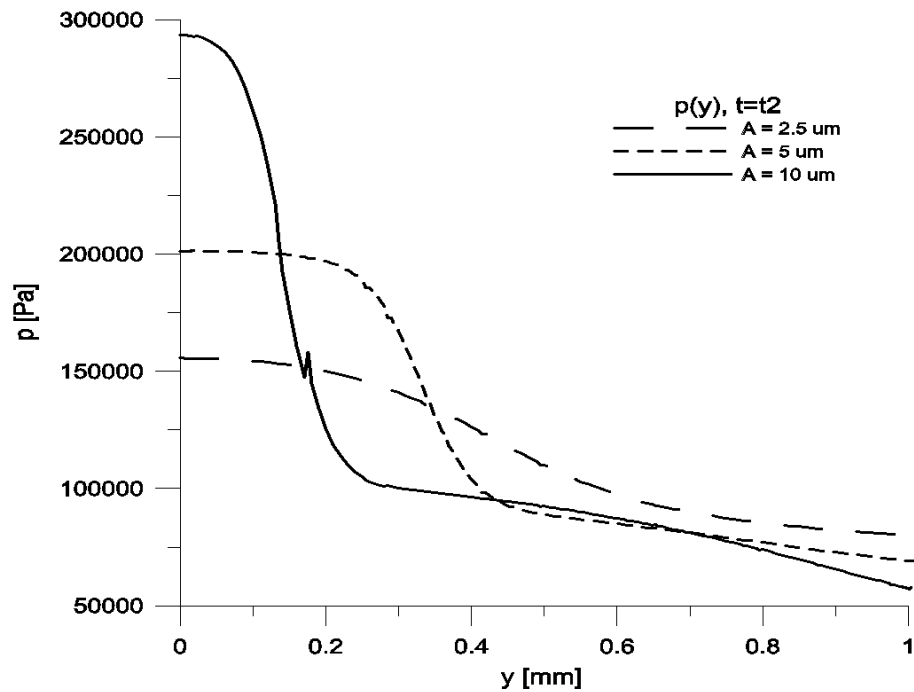
Z przedstawionych zależności widać, że gradient ciśnienia w kierunku poprzecznym do przepływu elektrolitu oraz intensywność zjawisk kawitacyjnych są zależne od amplitudy drgań ultradźwiękowych. Największa intensywność zjawisk kawitacyjnych występuje dla $A = 10 \mu m$. Również grubość warstwy elektrolitu, w której intensywność kawitacji jest największa zależy od A (od $0.25 mm$ dla $A = 2.5 \mu m$ do $0.7 mm$ dla $A = 10 \mu m$). Wraz ze zwiększeniem amplitudy drgań elektrody roboczej wzrasta udział zjawisk kawitacyjnych wewnątrz szczeliny międzyelektrodowej (kawitacja homogeniczna). Powoduje to znaczne straty energii przepływającego elektrolitu oraz utrudnia dyfuzję jonów anody w głąb szczeliny międzyelektrodowej. W przedstawionym modelu założono równomierny rozkład rozpuszczonego w elektrolicie gazu oraz pominięto zawartość produktów roztwarzania. W rzeczywistości, koncentracja produktów roztwarzania zmienia się wraz z grubością szczeliny międzyelektrodowej. W pobliżu katody zwiększona jest koncentracja objętościowa wodoru (β) oraz temperatura elektrolitu, co powoduje, że zjawiska kawitacji w tym obszarze zachodzą intensywniej, niż to pokazały wyniki obliczeń.



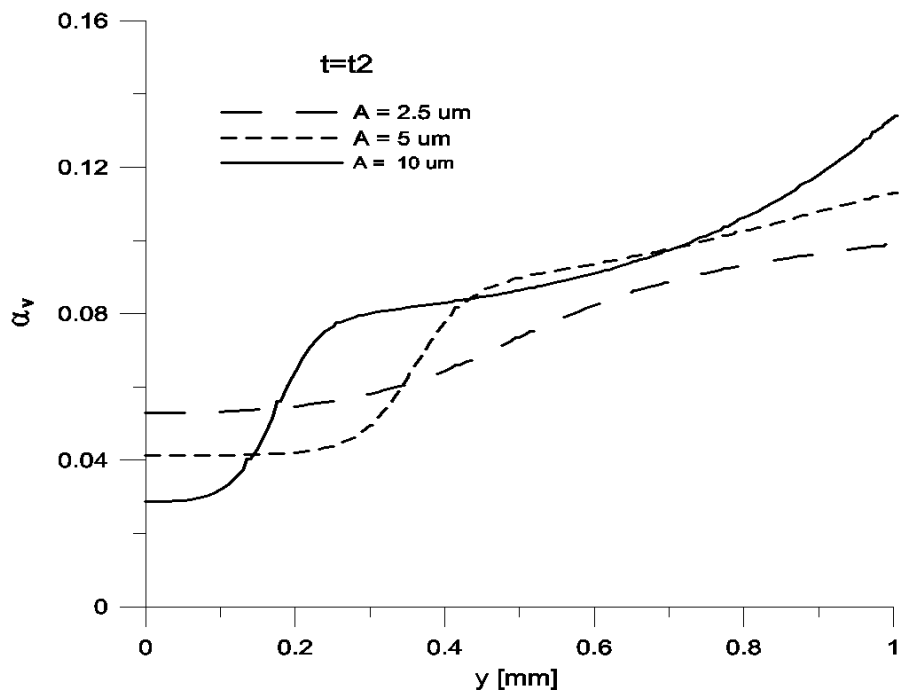
Rys. 4.19. Porównanie rozkładu ciśnienia wzdłuż grubości szczeliny dla $A = 2.5 \mu\text{m}$, $A = 5 \mu\text{m}$ i $A = 10 \mu\text{m}$, $t = t_1$, 0 mm - PO, 1 mm - ER.



Rys. 4.20. Porównanie rozkładu udziału objętościowego pary α_v wzdłuż grubości szczeliny dla $A = 2.5 \mu\text{m}$, $A = 5 \mu\text{m}$ i $A = 10 \mu\text{m}$, $t = t_1$, 0 mm - PO, 1 mm - ER.



Rys. 4.21. Porównanie rozkładu ciśnienia wzdłuż grubości szczeliny dla $A = 2.5 \mu\text{m}$, $A = 5 \mu\text{m}$ i $A = 10 \mu\text{m}$, $t = t_2$, 0 mm - PO, 1 mm - ER.



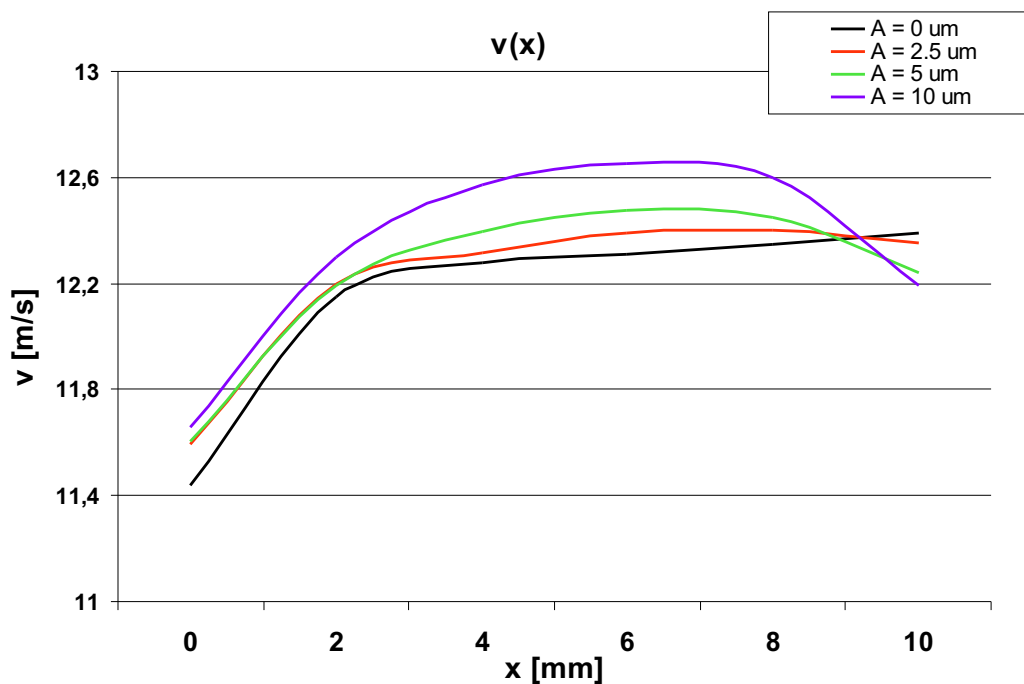
Rys. 4.22. Porównanie rozkładu udziału objętościowego pary α_v wzdłuż grubości szczeliny dla $A = 2.5 \mu\text{m}$, $A = 5 \mu\text{m}$ i $A = 10 \mu\text{m}$, $t = t_2$, 0 mm - PO, 1 mm - ER.

W dalszym etapie analizy przedstawiono zmiany prędkości średniej mieszaniny $v(x)$, średniego ciśnienia $p(x)$ oraz średniej zawartości fazy lotnej $\alpha_v(x)$ wraz z długością szczeliny międzyelektrodowej. Wartości $p(x)$ oraz $\alpha_v(x)$ zostały uśrednione wzdłuż grubości szczeliny. Na podstawie tych zależności (Rys. 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28) można sformułować następujące wnioski:

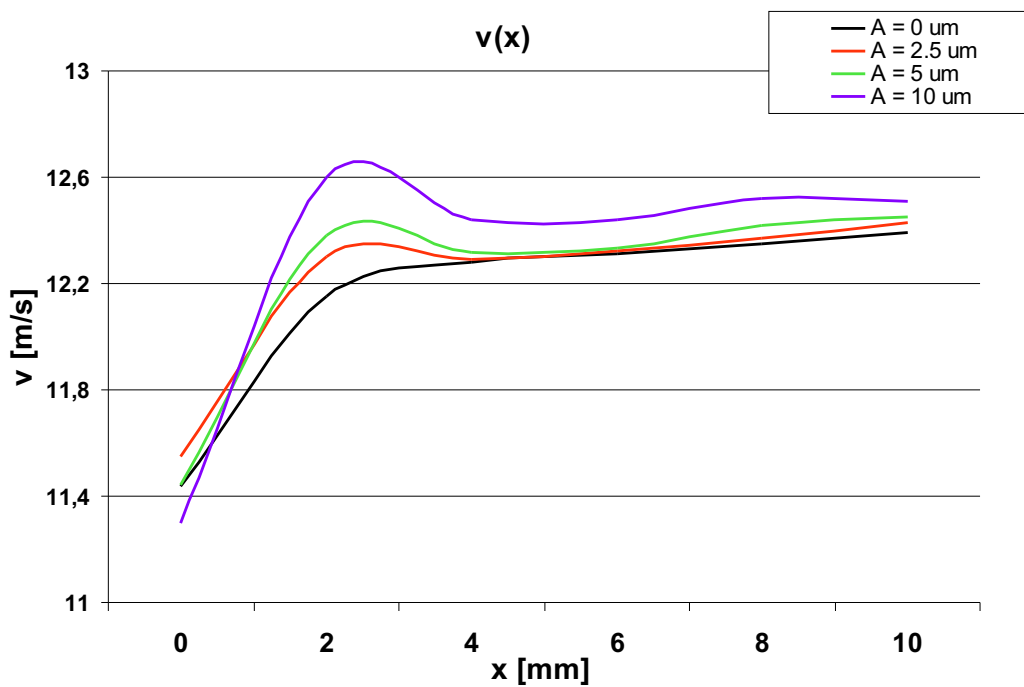
- prędkość średnia elektrolitu rośnie wraz z długością szczeliny, a jej chwilowe wartości zależą od położenia i kierunku ruchu ER. Średnia prędkość elektrolitu zależy również od amplitudy drgań ultradźwiękowych. Dla $A = 10 \mu m$, w chwili $t = t_1$ prędkość średnia jest o $\sim 0.5 m/s$ większa niż prędkość dla przepływu bez drgań ultradźwiękowych (Rys. 4.23). Gdy elektroda porusza się w kierunku przeciwnym ($t = t_2$) różnice te stają się coraz mniejsze (Rys. 4.24);
- w chwili $t = t_2$, kiedy ER porusza się w kierunku od powierzchni PO dla każdej z analizowanych amplitud następuje lokalny wzrost prędkości elektrolitu (dla $x \approx 3 mm$). Ma to bezpośredni związek z lokalnym spadkiem ciśnienia (Rys. 4.26) i świadczy o zasysaniu czystego elektrolitu do szczeliny międzyelektrodowej,
- zależności $p(x)$ (Rys. 4.25, 4.26) pokazują, że wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej powstają pulsacje ciśnienia (najbardziej zauważalne dla $A = 10 \mu m$);
- podobnie jak prędkość, wartość chwilowa średniego ciśnienia zależy od położenia i kierunku elektrody;
- średni udział fazy pary elektrolitu α_v rośnie wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej i zależy od amplitudy drgań ultradźwiękowych (Rys. 4.27, 4.28).

Należy zaznaczyć, że w aspekcie roztwarzania elektrochemicznego, o wiele większe znaczenie od wartości średnich mają rozkłady p i α_v wzdłuż grubości szczeliny międzyelektrodowej oraz lokalizacja zjawiska kawitacji w pobliżu ER i PO.

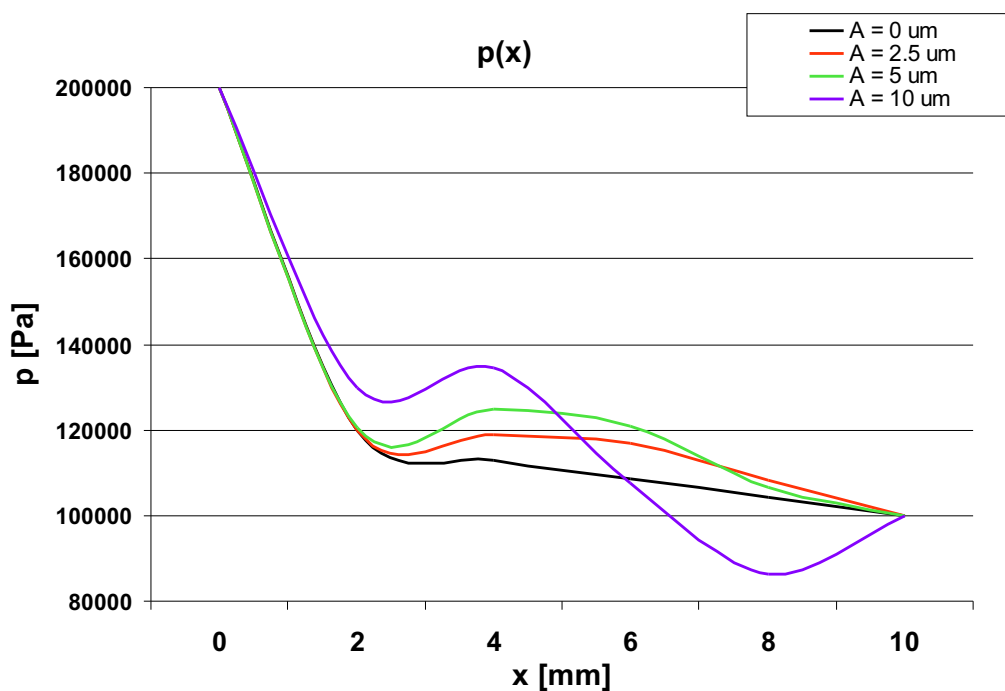
Przeanalizowano również profile prędkości dla przepływającego przez szczelinę międzyelektrodową elektrolitu. Z przedstawionego na Rys. 4.29 i 4.30 porównania profili prędkości dla $A = 0 \mu m$ i $A = 10 \mu m$ (przekrój dla $x = 5 mm$) wynika, że w zależności od kierunku ruchu ER następuje niewielkie zwiększenie prędkości przepływu elektrolitu w obszarze przykatodowym (Rys. 4.29) lub przyanodowym (Rys. 4.30). Zwiększenie prędkości w obszarach przyelektrodowych może mieć korzystny wpływ na procesy dyfuzyjne zachodzące na granicy faz. Dla amplitudy $A = 5 \mu m$ i $A = 2.5 \mu m$, różnice w kształcie profili prędkości są praktycznie niezauważalne, dlatego też przeanalizowano różnice w wartościach składowej prędkości v_y - składowej poprzecznej do kierunku ruchu ER. Dla przepływu pomiędzy dwoma nieruchomymi elektrodami $v_{ymax} = \pm 0.48 m/s$. Analizując rozkład $v_y(y)$ dla przepływu z drganiami elektrody widać, że dla $A = 2.5 \mu m$ oraz $A = 5 \mu m$ maksymalne wartości składowej v_y są większe niż w przypadku przepływu bez drgań



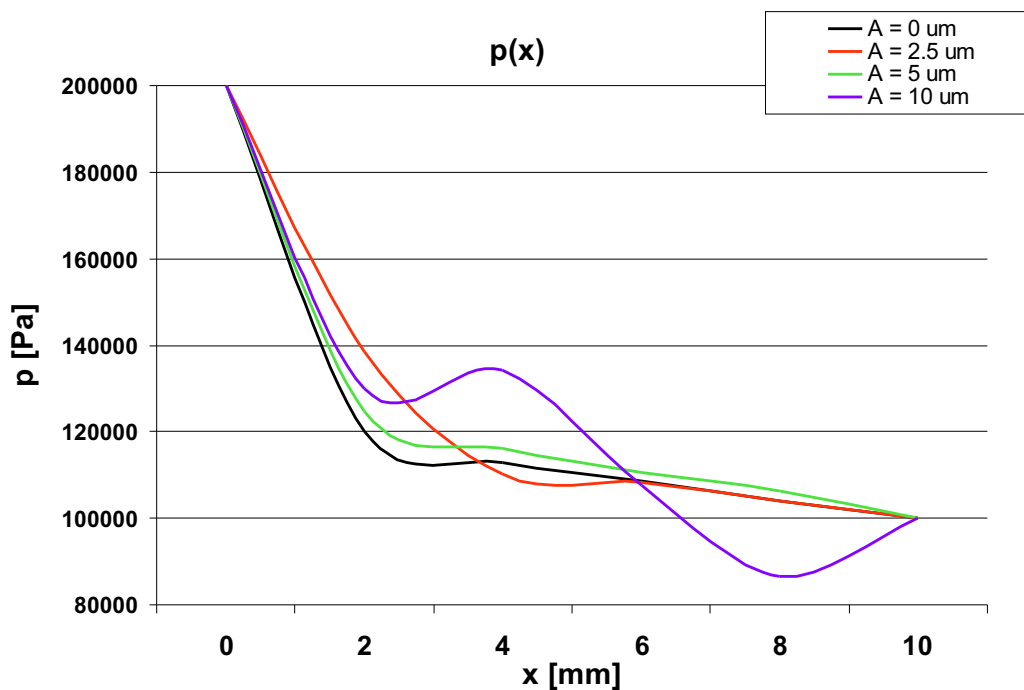
Rys. 4.23. Zmiany prędkości średniej elektrolitu wraz z długością szczeliny międzyelektrodowej, $t = t_1$.



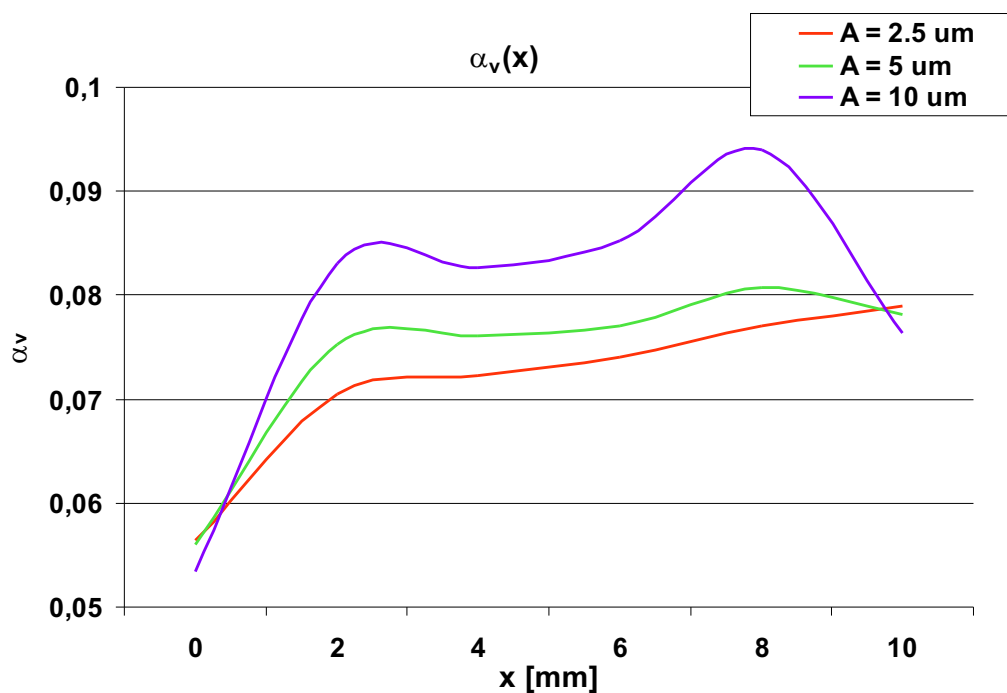
Rys. 4.24. Zmiany prędkości średniej elektrolitu wraz z długością szczeliny międzyelektrodowej, $t = t_2$.



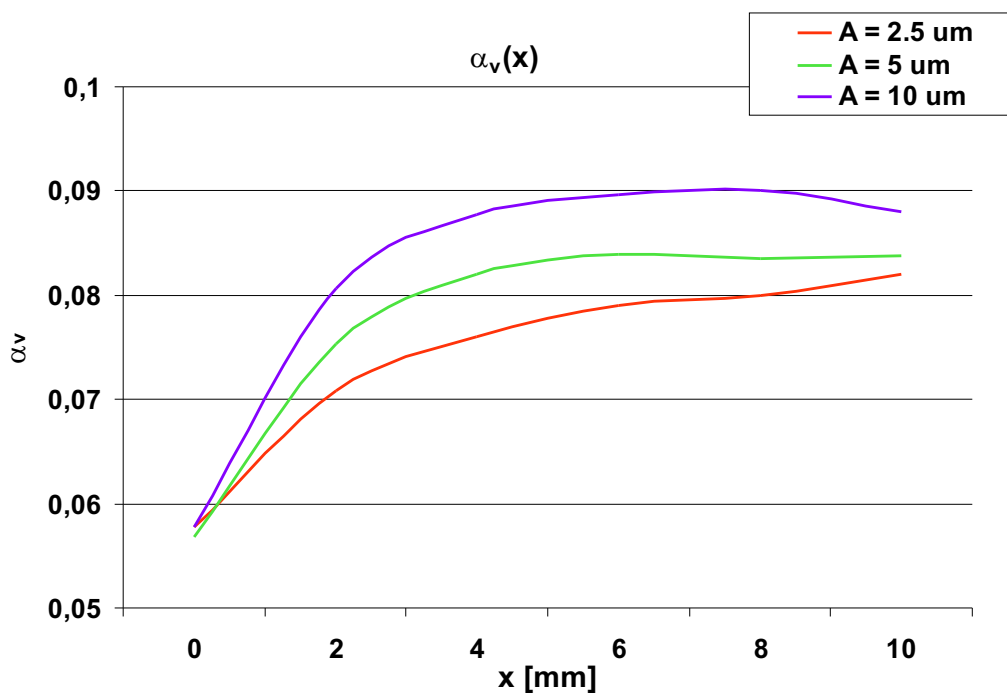
Rys. 4.25. Zależność uśrednionego wzdłuż grubości szczeliny ciśnienia elektrolitu od x , $t = t_1$.



Rys. 4.26. Zależność uśrednionego wzdłuż grubości szczeliny ciśnienia elektrolitu od x , $t = t_2$.

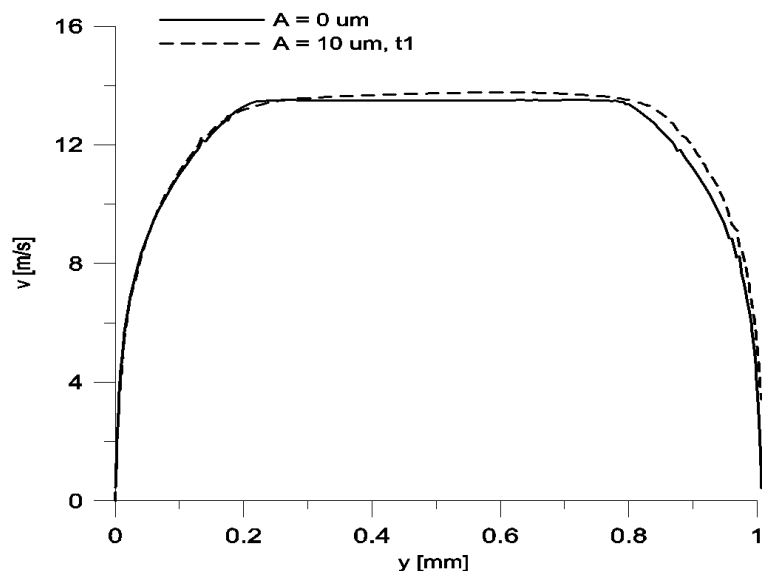


Rys. 4.27. Zmiany średniej zawartości pary α_v wzdłuż długości szczeliny międzyelektrodowej, $t = t_1$.

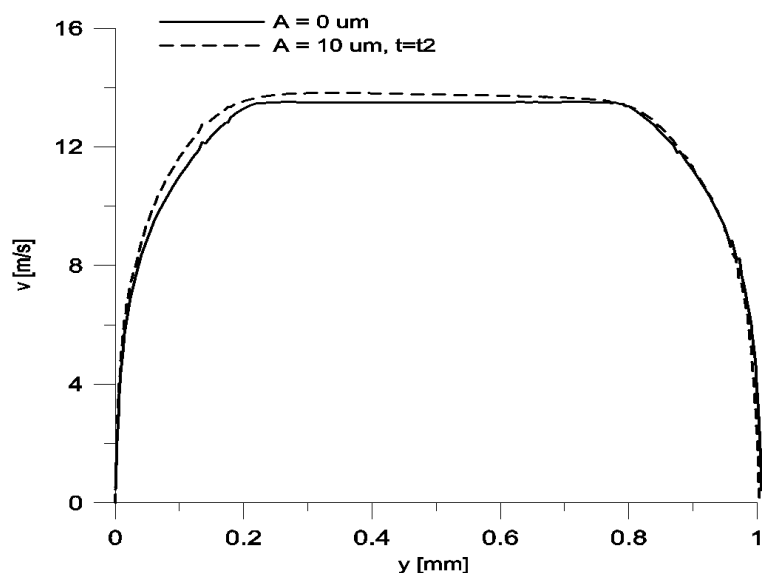


Rys. 4.28. Zmiany średniej zawartości pary α_v wzdłuż długości szczeliny międzyelektrodowej, $t = t_2$.

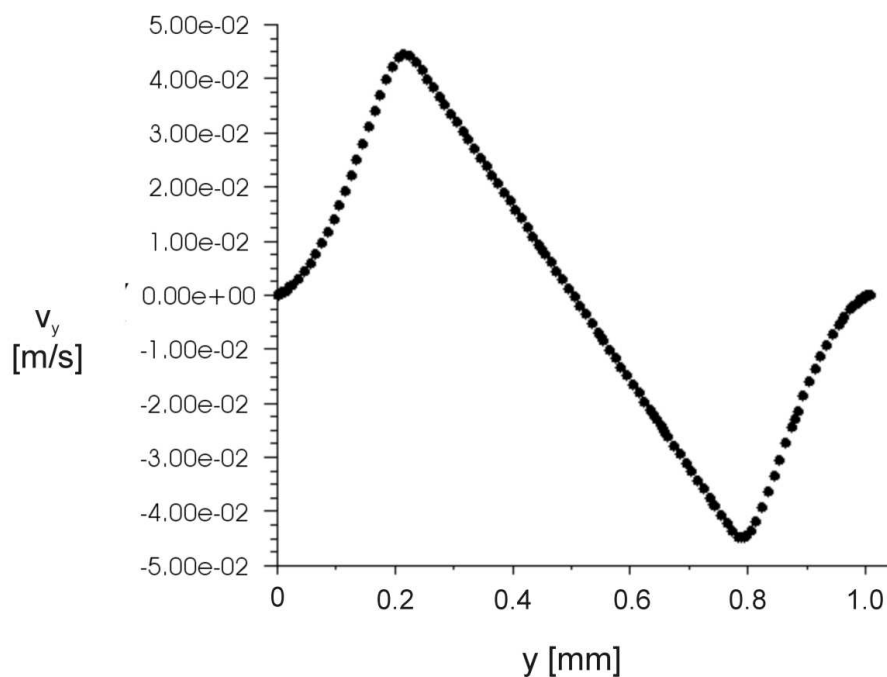
ER. Przedstawione na Rys. 4.31 i 4.32 rozkłady składowej v_y wektora prędkości dla $t = t_1$ wskazują na istnienie tendencji do kierowania strugi cieczy w kierunku od powierzchni PO i ER. Z przedstawionych wykresów wynika, że w obszarze przykatodowym prędkość elektrolitu jest różna od 0, co świadczy, że następuje ciągła wymiana elektrolitu.



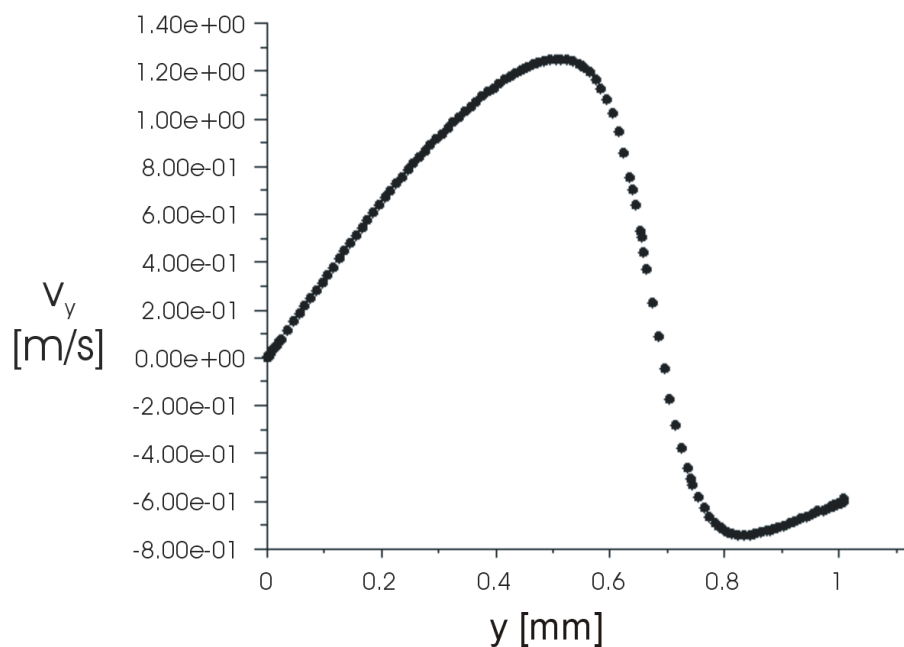
Rys. 4.29. Porównanie profili prędkości dla przepływu bez drgań ER ($A = 0 \mu\text{m}$) i dla przepływu z drganiami ER ($A = 10 \mu\text{m}$), $t = t_1$, 0 mm - PO, 1 mm - ER.



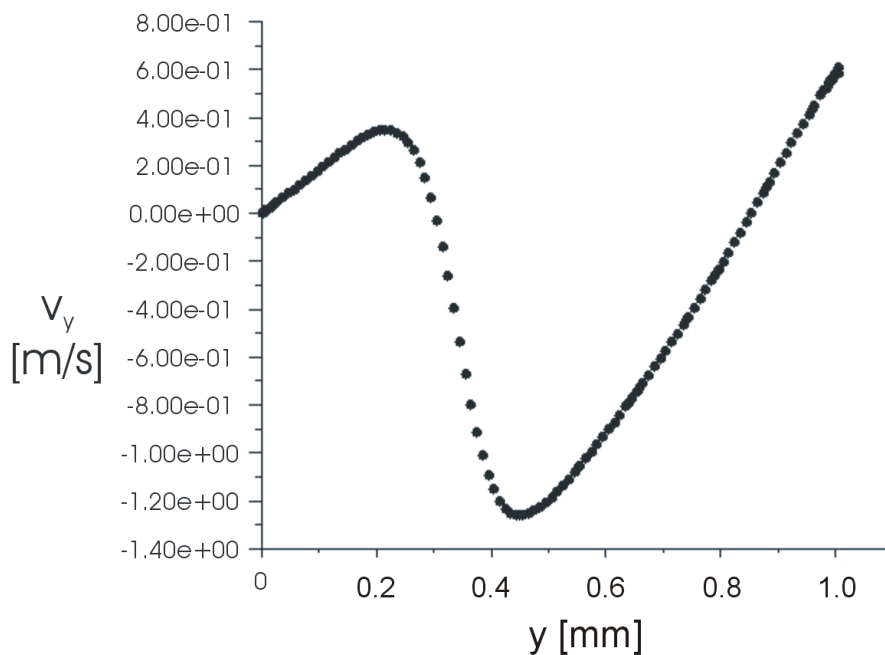
Rys. 4.30. Porównanie profili prędkości dla przepływu bez drgań ER ($A = 0 \mu\text{m}$) i dla przepływu z drganiami ER ($A = 10 \mu\text{m}$), $t = t_2$, 0 mm - PO, 1 mm - ER.



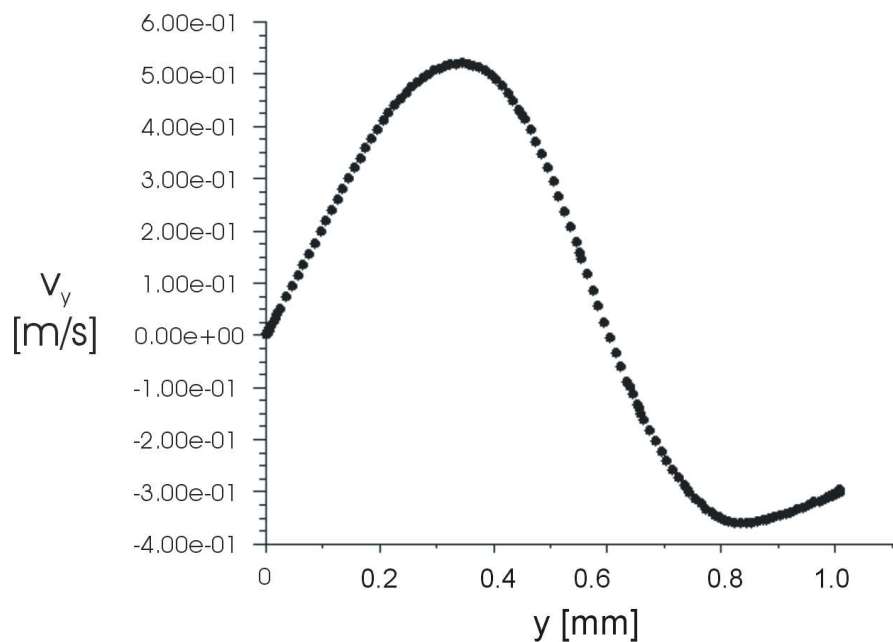
Rys. 4.31. Rozkład składowej v_y wektora prędkości wzdłuż grubości szczeliny dla chwili przepływu bez drgań ultradźwiękowych; 0 mm - PO, 1 mm - ER.



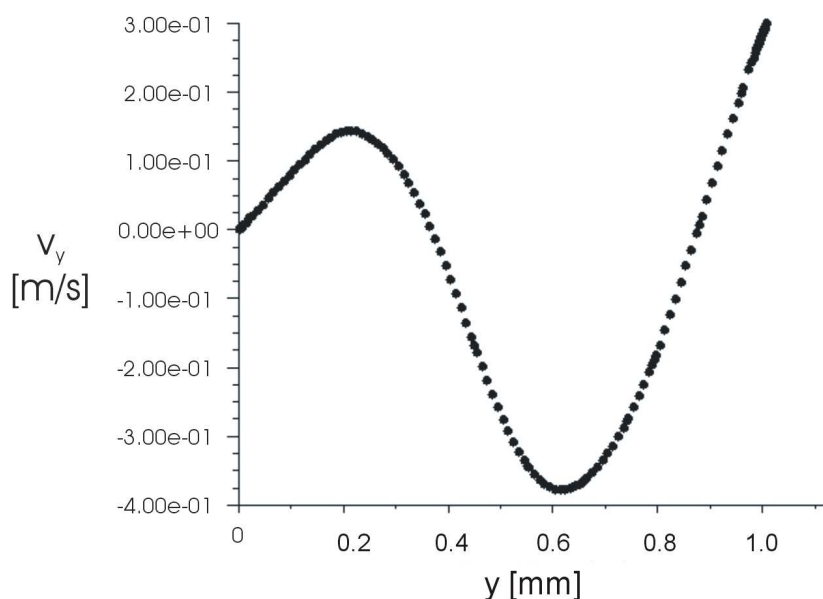
Rys. 4.32. Rozkład składowej v_y wektora prędkości wzdłuż grubości szczeliny dla chwili t_1 , 0 mm - PO, 1 mm - ER, $A = 5 \mu\text{m}$.



Rys. 4.33. Rozkład składowej v_y wektora prędkości wzdłuż grubości szczeliny dla chwili t_2 , 0 mm - PO, 1 mm - ER, $A = 5 \mu\text{m}$.



Rys. 4.34. Rozkład składowej v_y wektora prędkości wzdłuż grubości szczeliny dla chwili t_1 , 0 mm - PO, 1 mm - ER, $A = 2.5 \mu\text{m}$.



Rys. 4.35. Rozkład składowej v_y wektora prędkości wzdłuż grubości szczeliny dla chwili t_2 , 0 mm - PO, 1 mm - ER, $A = 2.5 \mu\text{m}$.

4.5. Analiza wpływu zjawiska kawitacji na proces roztwarzania elektrochemicznego

Do najważniejszych własności fizycznych wpływających bezpośrednio na wskaźniki technologiczne i proces obróbki elektrochemicznej zaliczamy przewodnictwo właściwe elektrolitu κ . Lokalne zmiany przewodnictwa stanowią jedną z głównych przyczyn niedokładności obróbki. Podczas przepływu prądu przez szczelinę międzyelektrodową wydzielają się znaczne ilości ciepła, powodujące wzrost temperatury elektrolitu. Również wydzielanie się w szczelinie międzyelektrodowej fazy gazowej w postaci pęcherzyków kawitacyjnych wpływa na konduktywność właściwą elektrolitu.

Zakładając, że elektrolit jest ośrodkiem *quasi-homogenicznym*, o pewnych uśrednionych właściwościach wzdłuż grubości szczeliny międzyelektrodowej przyjmujemy się, że gęstość zastępcza ośrodka jest równa:

$$\rho_e = \rho_0(1 - \beta) + \rho_g\beta \cong \rho_0(1 - \beta) \quad (4.35)$$

a zastępcza konduktywność:

$$\kappa = \kappa_o(1 + \alpha\Theta)(1 - \beta)^{3/2} \quad (4.36)$$

gdzie: α - temperaturowy współczynnik przewodności elektrycznej, Θ - przyrost temperatury elektrolitu, β - koncentracja objętościowa gazy gazowej (uśredniona wzdłuż

grubości szczeliny międzyelektrodowej). Uwzględniając zależność (4.36), zmianę gęstości prądu w danym przekroju szczeliny można opisać następującym wyrażeniem:

$$j(t) = \kappa_o(1 + \alpha\Theta)(1 - \beta)^{3/2} \frac{U - E}{S_o + A \sin(\omega t)} \quad (4.37)$$

Uwzględniając, że $j_o = \kappa_o \frac{U-E}{S_o}$ otrzymujemy:

$$j = j_o(1 + \alpha\Theta)(1 - \beta)^{3/2} \frac{1}{1 - \frac{A}{S_o} \sin \omega t} \quad (4.38)$$

Analizowane w pracy amplitudy drgań elektrody roboczej mieszczą się w zakresie $A = 1 - 10 \mu m$, czyli, dla $S_o = 1 mm$ stosunek $\frac{A}{S_o} \ll 1$. Przyjmując $\frac{A}{S_o} = 0$ otrzymujemy uproszczone wyrażenie na gęstość prądu:

$$j = j_o(1 + \alpha\Theta)(1 - \beta)^{3/2} \quad (4.39)$$

Znając zmiany gęstość prądu w czasie jednego okresu drgań elektrody roboczej $T = 50 \mu s$ można obliczyć ilość ładunku, który przepłynął w tym czasie przez szczelinę międzyelektrodową:

$$q_T = j_o \int_0^T (1 + \alpha\Theta)(1 - \beta)^{3/2} dt \quad (4.40)$$

Obliczenie zmian κ związane jest z określeniem pola temperatury oraz koncentracji objętościowej fazy gazowej. Zakładając, że wzrost temperatury elektrolitu Θ spowodowany jest jedynie przepływem prądu elektrycznego przez szczelinę międzyelektrodową, uproszczone równanie przewodnictwa ciepła dla analizowanego przypadku można zapisać w następującej formie:

$$\frac{\delta\Theta}{\delta t} + v \frac{\delta\Theta}{\delta x} = \frac{j^2}{\kappa\rho_e C_p} \quad (4.41)$$

Wstawiając: $\tau = \frac{t}{T}$, $\xi = \frac{x}{L}$ i $\bar{v} = \frac{v}{v_0}$, gdzie: $v_0 = 11 m/s$ - prędkość średnia dla przepływu bez drgań ultradźwiękowych można sprowadzić równanie (4.41) do postaci bezwymiarowej:

$$\frac{L}{v_0 T} \frac{\delta\Theta}{\delta\tau} + \bar{v} \frac{\delta\Theta}{\delta\xi} = L \frac{j^2}{\kappa\rho_e C_p v_0} \quad (4.42)$$

Wyrażenie $\frac{L}{v_0 T}$ określa liczbę Strouhala St , która dla przyjętej geometrii wynosi $St \approx 20$ natomiast zmienna bezwymiarowa $\bar{v} = \frac{v}{v_0} \approx 1$. Dla celów oszacowania zmian temperatury w trakcie trwania jednego okresu drgań założono, że zmiany temperatury związane ze zmianą położenia analizowanego elementu są niewielkie. Dominujące znaczenie mają zmiany Θ wraz z czasem. W związku z powyższym, wyrażenie na podstawie którego oszacowano Θ przyjmuje następującą postać:

$$\frac{\delta\Theta}{\delta t} = \frac{j^2}{\kappa\rho_e C_p} \quad (4.43)$$

Tabela 4.3. Dane wejściowe do symulacji obróbki.

Elektrolit	30 % r-r $NaNO_3$,
Temperatura elektrolitu	$T_e = 300 K$
Przewodność elektrolitu na wlocie	$\kappa_0 = 0.016416 1/\Omega mm$
Gęstość elektrolitu na wlocie	$\rho_0 = 1225 kg/m^3$
Ciepło właściwe	$C_p = 3225 J/kg \cdot deg$
Temperaturowy współczynnik przewodności elektrycznej	$\alpha = 0.02 1/K$
Napięcie międzyelektrowe	$U = 30 V$
Polaryzacja elektrod	$E = 0 V$
Szczelina międzyelektrowa	$S_k = 1 mm$
Czas symulacji	$t = T$

Przyjmując $\kappa = \kappa_0(1 + \alpha\Theta)(1 - \beta)^{3/2}$ oraz $\rho_e = \rho_0(1 - \beta)$, wstawiając do (4.43) wyrażenie na gęstość prądu (4.39) i dzieląc obie strony równania przez $(1 - \alpha\Theta)$ otrzymujemy:

$$\frac{\delta\Theta}{1 + \alpha\Theta} = j_0^2 \frac{\sqrt{1 - \beta}}{\kappa_0 \rho_0 C_p} \delta t \quad (4.44)$$

Aby otrzymać przyrost temperatury elektrolitu w czasie t całkujemy obie strony równania w granicach $< 0, t >$:

$$\frac{1}{\alpha} \ln[(1 + \alpha\Theta)] = \frac{j_0^2}{\kappa_0 \rho_0 C_p} \int_0^t \sqrt{1 - \beta} \delta t \quad (4.45)$$

Ostatecznie wzór na podstawie którego obliczono przyrost temperatury $\Theta(t)$:

$$\Theta(t) = \frac{1}{\alpha} \left[\exp \left(\frac{\alpha j_0^2}{\kappa_0 \rho_0 C_p} \int_0^t \sqrt{1 - \beta} \delta t \right) - 1 \right] \quad (4.46)$$

Na podstawie zależności (4.39), (4.40) oraz (4.46) przeprowadzono obliczenia mające na celu określenie zmian warunków obróbki w czasie jednego okresu drgań ultradźwiękowych. Dane do obliczeń przedstawiono w Tab. 4.3. Ze względu na bardzo krótki czas symulacji (zbyt krótki aby wydzieliły się pęcherzyki wodoru) przyjęto $\beta = \alpha_v$ (obliczona w trakcie analizy numerycznej zawartość pary). W obliczeniach przyjęto uśrednione wzdłuż grubości szczeliny wartości α_v , a obliczenia przeprowadzono dla $A = 5 \mu m$.

Na Rys. 4.36 oraz 4.37 przedstawiono zmiany gęstości prądu w czasie $t = 50 \mu s$. Dla obróbki bez drgań ultradźwiękowych gęstość prądu równomiernie rośnie wraz z czasem. Ma to bezpośredni związek ze wzrostem przewodności właściwej elektrolitu (wzrost temperatury elektrolitu). Przedstawione na Rys. 4.37 zależności $j(t)$

($A = 5 \mu m$) dla różnych przekrojów wzdłuż grubości szczeliny międzyelektrodowej pokazują, że:

- gęstość prądu dla każdego z analizowanych przekrojów zmienia się nierównomiernie (osiąga swoje maksimum dla $t \approx 30 \mu s$), a periodyczny charakter tych zmian związany jest z położeniem ER i zmianami $p(t)$ oraz $\alpha_v(t)$,
- maksymalna wartość j maleje wraz z długością szczeliny międzyelektrodowej.

Zmiany zależności $j(t)$ związane są ze wzrostem średniego udziału objętościowego fazy gazowej wraz z długością szczeliny międzyelektrodowej (Rys. 4.27, 4.28). Prędkość roztwarzania elektrochemicznego (mierzona prędkością przemieszczania się punktów PO) jest równa:

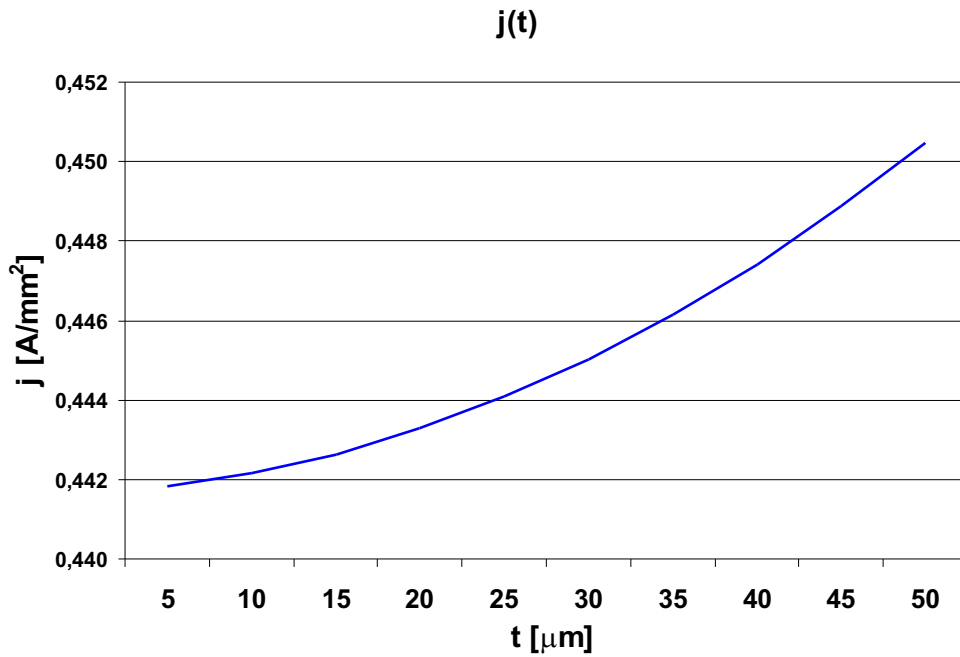
$$v_r = (\eta k_v)(t)j(t) \quad (4.47)$$

Z powyższego równania (przyjmując $\eta k_v = const.$), na podstawie zależności $j(t)$ (Rys. 4.37) oraz pomijając lokalne efekty związane z zapadaniem się pęcherzyków kawitacyjnych (np. powstawanie *mikro - strug* elektrolitu, lokalne zwiększenie przewodności właściwej, związany z wprowadzeniem ultradźwięków wzrost temperatury elektrolitu), otrzymamy nierównomierny rozkład prędkości roztwarzania. Opisując grubość usuniętego naddatku w jednym okresie drgań następującym wyrażeniem:

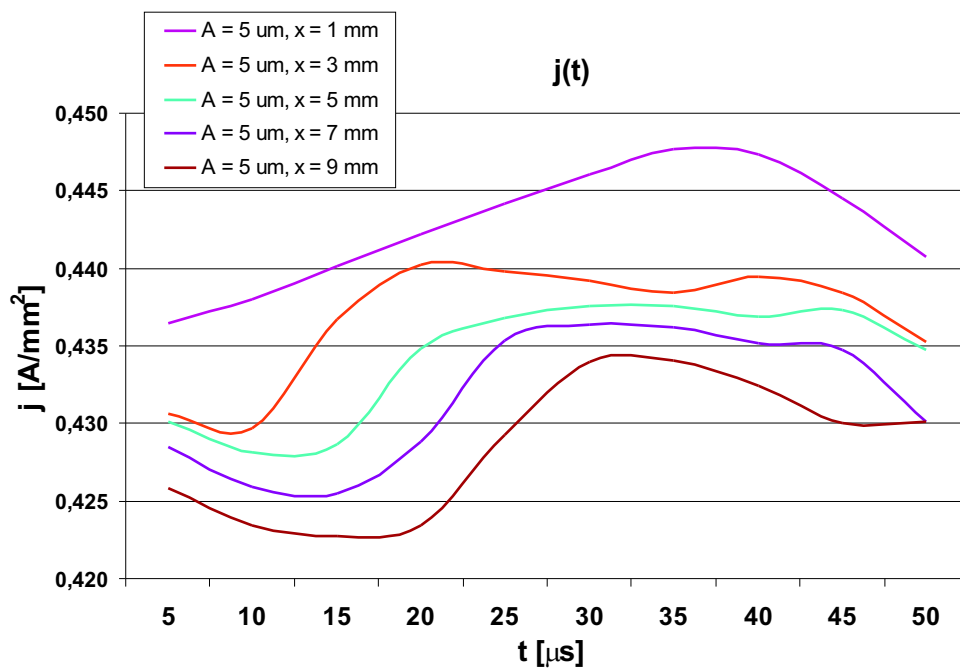
$$\Delta a_T = \int_0^T (\eta k_v)(t)j(t)dt \quad (4.48)$$

widać, że ilość roztworzonego materiału maleje wraz z długością szczeliny. Potwierdza to przedstawiona na Rys. 4.38 zależność $q_T(x)$, z której widać, że obliczona na podstawie (4.40) ilość ładunku (który równoważny jest strumieniowi masy roztworzonego materiału), maleje wraz z długością szczeliny międzyelektrodowej.

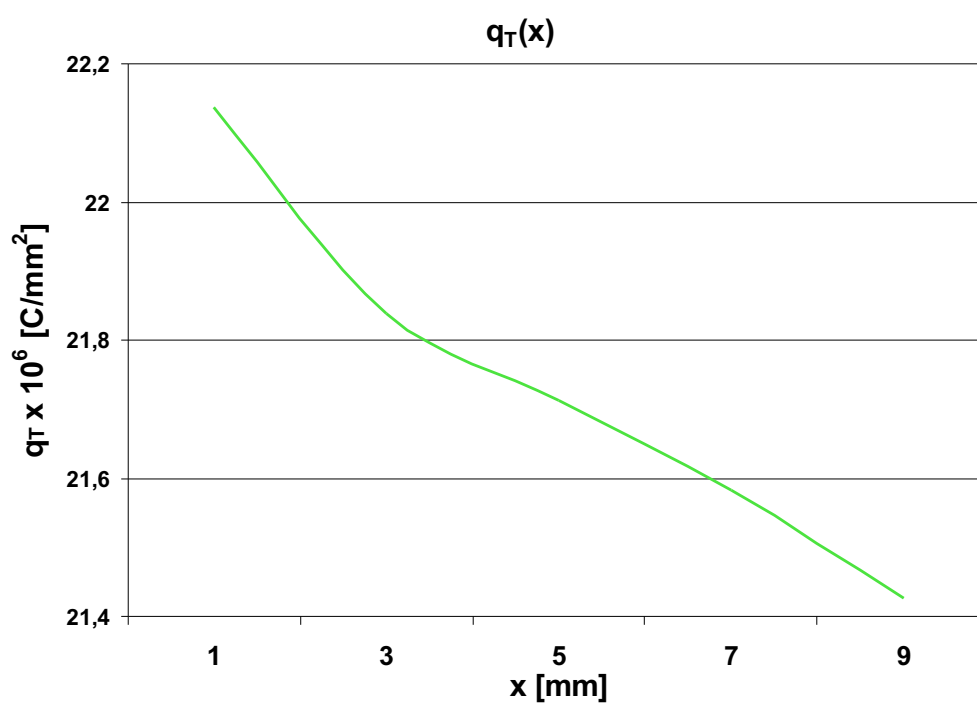
Z przedstawionej powyżej analizy widać, że wydzielające się w szczelinie międzyelektrodowej pęcherzyki kawitacyjne wpływają niekorzystnie na rozkład gęstości prądu wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej. Ma to bezpośredni związek z pominięciem w analizie lokalnych efektów związanych z zapadaniem się pęcherzyków oraz zmian przewodności właściwej elektrolitu związanych z wprowadzeniem ultradźwięków. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że niepoprawny dobór parametrów drgań ultradźwiękowych, (prowadzący jedynie do wzrostu ilości fazy gazowej w szczelinie) może powodować zmniejszenie dokładności obróbki. Z przeprowadzonej analizy widać również, że równoległe z wprowadzeniem drgań elektrody roboczej wzrastają wymagania dotyczące szybkości wymiany elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej. Wydatek elektrolitu powinien być na tyle duży, aby następowało równomierne usuwanie pary gromadzącej się wewnątrz szczeliny.



Rys. 4.36. Zmiany gęstości prądu $j(t)$ w czasie $t = 50 \mu s$ dla obróbki bez drgań ultradźwiękowych.



Rys. 4.37. Zmiany gęstości prądu $j(t)$ w czasie jednego okresu drgań ($T = 50 \mu s$) dla obróbki wspomagannej drganiami ultradźwiękowymi ($A = 5 \mu m$).



Rys. 4.38. Zmiany ilości ładunku q_T wzdłuż długości szczeliny międzyelektrodowej dla obróbki wspomagananej drganiami ultradźwiękowymi ($A = 5 \mu m$).

Rozdział 5

Badania doświadczalne

5.1. Cel, zakres i koncepcja badań doświadczalnych

Wyniki otrzymane na etapie modelowania obróbki USECM - CNC oraz przeprowadzona analiza literatury obejmującej tematykę pracy pozwoliła na postawienie celu oraz opracowanie koncepcji badań doświadczalnych. Główne cele badań to:

- dalsze poznanie procesu obróbki USECM - CNC,
- weryfikacja doświadczalna opracowanego modelu numerycznego,
- określenie obszaru zastosowania tej metody obróbki materiałów,
- uzyskanie zależności pomiędzy parametrami obróbki USECM - CNC, a wskaźnikami technologicznymi procesu,
- uzyskanie danych technologicznych niezbędnych do projektowania obróbki.

Badania doświadczalne przeprowadzone zostały w Zakładzie Niekonwencjonalnych Technologii Produkcyjnych Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania (ZNTP IZTW).

W ECM - CNC czas obróbki w wybranym punkcie PO zależy od kształtu elektrody roboczej. Dla elektrody kulistej i walcowej grubość usuniętego w wybranym punkcie PO naddatku maleje, wraz z odległością obrabianego punktu od trajektorii środka ER. Z tego względu wartości ηk_v i E dla obróbki ECM - CNC otrzymane na podstawie wyników badań doświadczalnych są wartościami uśrednionymi dla całego roztwarzanego obszaru. Dlatego też, przeprowadzono serię rozpoznawczą badań USECM dla drażenia elektrochemicznego. Badania te zostały zaplanowane w sposób umożliwiający analizę otrzymanych wyników przy podobnych założeniach jak

dla obróbki USECM - CNC. Drażenie czołowe małej powierzchni (47 mm^2) płaską elektrodą walcową ($\phi = 10 \text{ mm}$), umożliwia pominięcie wpływu zmian właściwości elektrolitu na prędkość roztwarzania elektrochemicznego. W takim przypadku grubość szczeliny międzyelektrodowej S_k w stanie ustalonym (quasiustalonym) opisana jest następującym wzorem:

$$S_k = \frac{\eta k_v \kappa (U - E)}{v_f} \quad (5.1)$$

Przy stałych parametrach obróbki (v_f i U) dla procesu ECM i USECM wartość S_k zależy głównie od ηk_v i E . Korzystając z powyższej zależności oraz pewnych założeń upraszczających można oszacować wpływ parametrów drgań ultradźwiękowych na wartości η i E .

W dalszych etapach badań przeprowadzono próby obróbki ECM - CNC elektrodą kulistą i walcową, oraz badania z wierszowaniem.

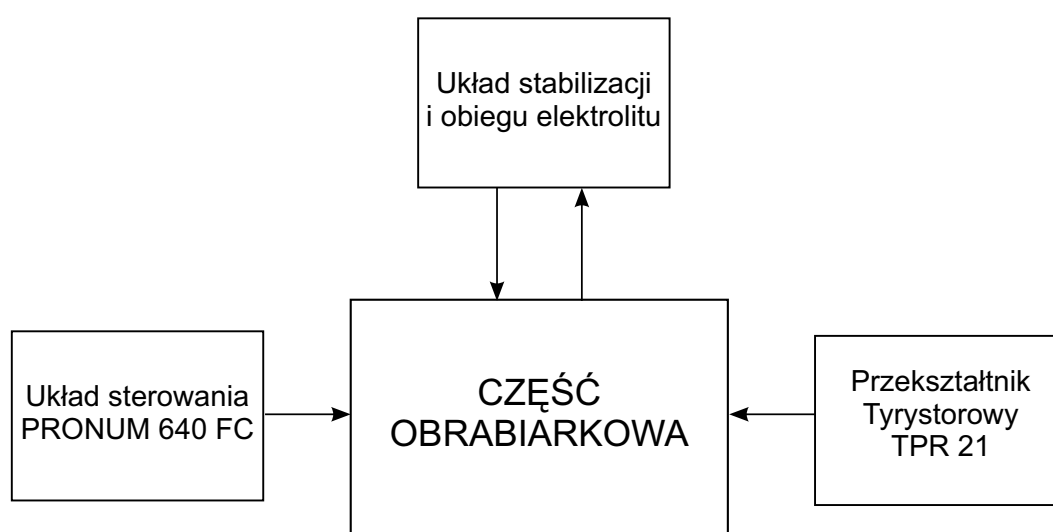
5.2. Opis stanowiska badań

Badania drażenia elektrochemicznego oraz badania obróbki elektrodą uniwersalną przeprowadzono na stanowisku badawczym zbudowanym na bazie obrabiarki EOCA 40, opracowanej w ZNTP IZTW [95, 106] i składającej się z następujących zespołów (Rys. 5.1):

- **część obrabiarkowa z komorą roboczą.** W części obrabiarkowej EOCA 40 znajduje się komora robocza, do której doprowadzany jest w układzie zamkniętym elektrolit, a odprowadzane są gazy i pary powstałe w trakcie procesu. W komorze roboczej znajduje się stół roboczy z rowkami teowymi, za pomocą których montuje się oprzyrządowanie.
- **układ obiegu elektrolitu** składa się ze zbiornika z którego filtrowany, podgrzany lub chłodzony do założonej temperatury elektrolit przetłaczany jest do strefy obróbki. Zanieczyszczony produktami roztwarzania elektrolit odprowadzany jest grawitacyjnie ponownie do zbiornika.
- **przekształtnik tyrystorowy.** Źródłem prądu stałego do zasilania obwodu roboczego jest przekształtnik tyrystorowy typu TPR 21. Umożliwia on utrzymanie zadanego napięcia wyjściowego z dokładnością wartości znamionowej przy zmianach obciążenia i napięcia zasilającego. Przekształtnik tyrystorowy jest załączany automatycznie poprzez układ sterowania.
- **układ napędu i układ sterowania.** Elementami wykonawczymi układu napędowego są tarczowe silniki prądu stałego typu PTT 20 ze sprzężeniem zwrotnym sterowane poprzez sterowniki tyrystorowe typu TR 12. Silniki połączone są

przekładniami falowymi, które przekazują swój ruch obrotowy na zespół śruba - nakrętka. Elementami pomiarowymi przemieszczenia są przetworniki obrotowo - impulsowe typu PFI dołączone bezpośrednio do zespołu śruba - nakrętka. Sygnały zadające do sterowników generowane są przez układ sterowania numerycznego PRONUM 640 FC, wykorzystywany powszechnie do sterowania numerycznego frezarek.

- **głowica ultradźwiękowa GU 160A.** Ruch drgający elektrody realizowany jest poprzez zastosowanie głowicy i generatora ultradźwiękowego GU 160 A - zestawu skonstruowanego w IZTW. Ruch drgający elektrody roboczej następuje w wyniku mocowania jej do falowodu urządzenia drgającego głowicy ultradźwiękowej. Energia ultradźwiękowa powstaje w przetworniku piezoelektrycznym warstwowym zasilanym z elektronicznego generatora mocy sygnałem ciągłym o częstotliwości około 20 kHz , która jest samoczynnie utrzymywana w granicach częstotliwości rezonansu drgań mechanicznych przetwornika przekazującego energię elektrodzie roboczej.



Rys. 5.1. Schemat zespołów obrabiarki EOCA 40.

Parametry zastosowanej głowicy ultradźwiękowej przedstawiono w Tab. 5.1. Aby zapewnić odpowiednie wzmocnienie amplitudy drgań ultradźwiękowych narzędzia które mają współpracować z powyższą głowicą ultradźwiękową muszą być półfalowymi koncentratorami drgań. Jednym z warunków decydującym o tym jest długość narzędzia, którą określa się z następującej zależności:

$$L = \frac{c}{2f} \quad (5.2)$$

gdzie: c - prędkość dźwięku dla materiału elektrody, f - częstotliwość drgań. W praktyce częstotliwość drgań odbiega od wyliczonej z uwagi na złożony kształt części

roboczej elektrody. Dobór odpowiedniego kształtu oraz wymiarów narzędzia warunkuje uzyskanie częstotliwości pracy równej lub zbliżonej do częstotliwości drgań samej głowicy (bez narzędzia).

Tabela 5.1. Dane techniczne głowicy ultradźwiękowej.

Częstotliwość drgań	$f \approx 22 \text{ kHz}$
Maksymalna moc dostarczana do przetwornika	$P = 160 \text{ W}$
Maksymalna amplituda drgań czoła elektrody	$A = 16 \text{ }\mu\text{m}$
Maksymalny dopuszczalny prąd w obwodzie	$I = 100 \text{ A}$
Zasilanie	220 V, 20 kHz

Na Rys. 5.2 przedstawiono schemat stanowiska, na którym przeprowadzono badania drażenia elektrochemicznego. W badaniach zastosowano próbki i elektrody walcowe (Rys. 5.3). Konstrukcja zastosowanej głowicy nie umożliwia doprowadzenia elektrolitu przez drgającą sonotrodę, dlatego też zdecydowano się na dostarczenie elektrolitu przez otwór wykonany w próbce.

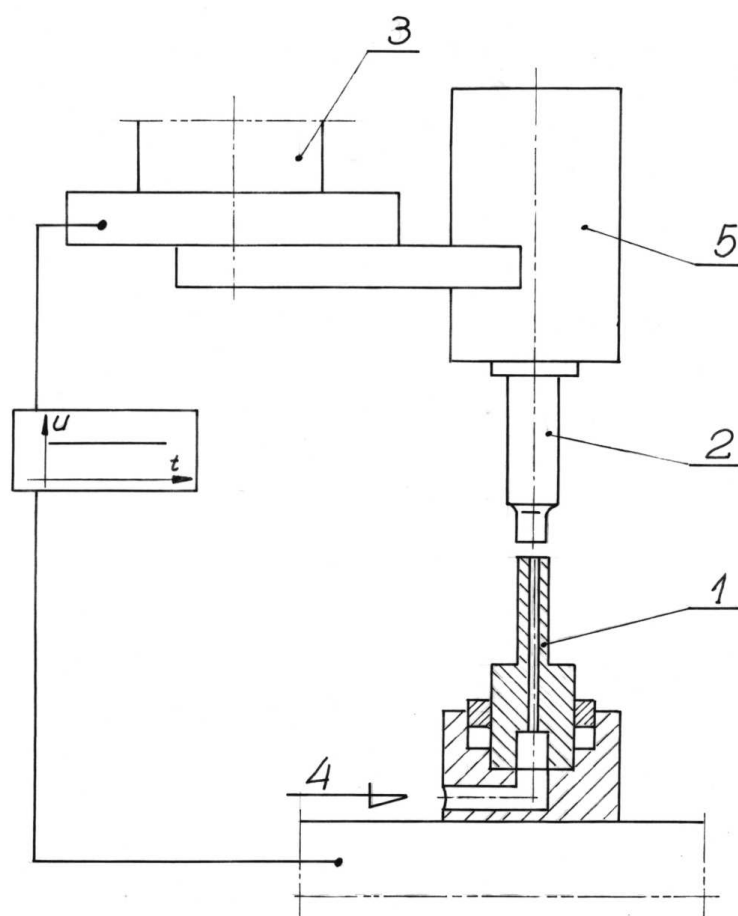
Stanowisko do badań obróbki USECM - CNC zbudowano również na obrabiarce EOCA 40. Na Rys. 5.4 przedstawiono schemat stanowiska, na którym przeprowadzono badania. Głowica ultradźwiękowa podwieszona jest do płyty narzędziowej obrabiarki. Dysza doprowadzająca elektrolit skierowana jest przeciwnie do kierunku posuwu elektrody roboczej.

Aby określić zakres amplitud możliwych do uzyskania z zastosowanymi elektrodami przeprowadzono badania zależności amplitudy drgań A od mocy dostarczonej do przetwornika piezoelektrycznego P . Do pomiarów wykorzystano układ pomiarowy DISA 51 B02 z oscyloskopem i czujnikiem pojemnościowym DISA 51 D 11 (Rys. 5.5). Mierzono amplitudę i częstotliwość powierzchni czołowej elektrody roboczej względem czujnika pojemnościowego. Otrzymane zależności przedstawiono na Rys. 5.6 oraz w Tab. 5.2. Wartości częstotliwości w całym zakresie pomiarów były stabilne i wynosiły około 20 kHz.

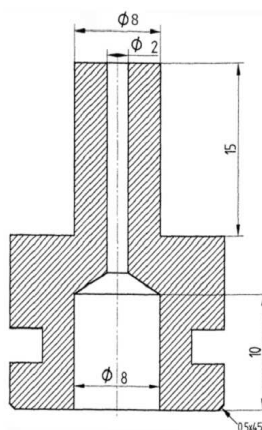
5.3. Metodyka badań. Metody i technika pomiarów

5.3.1. Badania drażenia elektrochemicznego USECM.

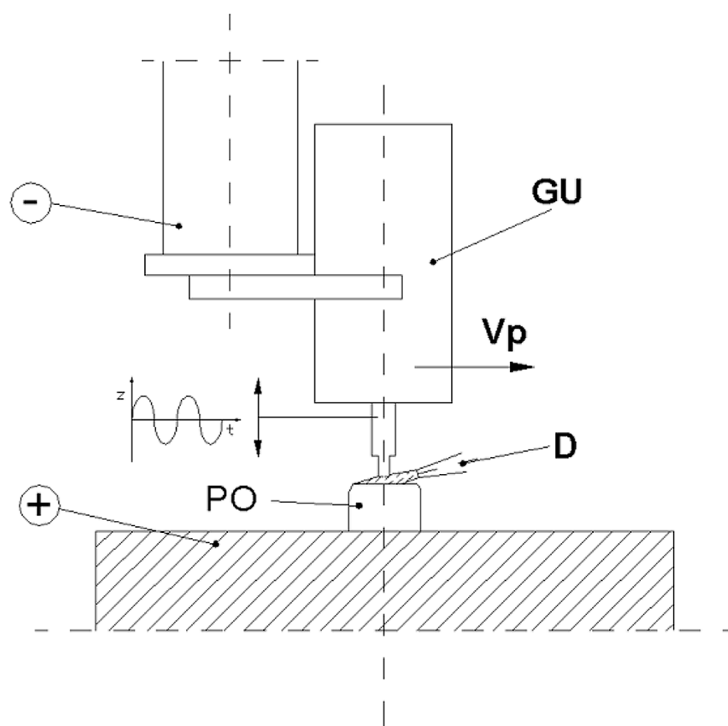
Zasadniczym celem badań procesu drażenia wspomaganego drganiami ultradźwiękowymi elektrody roboczej (sonotrody) było określenie i wyznaczenie podstawowych zależności pomiędzy wskaźnikami technologicznymi a parametrami procesu.



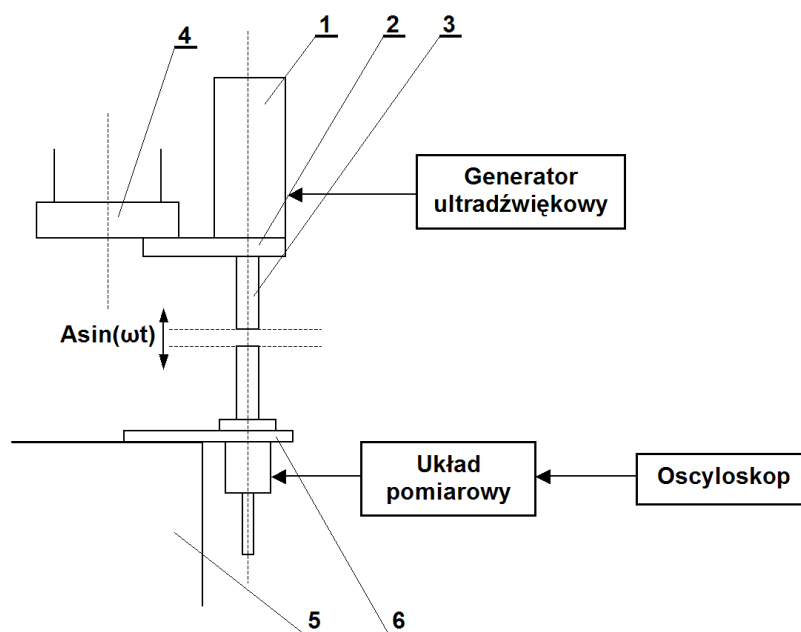
Rys. 5.2. Schemat stanowiska do badań procesu drążenia USECM: 1 - próbka do badań, 2 - elektroda robocza (sonotroda), 3 - płyta narzędziowa obrabiarki EOCA 40, 4 - doprowadzenie elektrolitu, 5 - głowica ultradźwiękowa.



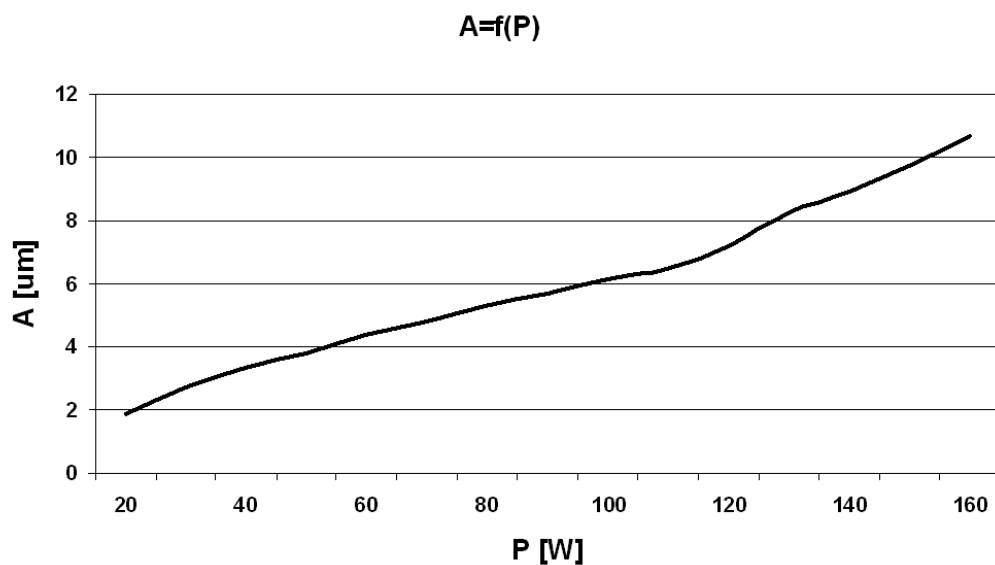
Rys. 5.3. Próbka do badań procesu drążenia USECM.



Rys. 5.4. Schemat stanowiska do badań USECM - CNC: PO - przedmiot obrabiany, GU - głowica ultradźwiękowa, v_p - kierunek posuwu elektrody, D - dysza dostarczająca elektrolit.



Rys. 5.5. Schemat stanowiska do pomiaru amplitudy drgań ultradźwiękowych elektrody roboczej; 1 - głowica ultradźwiękowa, 2 - suport głowicy, 3 - elektroda robocza, 4 - stół narzędziowy obrabiarki, 5 - stół roboczy obrabiarki, 6 - czujnik pojemnościowy.



Rys. 5.6. Charakterystyka głowicy ultradźwiękowej UDS 160.

Tabela 5.2. Zależność amplitudy drgań elektrody roboczej A od mocy dostarczonej do przetwornika piezoelektrycznego.

Moc P [W]	Amplituda A [μm]
20	1.90
30	2.73
40	3.35
50	3.80
60	4.38
70	4.83
80	5.33
90	5.70
100	6.15
110	6.50
120	7.18
130	8.23
140	8.93
150	9.75
160	10.68

Analiza otrzymanych danych pozwoli na otrzymanie podstawowych danych technologicznych, które znacznie ułatwią interpretację wyników otrzymanych z badań USECM - CNC.

Badanymi czynnikami obróbki były:

- napięcie międzyelektrodowe: $U = 8 \div 22 V$,
- prędkość przesuwu elektrody roboczej (sonotrody) $v_f = 0.2 \div 1.4 mm/min$,
- moc drgań ultradźwiękowych : $P = 40 \div 120 W$.

Czynniki wynikowe:

- parametry chropowatości powierzchni: Ra i Rz ,
- gęstość prądu: $j [A/mm^2]$,
- grubość szczeliny międzyelektrodowej w chwili końcowej obróbki : $S_k [mm]$.

Czynniki ustalone:

- kształt i wymiary elektrod oraz wielkość powierzchni obrabianej $F = 47 mm^2$,
- materiał obrabiany: stal NC6,
- materiał elektrody roboczej (sonotrody): mosiądz,
- elektrolit: 15% wodny roztwór $NaNO_3$,
- początkowa grubość szczeliny międzyelektrodowej: $S_0 = 0.1 mm$,
- głębokość drążenia : $h = 0.9 mm$.

Wykonano dwie serie badań według programu selekcyjnego, ortogonalnego, rotatabilnego rzędu drugiego:

- drążenie materiału NC6 bez drgań elektrody roboczej;
- drążenie materiału NC6 z drganiami elektrody roboczej;

Wyniki badań opracowano wykorzystując oprogramowanie CADEX oraz sieci neuronowe [26, 121]. W badanym przypadku, obróbki można założyć, że przyrost temperatury elektrolitu (wynikający z przepływu prądu elektrycznego) oraz koncentracji objętościowej wodoru (wynikający z katodowych reakcji elektrodowych) jest nieistotny. Porównując dwa procesy roztwarzania przyjęto następujące założenia:

- roztwarzanie elektrochemiczne przebiega w tych samych warunkach, tzn.: U , v_f , κ , T_e , materiał elektrod oraz warunki ukształtowania wlotu i wylotu elektrolitu są takie same;
- amplituda drgań ultradźwiękowych $A \leq 0.2S_k$, czyli średnia grubość szczeliny w stanie quasiustalonym $\bar{S}_k \leq S_k \sqrt{1 + 0.04} \approx S_k$;
- pomija się ewentualny wpływ reakcji sonochemicznych na zmiany składu chemicznego elektrolitu;
- wpływ ultradźwięków na proces ECM przejawia się w depolaryzacji i depasywacji elektrod.

W przypadku obróbki USECM elektroda robocza przemieszcza się z prędkością v_f

w kierunku przedmiotu obrabianego drgając równocześnie z częstotliwością ultradźwiękową. Po pewnym czasie proces przejdzie ze stanu nieustalonego w stan quasiustalony charakteryzujący się tym, że zjawiska zachodzące w szczelinie podczas każdego okresu drgań są analogiczne. W stanie quasiustalonym grubość szczeliny międzyelektrodowej jest funkcją okresową w czasie:

$$S(t) = S(t + nT) \quad (5.3)$$

czyli grubość usuniętego w jednym okresie drgań naddatku spełnia następujące warunki:

$$\Delta a(t) = \int_0^T (\eta k_v)(t) j(t) dt \quad (5.4)$$

$$\Delta a(t) = v_f T \quad (5.5)$$

$$\Delta a(t) = \Delta a(t + nT) \quad (5.6)$$

W takim przypadku proces roztwarzania elektrochemicznego w stanie ustalonym (quasiustalonym dla USECM), może zostać opisany następującymi równaniami:

$$S_k = \frac{\eta k_v \kappa (U - E)}{v_f} \quad (5.7)$$

$$j = \kappa \frac{U - E}{S_k} = \frac{v_f}{\eta k_v} \quad (5.8)$$

gdzie: S_k - grubość szczeliny w stanie ustalonym (quasiustalonym), j - średnia gęstość prądu, U - napięcie międzyelektrodowe, E - polaryzacja elektrod, ηk_v - współczynnik obrabialności elektrochemicznej, κ - przewodność elektryczna elektrolitu, v_f - prędkość przesuwu elektrody roboczej. Stosunek grubości szczelin w stanie ustalonym i quasiustalonym można wyrazić następująco:

$$\frac{S_{kECM}}{S_{kUSECM}} = \frac{(\eta k_v)_{ECM} (U - E_{ECM})}{(\eta k_v)_{USECM} (U - E_{USECM})} \quad (5.9)$$

Wzajemny stosunek średniej gęstości prądu w dla obu procesów:

$$\frac{j_{ECM}}{j_{USECM}} = \frac{(U - E_{ECM}) S_{kUSECM}}{(U - E_{USECM}) S_{kECM}} \quad (5.10)$$

Biorąc pod uwagę (5.9) otrzymujemy:

$$j_{USECM} = \frac{j(\eta k_v)_{ECM}}{(\eta k_v)_{USECM}} \quad (5.11)$$

Z (5.11) wynika, że gęstość prądu w procesie USECM może ulec zmianie, jedynie gdy zmieni się obrabialność elektrochemiczna ηk_v . Biorąc pod uwagę powyższe założenia

i zależności, rozwiązanie następujących trzech równań umożliwia obliczenie spadku potencjału E dla procesów ECM i USECM zachodzących w tych samych warunkach (U, v_f, κ):

$$S_{kECM} = \frac{(\eta k_v)_{ECM} \kappa (U - E_{ECM})}{v_f} \quad (5.12)$$

$$S_{kUSECM} = \frac{(\eta k_v)_{USECM} \kappa (U - E_{USECM})}{v_f} \quad (5.13)$$

$$j_{USECM} = \frac{j(\eta k_v)_{ECM}}{(\eta k_v)_{USECM}} \quad (5.14)$$

Niewiadomymi w układzie równań (5.12), (5.13), (5.14), są: $E_{ECM}, E_{USECM}, (\eta k_v)_{USECM}$, natomiast: κ, U oraz v_f są parametrami obróbki, $S_{kECM}, S_{kUSECM}, (\eta k_v)_{ECM}$ otrzymano na podstawie prób technologicznych. Obrabialność elektrochemiczną $(\eta k_v)_{ECM}$ dla procesu ECM obliczono na podstawie objętości usuniętego naddatku.

5.3.2. Badania rozpoznawcze obróbki USECM - CNC

Na wstępie przeprowadzono dwie serie badań z wykorzystaniem wspomagania ultradźwiękowego, dla różnych sposobów dostarczania elektrolitu do szczeliny międzyelektrodowej:

- obróbka w zanurzeniu czyli bez wymuszonego przepływu elektrolitu,
- obróbka z doprowadzeniem elektrolitu przy pomocy odpowiednio zamocowanej dyszy (Rys. 5.4).

W trakcie wykonywania badań okazało się, że realizacja obróbki elektrochemicznej wspomaganą drganiem ultradźwiękowymi bez wymuszonego przepływu elektrolitu jest niemożliwa. Głównym powodem była niewystarczająca wymiana elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej. W wyniku tego następowało nadmierne gromadzenie się produktów reakcji elektrochemicznych czyli, przede wszystkim wzrost ilości zanieczyszczeń oraz temperatury elektrolitu. W dalszej części opis i wyniki badań odnoszą się więc do realizacji procesu z dostarczaniem elektrolitu poprzez odpowiednio skierowaną dyszę (Rys. 5.7).

Badania zostały przeprowadzone dla najprostszego przypadku obróbki, czyli obróbka płaskiej powierzchni oraz pojedyncze przejście elektrody (bez wierszowania). Badania w poszczególnych przypadkach zostały przeprowadzone zgodnie z zasadami teorii eksperymentu, dla czterech i pięciu czynników wejściowych, wg następujących planów ortogonalno - rotabilnych (ramię gwiazdne $\alpha = 2$) [35, 74]:

- typu 2^4 - 31 układów pomiarowych,
- typu 2^{5-1} - 32 układy pomiarowe.

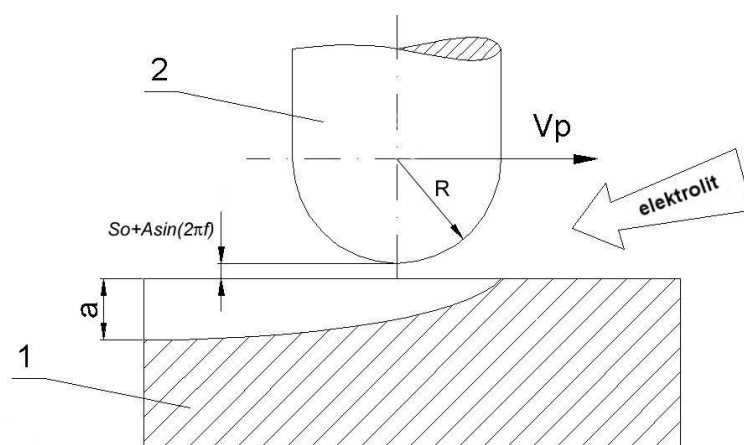
Badania obróbki USECM - CNC wykonano dla dwóch kształtów elektrod:

- z kulistą częścią roboczą (Rys. 5.8),
- z walcową częścią roboczą (Rys. 5.9).

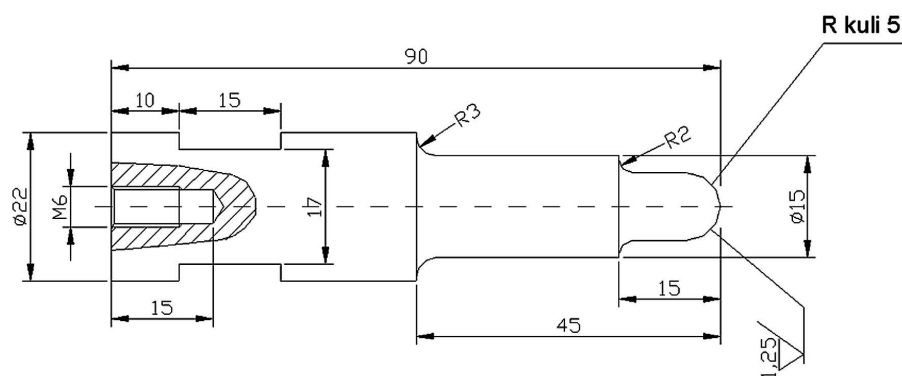
Dla każdego z wymienionych narzędzi przeprowadzono również porównawcze badania dla ECM - CNC bez wspomaganie drganiami US. Przekrój poprzeczny próbki wykorzystanej do badań przedstawiono na Rys. 5.10.

Badanymi czynnikami obróbki były:

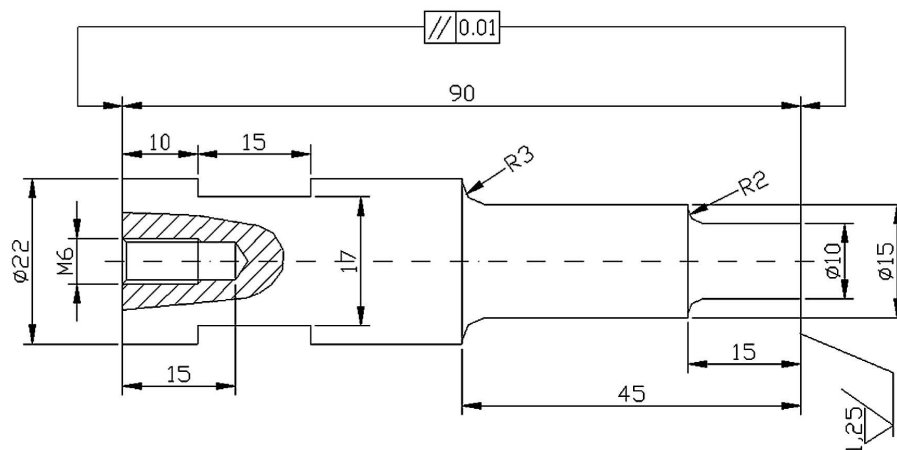
- napięcie międzyelektrodowe $U = 8 \div 20 V$,
- prędkość posuwu elektrody roboczej $v_p = 1 \div 59 mm/min$,
- grubość początkowej szczeliny międzyelektrodowej $S_0 = 0.1 \div 0.9 mm$,
- stężenie elektrolitu $C_e = 10 \div 25 \%$,



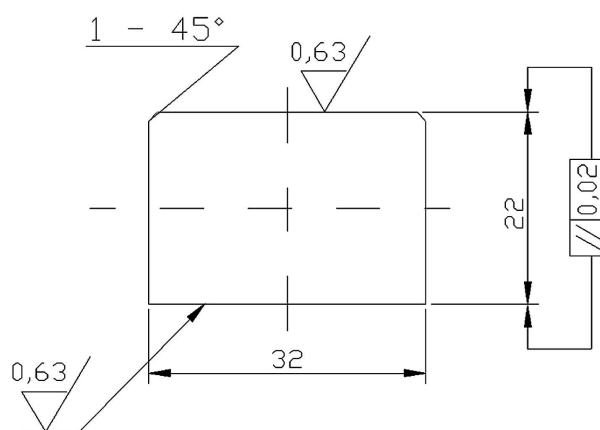
Rys. 5.7. Schemat obszaru obróbki w procesie USECM - CNC; 1 - przedmiot obrabiany, 2 - elektroda robocza, S_0 - początkowa grubość szczeliny międzyelektrodowej, a - grubość usuniętego nadatku, v_p - kierunek przesuwu elektrody roboczej, A - amplituda drgań elektrody roboczej, R - promień elektrody.



Rys. 5.8. Elektroda z kulistą częścią roboczą.



Rys. 5.9. Elektroda z płaską częścią roboczą.



Rys. 5.10. Próbką do badań obróbki powierzchni płaskich.

- moc ultradźwięków $P = 30 \div 150 \text{ W}$ - (odpowiada to zmianą amplitudy drgań elektrody roboczej A w zakresie $2.73 \div 9.75 \mu\text{m}$).

Czynniki wynikowe:

- grubość usuniętego naddatku a ,
- chropowatość powierzchni obrobionej Ra, Rz ,
- wydajność obróbki V_w .

Czynniki ustalone:

- promień elektrody roboczej: $R = 5 \text{ mm}$ (Rys. 5.8, 5.9),
- elektrolit: wodny roztwór NaNO_3 ,
- ciśnienie elektrolitu na wylocie z dyszy,
- materiał elektrody: miedź M1,
- materiał obrabiany: stal NC6 obrabiana cieplnie do 50 HRC,
- temperatura elektrolitu: $T_e = 26 \text{ }^\circ\text{C}$,
- elektroda wykonuje pojedyncze przejście.

Czynniki zakłócające:

- niedokładność obrabiarki,
- zmienność w czasie właściwości elektrolitu,
- niejednorodność materiału obrabianego,
- niedoskonałość sposobu dostarczania elektrolitu do szczeliny.

W trakcie badań mierzono lub kontrolowano następujące parametry:

- napięcie międzyelektrodowe woltomierzem cyfrowym z dokładnością do 0.01 V , który został podłączony pomiędzy elektrodę roboczą a przedmiot obrabiany,
- prędkość przesuwu elektrody roboczej nastawiano i mierzono przy pomocy układu stanowiącego integralną część obrabiarki (z dokładnością do 0.01 mm/min),
- grubość początkową szczeliny międzyelektrodowej ustalono przy pomocy układu sterowania PRONUM oraz układu wykrywania styku z dokładnością 0.001 mm ,
- temperaturę elektrolitu nastawiano i stabilizowano przy pomocy układu stanowiącego integralną część obrabiarki. Umożliwia on stabilizację założonej temperatury elektrolitu z dokładnością do $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$,
- ciśnienie elektrolitu na wlocie do przestrzeni obróbki mierzono manometrem stanowiącym wyposażenie obrabiarki,
- natężenie prądu mierzono pośrednio poprzez pomiar spadku napięcia na boczniku pomiarowym przy pomocy woltomierza cyfrowego z dokładnością 0.01 V .

Wydajność obróbki obliczano korzystając z poniższej zależności:

$$V_w = \frac{V}{t} \quad (5.15)$$

gdzie: V - objętość usuniętego naddatku, t - czas obróbki, w którym materiał został usunięty. Objętość usuniętego materiału obliczano na podstawie profilu powierzchni obrobionej próbki otrzymanego za pomocą kształtografu PG - 2/200 produkcji IZTW Kraków [61, 62, 63, 64, 65]. Zakładając, że pole powierzchni przekroju materiału usuniętego z powierzchni obrabianej F jest stałe objętość usuniętego materiału obliczano na podstawie następującej zależności:

$$V = F \cdot l \quad (5.16)$$

gdzie: F - powierzchnia przekroju materiału usuniętego z powierzchni obrabianej (przekrój płaszczyzną prostopadłą do kierunku obróbki), l - długość powierzchni obrabianej (wzdłuż trajektorii elektrody).

Czas obróbki był obliczany z zależności:

$$t = \frac{L}{v_p} \quad (5.17)$$

gdzie: L - całkowita długość trajektorii elektrody, v_p - prędkość przesuwu elektrody.

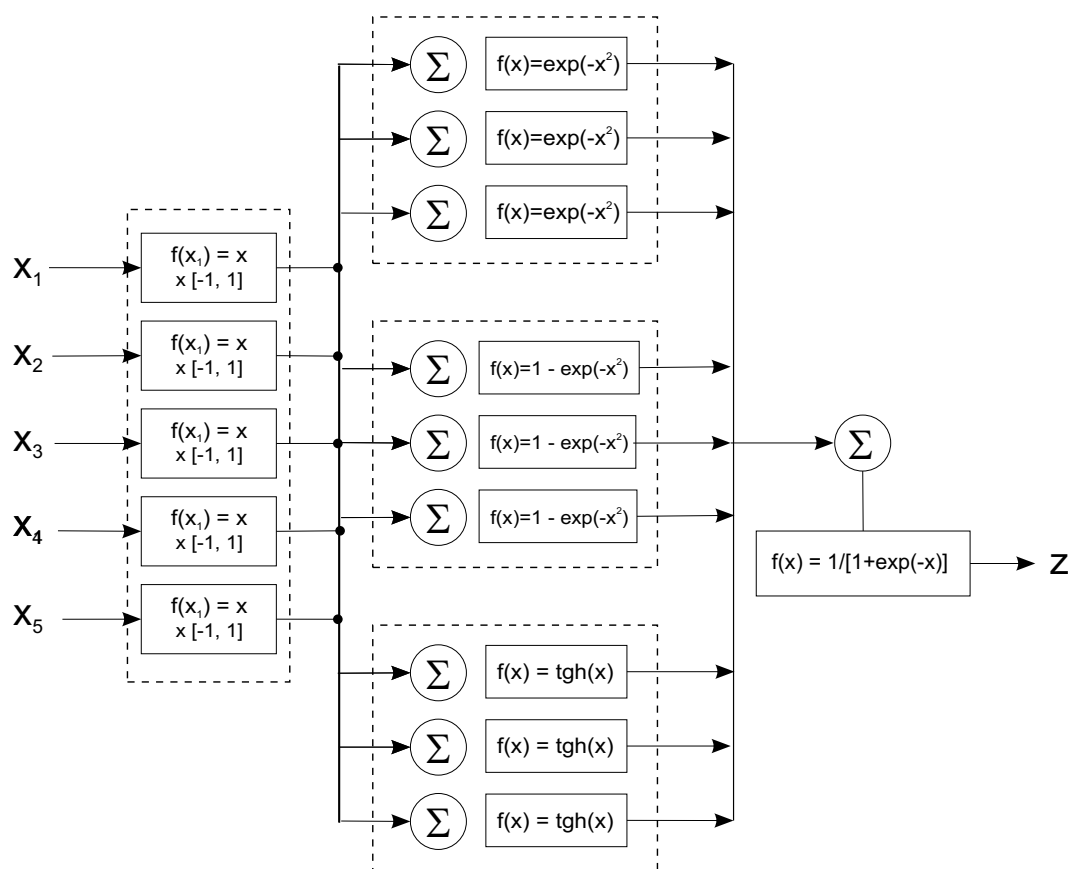
Otrzymane wyniki badań poddano analizie statystycznej. Jako funkcję obiektu badań przyjęto wielomian drugiego stopnia z interakcjami:

$$z = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_ix_i + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{ii}x_i^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \dots \quad (5.18)$$

Opracowanie wyników badań obejmowało wyznaczenie współczynników regresji oraz ocenę ich istotności, ocenę dokładności pomiarów oraz ocenę adekwatności funkcji obiektu badań. Wyniki badań opracowano wykorzystując pakiet CADEX [31]. Przeprowadzono również analizę przy zastosowaniu sieci neuronowych, które niejednokrotnie były stosowane do analizy wyników badań ECM [27, 28]. W tym przypadku funkcją obiektu badań była sieć trojwarstwowa, składająca się z następujących warstw (Rys. 5.11):

- warstwa wejściowa - neurony tej warstwy normalizują sygnał wejściowy, a następnie przesyłają go do kolejnej warstwy,
- warstwa ukryta - jest to warstwa, w której neurony przetwarzają dochodzące do nich sygnały zgodnie z funkcją aktywacji, a następnie przesyłają je do następnej warstwy sieci,
- warstwa wyjściowa - w tej warstwie neurony przetwarzają dochodzące sygnały w taki sam sposób jak neurony warstwy ukrytej. Wielkości obliczone przez neurony warstwy wyjściowej są wielkościami wyjściowymi sieci neuronowej.

Sieć poddano procesowi uczenia metodą wstecznej propagacji błędu, a następnie została ona przetestowana. Testy wykazały, że błąd względny aproksymacji z wykorzystaniem sieci neuronowej jest zazwyczaj mniejszy niż 10 %. Ocenę adekwatności

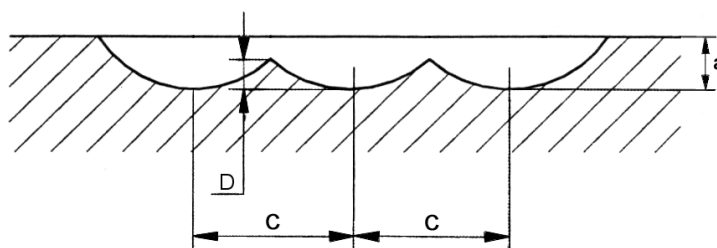


Rys. 5.11. Schemat sieci neuronowej zastosowanej jako funkcja obiektu badań (5 czynników wejściowych).

funkcji obiektu badań w postaci sieci neuronowej przeprowadzono na podstawie testu F - Snedecora. W porównaniu z klasycznym określaniem liczby stopni swobody (liczba stopni swobody jest równa liczbie zmiennych losowych zmniejszonej o liczbę niezależnych związków łączących te zmienne), przy stosowaniu sieci neuronowej liczba niezależnych związków określana jest przez liczbę współczynników wagowych w warstwie wyjściowej sieci. Współczynniki wagowe warstwy ukrytej obliczane są z wykorzystaniem współczynników wagowych warstwy wejściowej (algorytm wstecznej propagacji błędów). Przeprowadzona ocena adekwatności wykazała adekwatność zastosowanych funkcji obiektu badań - sieci neuronowych. Nawet w przypadku adekwatnych równań regresji, błędy aproksymacji były istotnie większe od tych uzyskiwanych w przypadku sieci neuronowych, dlatego też w pracy zostaną przedstawione wyniki aproksymacji neuronowej w postaci wykresów 2 i 3D. Wartości poszczególnych punktów otrzymanych zależności są odpowiedzią danej sieci na określony zbiór czynników wejściowych.

5.3.3. Badania obróbki z wierszowaniem elektrodą roboczą

Badania oraz analiza wyników badań wstępnych umożliwiły określenie obszaru parametrów obróbki USECM - CNC w którym wprowadzenie drgań ultradźwiękowych elektrody roboczej daje wyraźną poprawę wskaźników technologicznych (grubości usuniętego naddatku, wydajności obróbki V_w). W oparciu o otrzymane wyniki zaplanowany został kolejny etap badań obróbki USECM - CNC. Badania zostały przeprowadzone z posuwem poprzecznym elektrody roboczej Rys. 5.12.



Rys. 5.12. Schemat struktury geometrycznej powierzchni po obróbce uniwersalną elektrodą kulistą; a - grubość usuniętego naddatku, c - posuw poprzeczny elektrody, D - wysokość faliści powierzchni.

Badania zostały wykonane na tym samym stanowisku co badania wstępne, jednak został zmieniony sposób dostarczania elektrolitu do szczeliny międzyelektrodowej. Elektrolit podawany był poprzez zaprojektowaną tuleję kierującą (Rys. 5.13).

Biorąc pod uwagę wyniki badań wstępnych, zastosowano stałą początkową grubość szczeliny międzyelektrodowej S_0 , która wynosiła 0.1 mm . Zmieniono również zakres badanych prędkości posuwu elektrody roboczej v_p . Badania zostały wykonane wg planu rotacyjno-uniformalnego typu 2^4 - 31 układów pomiarowych, który obejmował następujące czynniki:

Czynniki badane:

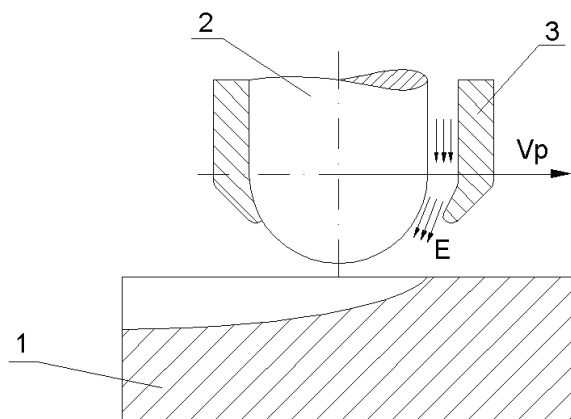
- napięcie międzyelektrodowe: $U = 8 \div 20\text{ V}$,
- prędkość przesuwu elektrody roboczej: $v_p = 30 \div 60\text{ mm/min}$,
- Stosunek przesuwu poprzecznego do promienia elektrody roboczej $c/R = 0.1 \div 0.7$,
- moc ultradźwięków: $P = 30 \div 150\text{ W}$ - odpowiada to amplitudzie drgań elektrody w zakresie $A = 2.73 \div 9.75\text{ }\mu\text{m}$.

Czynniki wynikowe:

- grubość usuniętego naddatku a ,
- wydajność obróbki V_w ,
- wysokość falistości powierzchni D ,
- chropowatość powierzchni Ra, Rz .

Czynniki ustalone:

- promień elektrody roboczej: $R = 5\text{ mm}$ (Rys. 5.8 i 5.9),
- elektrolit: wodny roztwór NaNO_3 ,
- stężenie elektrolitu $C_e = 15\%$,
- ciśnienie elektrolitu na wylocie z dyszy: $p_e = 0.1\text{ MPa}$,
- materiał elektrody: miedź M1,



Rys. 5.13. Sposób dostarczania elektrolitu w badaniach USECM - CNC powierzchni płaskiej z wierszowaniem ER; 1 - przedmiot obrabiany, 2 - elektroda robocza, 3 - tuleja kierująca strugę elektrolitu E, v_p - prędkość przesuwu elektrody.

- materiał obrabiany: stal NC6 obrabiana cieplnie do 50 HRC,
- temperatura elektrolitu: $T_e = 25^\circ C$.

Czynniki zakłócające:

- niedokładność obrabiarki,
- zmienność w czasie właściwości elektrolitu,
- niejednorodność materiału obrabianego.

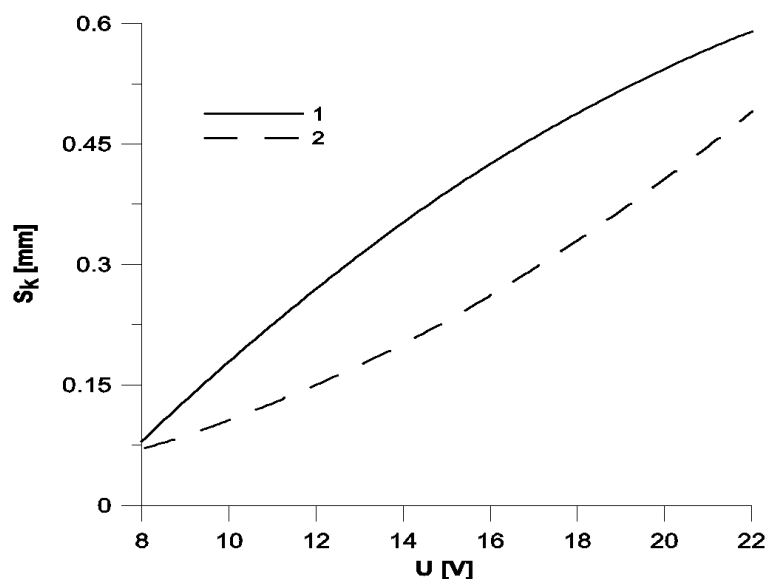
Jako funkcje obiektu badań przyjęto sieć neuronową opisaną w poprzednim paragrafie. Otrzymane wyniki badań poddano takiej samej analizie jak w przypadku badań rozpoznawczych.

5.4. Analiza wyników badań

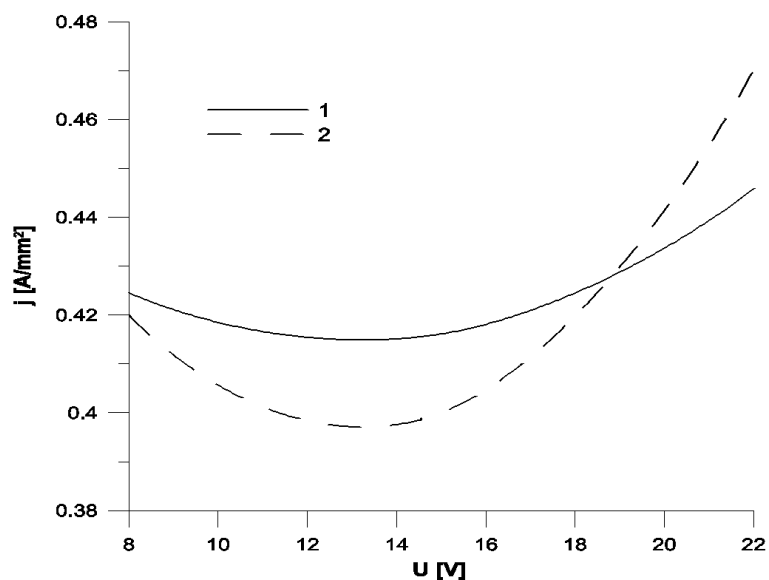
5.4.1. Drażenie USECM

Badania drażenia elektrochemicznego zostały przeprowadzone w celu określenia podstawowych zależności pomiędzy wskaźnikami technologicznymi procesu (S_k , V_w , Ra , Rz) a parametrami drgań ultradźwiękowych (amplituda drgań elektrody roboczej A). W trakcie analizy skoncentrowano się również na zmianach podstawowych parametrów opisujących przebieg procesu roztwarzania elektrochemicznego czyli ηk_v oraz E . Drażenie USECM nie jest głównym tematem pracy jednak otrzymane wyniki mogą okazać się bardzo pomocne przy interpretacji wyników badań USECM - CNC. Aby umożliwić przejrzystą analizę podstawowych zależności związanych z procesem USECM wyniki badań przedstawiono w postaci wykresów dwuczynnikowych. Z przedstawionej na Rys. 5.14 zależności widać, że dla najmniejszych wartości napięcia międzyelektrodowego ($U = 8 V$) grubości szczeliny międzyelektrodowej są praktycznie takie same dla USECM i ECM. Wynikać to może z faktu, że dla małej grubości szczeliny międzyelektrodowej występuje zbyt intensywna kawitacja i towarzyszące jej zjawiska lokalnego wzrostu ciśnienia i temperatury, co prowadzi np. do zmniejszenia współczynnika obrabialności ηk_v , czy wypadkowej przewodności elektrolitu, a tym samym do zmniejszenia grubości szczeliny międzyelektrodowej. Wraz ze wzrostem U grubość szczeliny międzyelektrodowej rośnie, co prowadzi do zmniejszenia intensywności zjawisk kawitacyjnych, a tym samym dominować może efekt depolaryzacji i depasywacji elektrod. Prowadzi to do dalszego zwiększenia grubości szczeliny.

Z zależności $j(U)$ widać, że wraz ze wzrostem napięcia w przedziale $8 \div 18 V$ gęstość prądu najpierw maleje, a potem wzrasta. Przy czym gęstość prądu dla procesu USECM jest większa niż w przypadku drażenia bez wspomaganie ultradźwiękami. Po przekroczeniu wartość $U = 18 V$ gęstość prądu dalej wzrasta, ale jej wartość

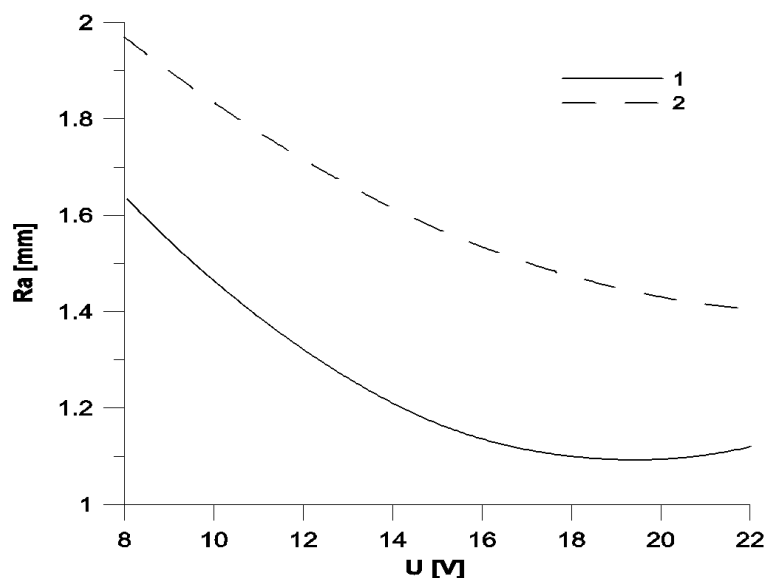


Rys. 5.14. Zależność pomiędzy końcową grubością szczeliny międzyelektrodowej S_k i napięciem międzyelektrodowym U ; prędkość przesuwu elektrody $v_f = 0.8 \text{ mm/min}$, ciśnienie elektrolitu $p_e = 0.3 \text{ MPa}$; 1 - drążenie USECM ($A = 4.8 \text{ }\mu\text{m}$), 2 - drążenie ECM.



Rys. 5.15. Zależność pomiędzy gęstością prądu j i napięciem międzyelektrodowym U ; prędkość przesuwu elektrody $v_f = 0.8 \text{ mm/min}$, ciśnienie elektrolitu $p_e = 0.3 \text{ MPa}$; krzywe 1 i 2 - jak na Rys. 5.14.

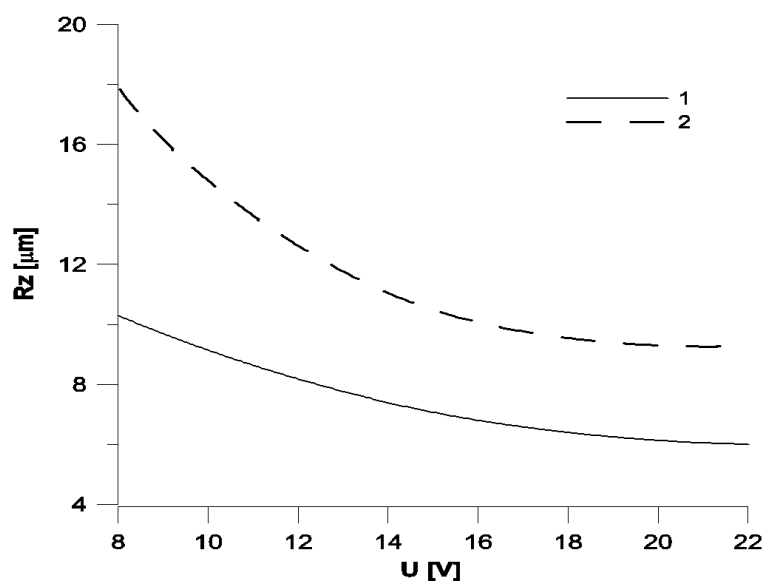
dla klasycznego procesu ECM jest większa Rys. 5.15. Z zależności (5.11) wynika, że wzrost gęstości prądu w przypadku drążenia USECM spowodowany jest zmniejszeniem współczynnika obrabialności ηk_{vUSECM} . Czyli wprowadzenie ultradźwięków może być przyczyną zmniejszenia wydajności prądowej procesu roztwarzania lub równoważnika elektrochemicznego obrabianego materiału.



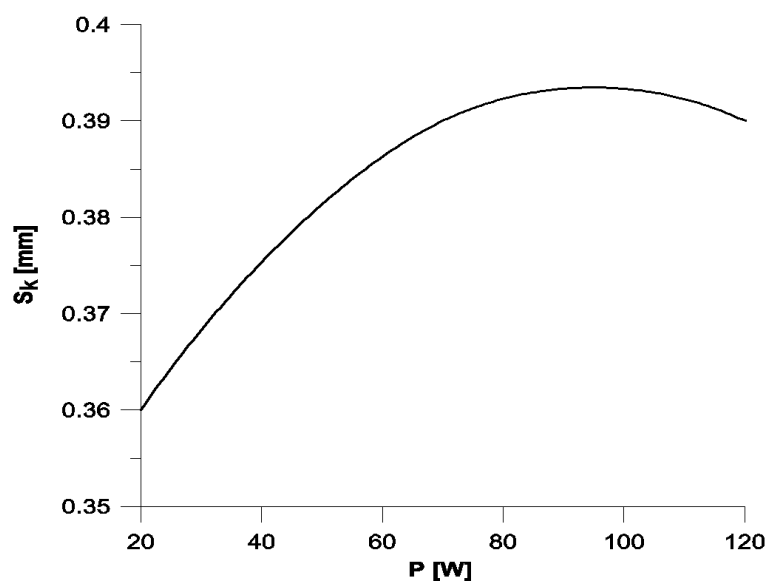
Rys. 5.16. Zależność pomiędzy chropowatością powierzchni R_a i napięciem międzyelektrodowym U ; prędkość przesuwu elektrody $v_f = 0.8 \text{ mm/min}$, ciśnienie elektrolitu $p_e = 0.3 \text{ MPa}$; krzywe 1 i 2 - jak na Rys. 5.14.

Kolejnymi czynnikami badanymi były parametry chropowatości R_a i R_z . Jak pokazują zależności na $R_a(U)$ i $R_z(U)$ chropowatość maleje wraz ze wzrostem napięcia międzyelektrodowego, i jest znacznie mniejsza dla USECM - CNC (Rys. 5.16 i 5.17). Proces USECM przebiega przy większej gęstości prądu, co sprzyja zmniejszaniu chropowatości powierzchni. Równie prawdopodobną przyczyną zmniejszenia chropowatości jest zmniejszenie polaryzacji elektrod, a tym samym grubości warstwy dyfuzyjnej.

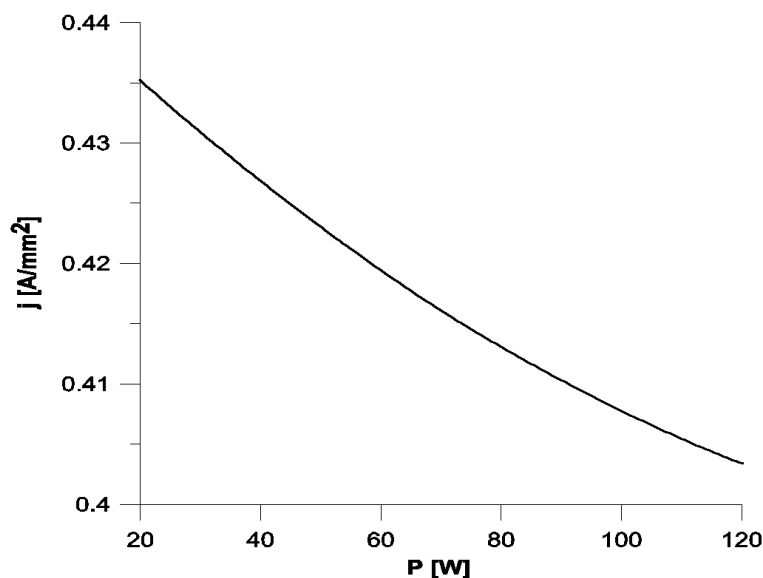
Z Rys. 5.18 wynika, że grubość szczeliny końcowej rośnie wraz ze wzrostem mocy drgań ultradźwiękowych do wartości $P \approx 70 \div 80 \text{ W}$. Dalszy wzrost mocy nie zwiększa grubości szczeliny. Można to wytłumaczyć tym, iż wraz ze wzrostem P maleje polaryzacja elektrod E lub rośnie ηk_v . Z chwilą, gdy polaryzacja E dąży do zera dalszy wzrost mocy już nie zwiększa grubości szczeliny. Wzrost grubości szczeliny międzyelektrodowej może być również związany ze wzrostem przewodności właściwej elektrolitu (np. na skutek wzrostu temperatury spowodowanego drganiami ultradźwiękowymi), jednak biorąc pod uwagę długość szczeliny międzyelektrodowej



Rys. 5.17. Zależność pomiędzy chropowatością powierzchni Rz i napięciem międzyelektrodowym U ; prędkość przesuwu elektrody $v_f = 0.8 \text{ mm/min}$, ciśnienie elektrolitu $p_e = 0.3 \text{ MPa}$; krzywe 1 i 2 - jak na Rys. 5.14.



Rys. 5.18. Zależność pomiędzy końcową grubością szczeliny międzyelektrodowej S_k i mocą drgań ultradźwiękowych P ; napięcie międzyelektrodowe $U = 15 \text{ V}$, prędkość przesuwu elektrody roboczej $v_f = 0.8 \text{ mm/min}$, ciśnienie elektrolitu $p_e = 0.3 \text{ MPa}$.

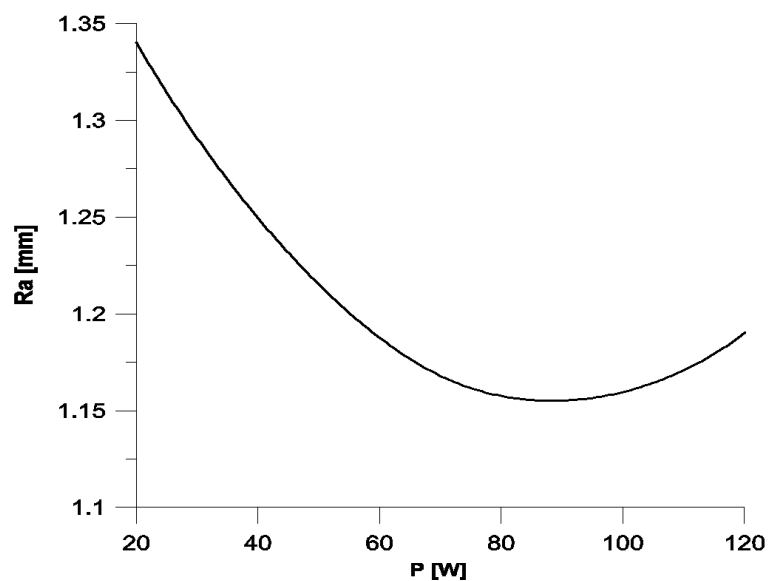


Rys. 5.19. Zależność pomiędzy gęstością prądu j i mocą drgań ultradźwiękowych P dla napięcia międzyelektrodowego $U = 15 V$, prędkości przesuwu elektrody roboczej $v_f = 0.8 \text{ mm/min}$ i ciśnienia elektrolitu $p_e = 0.3 \text{ MPa}$.

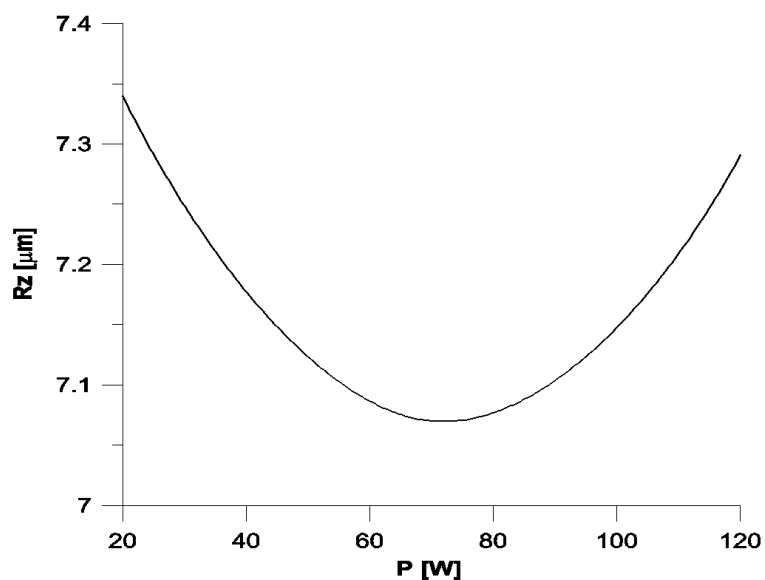
($l = 3 \text{ mm}$) wydaje się to mało prawdopodobne. Niezwykle ważny jest również fakt, że ze wzrostem mocy P maleje gęstość prądu. Wskazuje to, że ze wzrostem mocy wzrasta intensywność występowania zjawiska kawitacji i towarzyszących mu zjawisk wtórnych. Uzyskane wyniki wskazują, że z jednej strony na skutek wzrostu mocy ultradźwięków maleje polaryzacja elektrod, co sprzyja wzrostowi grubości szczeliny międzyelektrodowej, a na skutek właściwości samoregulacyjnych szczeliny nie wpływa istotnie na gęstość prądu. Z tego względu na podstawie zależności (5.11) należy przypuszczać, że zmniejszenie gęstości prądu wynika ze zwiększenia wartości $\eta k_v U S E C M$, co potwierdza Rys. 5.19.

Z wykresów przedstawionych na Rys. 5.20 i 5.21 wynika, że parametry chropowatości powierzchni Ra i Rz zależą od mocy ultradźwięków. Zależności te pokazują, że istnieje optymalna wartość mocy dla której parametry chropowatości przyjmują najmniejsze wartości. Wartość ta odpowiada mocy ultradźwięków przy których grubość szczeliny jest największa (Rys. 5.18) a polaryzacja elektrod jest najmniejsza (Rys. 5.26).

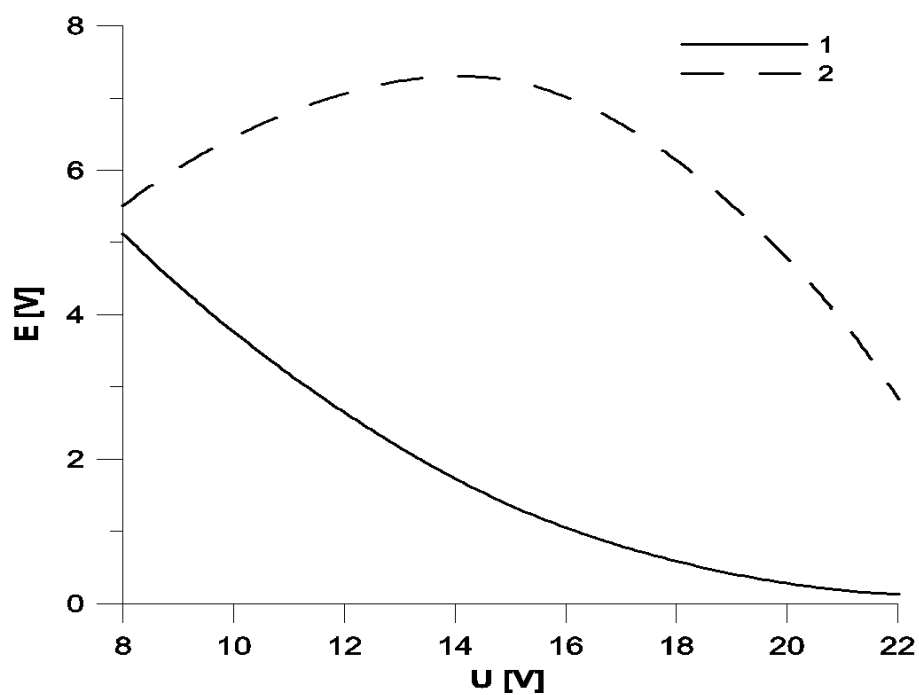
Zmianę współczynnika obrabialności można wyjaśnić zmianą wydajności prądowej procesu roztwarzania na skutek występowania zjawiska kawitacji i jego efektów wtórnych. Z Rys. 5.22 i 5.23 wynika, że polaryzacja elektrod E jest istotnie mniejsza dla przypadku wspomaganie procesu ECM ultradźwiękami. Współczynnik obrabialności (Rys. 5.24 i 5.25) jest mniejszy dla przypadku obróbki ze wspomaganie ul-



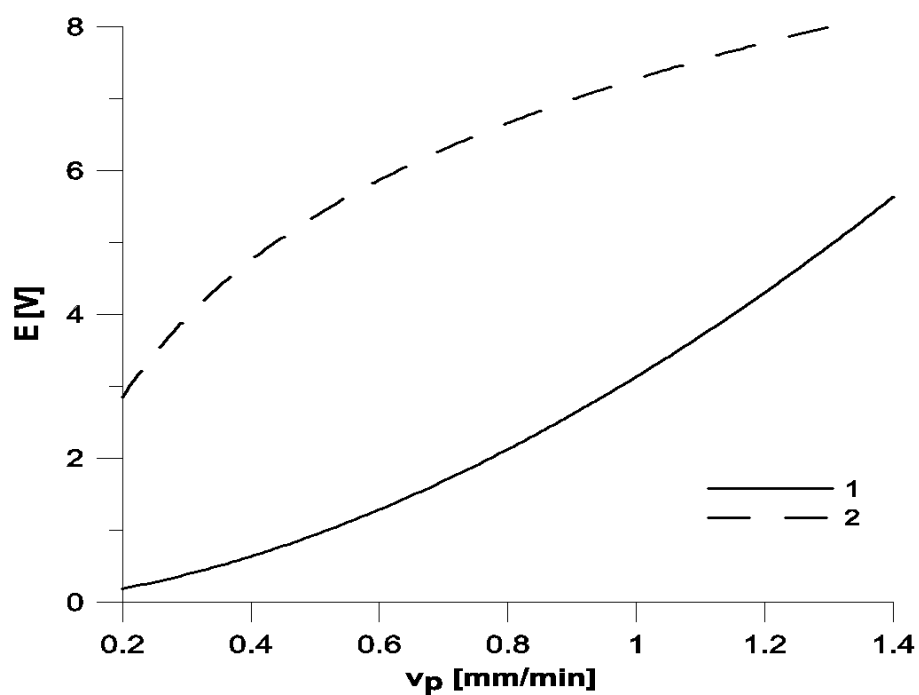
Rys. 5.20. Zależność pomiędzy chropowatością Ra , a mocą drgań ultradźwiękowych P dla napięcia międzyelektrodowego $U = 15 V$, prędkości przesuwu elektrody roboczej $v_f = 0.8 mm/min$ i ciśnienia elektrolitu $p_e = 0.3 MPa$.



Rys. 5.21. Zależność pomiędzy chropowatością Rz , a mocą drgań ultradźwiękowych P dla napięcia międzyelektrodowego $U = 15 V$, prędkości przesuwu elektrody roboczej $v_f = 0.8 mm/min$ i ciśnienia elektrolitu $p_e = 0.3 MPa$.

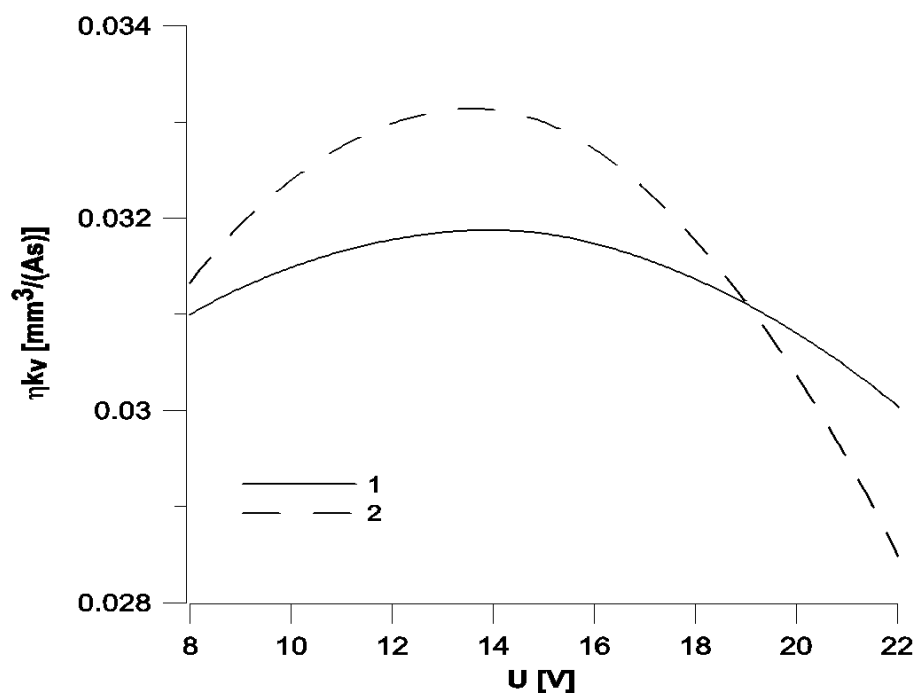


Rys. 5.22. Porównanie zależności $E = f(U)$ dla obróbki USECM (1) i ECM (2);
 $v_f = 0.8 \text{ mm/min}$, $p_e = 0.3 \text{ MPa}$, $P = 70 \text{ W}$.

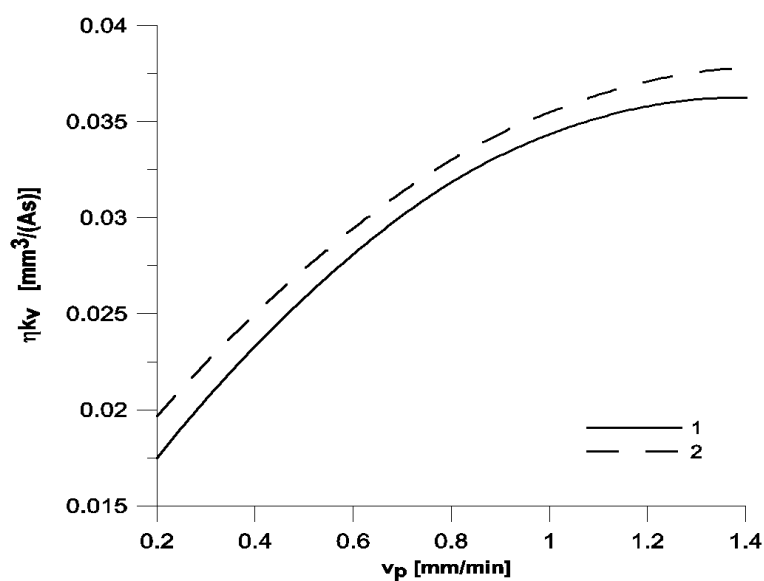


Rys. 5.23. Porównanie zależności $E = f(v_f)$ dla obróbki USECM (1) i ECM (2);
 $U = 15 \text{ V}$, $p_e = 0.3 \text{ MPa}$, $P = 70 \text{ W}$.

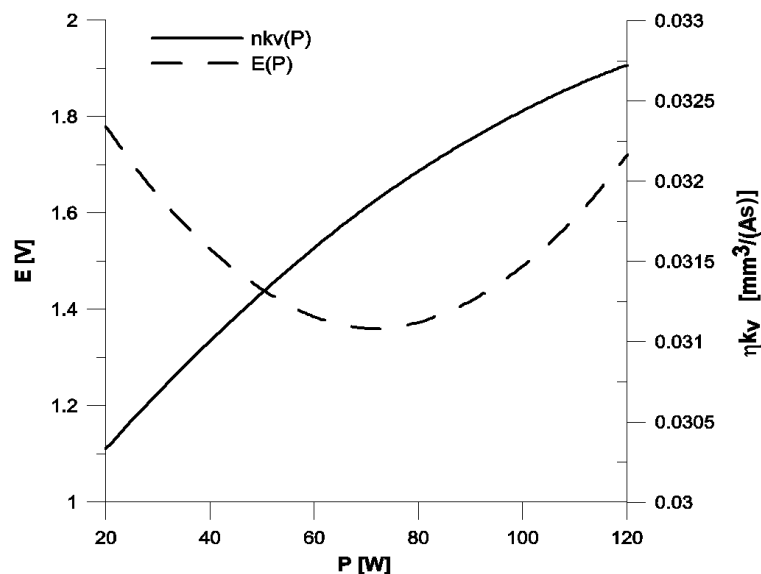
tradzwiąkami, co zgodnie z zależnością (5.8) uzasadnia zwiększenie gęstości prądu w przypadku USECM. Wykresy te jednoznacznie potwierdzają słuszność interpretacji zjawisk zachodzących w szczelinie na podstawie modelu teoretycznego (5.12), (5.13), (5.14)).



Rys. 5.24. Porównanie zależności $\eta k_v = f(U)$ dla obróbki USECM (1) i ECM (2); parametry obróbki jak na Rys. 5.22.

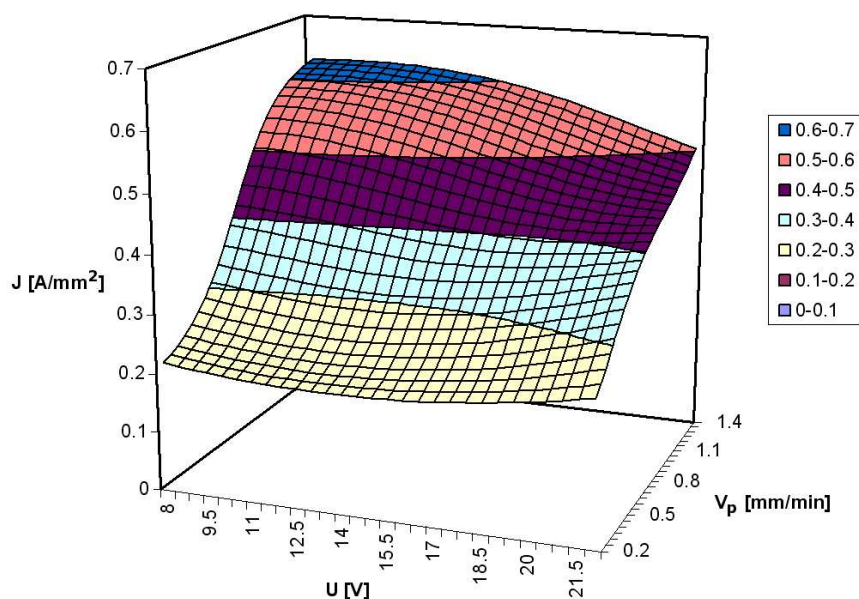


Rys. 5.25. Porównanie zależności $\eta k_v = f(v_f)$ dla obróbki USECM (1) i ECM (2); parametry obróbki jak na Rys. 5.23.

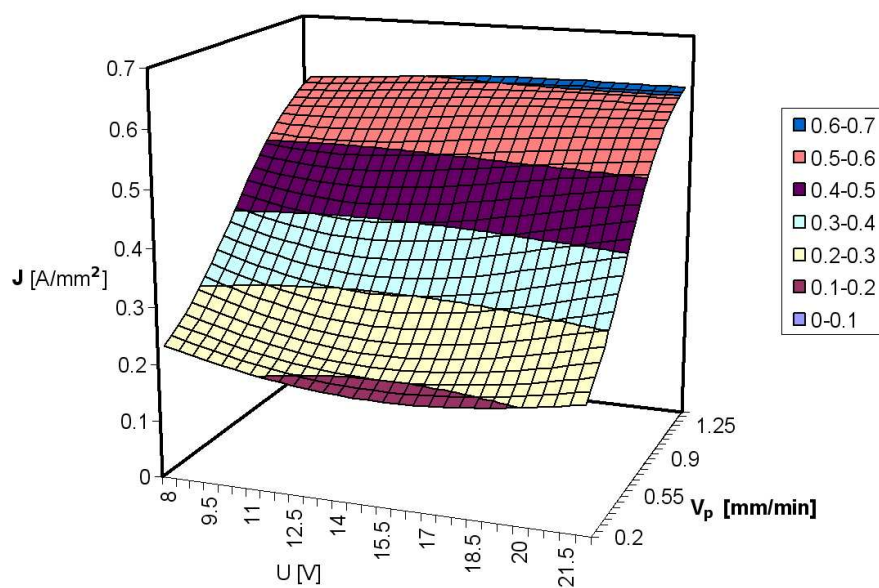
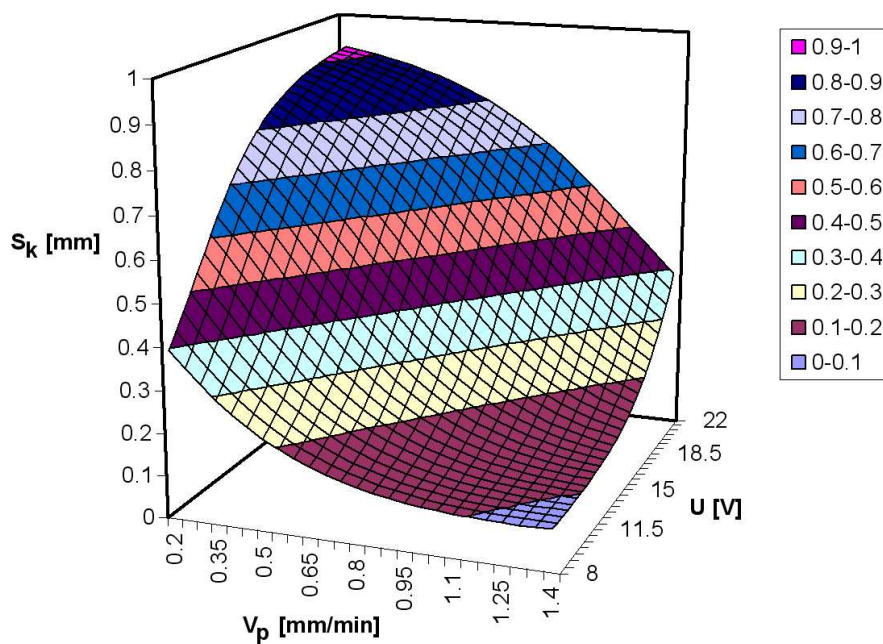


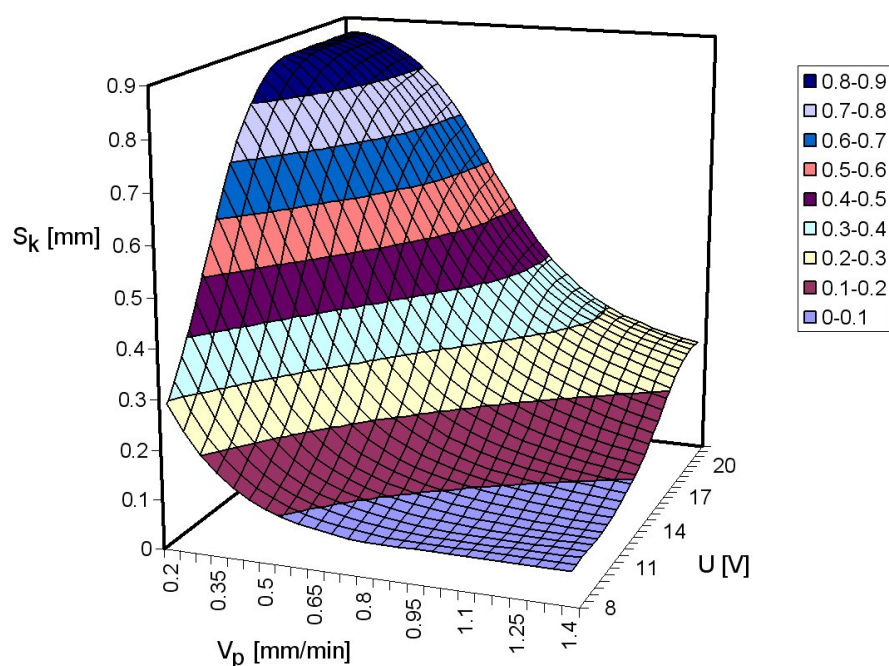
Rys. 5.26. Zależności $E(P)$ oraz $\eta_{kv}(P)$ dla następujących parametrów obróbki:
 $U = 15 V$, $v_f = 0.8 \text{ mm/min}$, $p_e = 0.3 \text{ MPa}$.

Dotychczasowe rozważania umożliwiły wyjaśnienie wpływu mocy drgań ultradźwiękowych elektrody na wskaźniki technologiczne procesu. Intensywność opisanych zjawisk, a tym samym i wyniki obróbki zależą od prędkości przesuwu elektrody (v_f) i napięcia międzyelektrodowego (U). Doboru optymalnych wartości P , U i v_f można dokonać na podstawie sieci neuronowych lub równań regresji. Poniżej przedstawiono przykłady wykresów przestrzennych wykonanych w oparciu o sieci neuronowe.



Rys. 5.27. Zależność $j = f(v_f, U)$ dla obróbki USECM, $P = 70 \text{ W}$.

Rys. 5.28. Zależność $j = f(v_f, U)$ dla obróbki bez drgań ultradźwiękowych.Rys. 5.29. Zależność $S_k = f(v_f, U)$ dla obróbki USECM, $P = 70$ W.



Rys. 5.30. Zależność $S_k = f(v_f, U)$ dla obróbki bez drgań ultradźwiękowych.

Podsumowując powyższe rozważania można stwierdzić, że zastosowanie drgań ultradźwiękowych elektrody w procesie drażenia elektrochemicznego (USECM) umożliwia zwiększenie wydajności obróbki oraz poprawę jakości warstwy wierzchniej przez zmniejszenie chropowatości powierzchni.

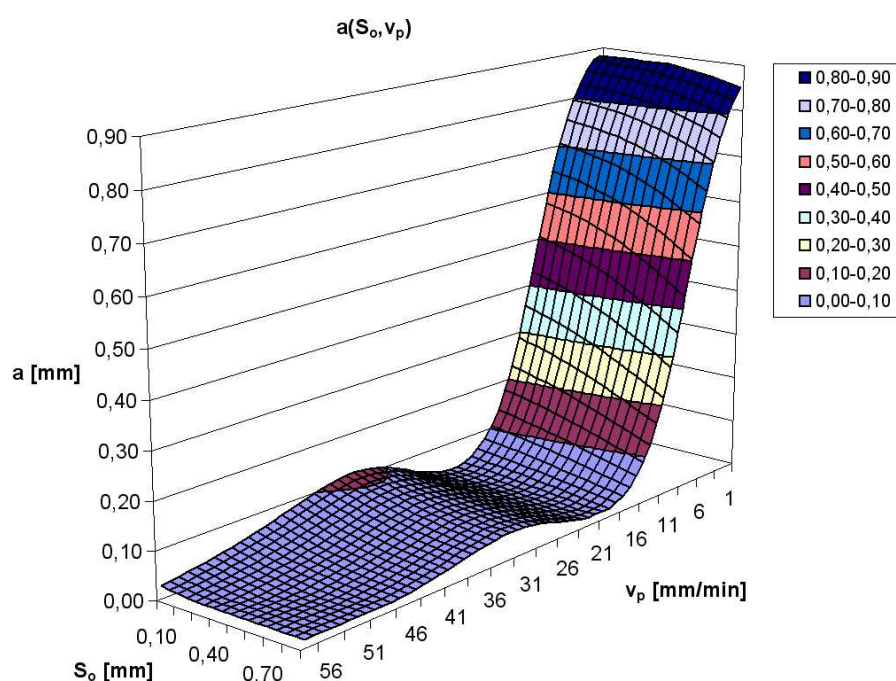
5.4.2. Obróbka USECM - CNC

Elektroda kulista

Poniżej przedstawione zostaną wyniki analizy danych doświadczalnych dla obróbki elektrodą kulistą. Jak widać z Rys. 5.31 i 5.32 szczególnie istotny wpływ prędkości przesuwu elektrody v_p występuje w przedziale $1 \div 20 \text{ mm/min}$. Również wraz ze zwiększeniem S_o maleje a , co wynika ze zmniejszenia intensywności roztwarzania. Porównując zależności $a(v_p, S_o)$ dla ECM - CNC (Rys. 5.31) i USECM - CNC (Rys. 5.32) widać, że możliwy jest taki dobór parametrów procesu USECM - CNC, dla których następuje wyraźna intensyfikacja roztwarzania, co w rezultacie daje zwiększenie grubości usuniętego naddatku a . Ma to miejsce dla wartości $v_p = 30 \div 59 \text{ mm/min}$ i $S_o = 0.1 \div 0.5 \text{ mm}$. Ze wzoru na lokalną prędkość roztwarzania:

$$v_r = \eta k_v \kappa \frac{U - E}{S} \quad (5.19)$$

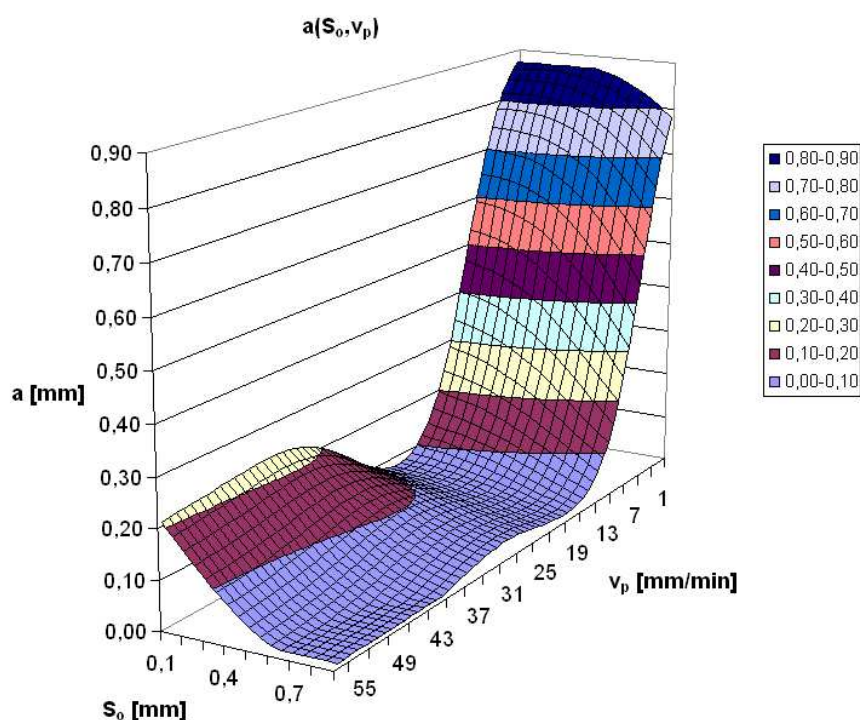
wynika, że dla takich samych warunków prowadzenia procesu (v_p , U), zwiększenie grubości usuniętego naddatku a jest wynikiem zmian wartości ηk_v , E lub κ . W trakcie prowadzenia obróbki drgającą elektrodą, podobnie jak w przypadku drążenia elektrochemicznego, obserwowano wzrost gęstości prądu w porównaniu z próbami ECM - CNC. Potwierdza to przypuszczenie o wpływie drgań ultradźwiękowych na obrabialność elektrochemiczną ηk_v i spadek potencjałów na elektrodach E . Prawdopodobnie wprowadzenie drgań elektrody wpływa na poprawę przepływu elektrolitu co skutkuje szybszą ewakuacją produktów roztwarzania z obszaru granicy faz anoda - elektrolit.



Rys. 5.31. Zależność grubości usuniętego naddatku a od prędkości przesuwu elektrody roboczej v_p i grubości szczeliny początkowej S_o dla elektrody kulistej;

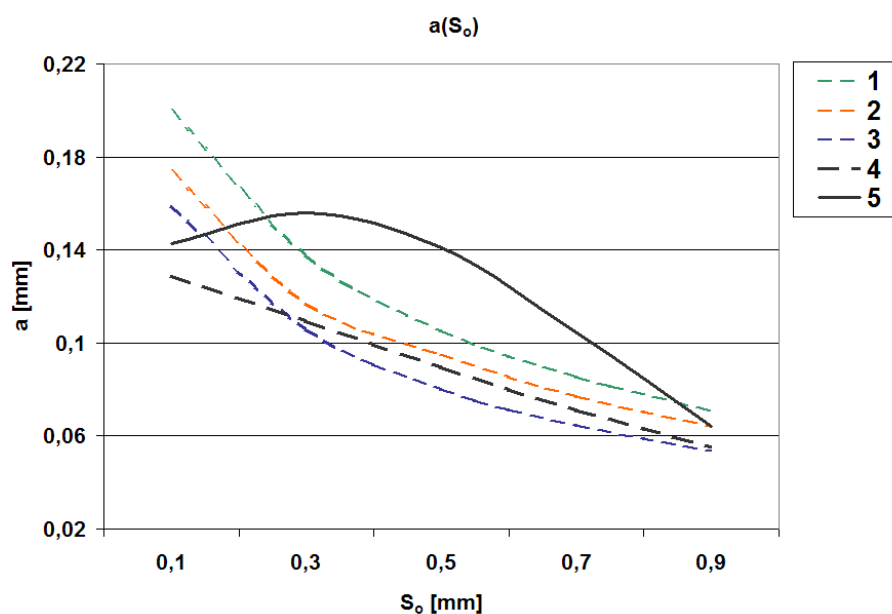
$$U = 14 \text{ V}, Ce = 17.5 \%, \text{ bez drgań US.}$$

Na Rys. 5.33 przedstawiono porównanie zależności $a(S_o)$ dla dwóch badanych odmian obróbki oraz dla różnych wartości E (krzywe otrzymane z symulacji komputerowej). Dla wartości S_o pomiędzy $0.1 \div 0.5 \text{ mm}$ wartości a otrzymane w wyniku obróbki z ultradźwiękami są nawet większe od otrzymanych z symulacji dla $E = 0 \text{ V}$, co może wskazywać, że drgania ultradźwiękowe nie powodują tylko zmniejszenia E , ale również poprawiają obrabialność elektrochemiczną ηk_v . Zmniejszenie się a dla $S_o < 0.3 \text{ mm}$ wynika prawdopodobnie z niekorzystnych warunków hydrodynamicznych panujących w strefie obróbki (zbyt duża intensyfikacja zjawisk kawitacyjnych). Różnice w kształcie przekrojów powierzchni obrabianej dla ECM - CNC i



Rys. 5.32. Zależność grubości usuniętego nadkładu a od prędkości przesuwu elektrody roboczej v_p i grubości szczeliny początkowej S_o dla elektrody kulistej;

$$U = 14 \text{ V}, C_e = 17.5 \%, P = 90 \text{ W}.$$

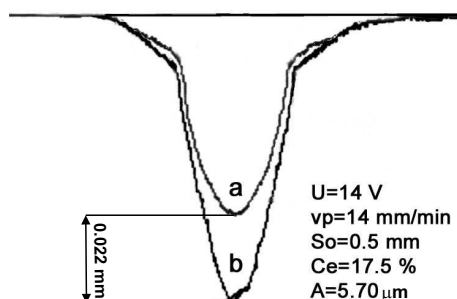


Rys. 5.33. Porównanie zależności $a(S_o)$ dla $U = 20 \text{ V}$, $C_e = 17.5$, $v_p = 30 \text{ mm/min}$; 1 - krzywa otrzymana z symulacji dla $E = 0 \text{ V}$, 2 - krzywa z symulacji dla $E = 3 \text{ V}$,

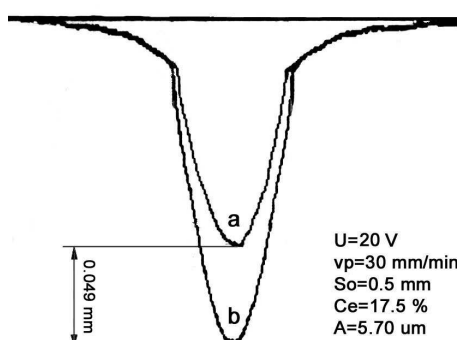
3 - krzywa z symulacji dla $E = 5 \text{ V}$; 4 - ECM - CNC,

5 - USECM - CNC ($P = 90 \text{ W}$).

USECM - CNC (Rys. 5.34 i 5.35), które mają charakter taki jak różnice pomiędzy przekrojami dla różnych E (Rys. 3.12) potwierdzają słuszność przypuszczenia, że ultradźwięki powodują zmniejszenie E .



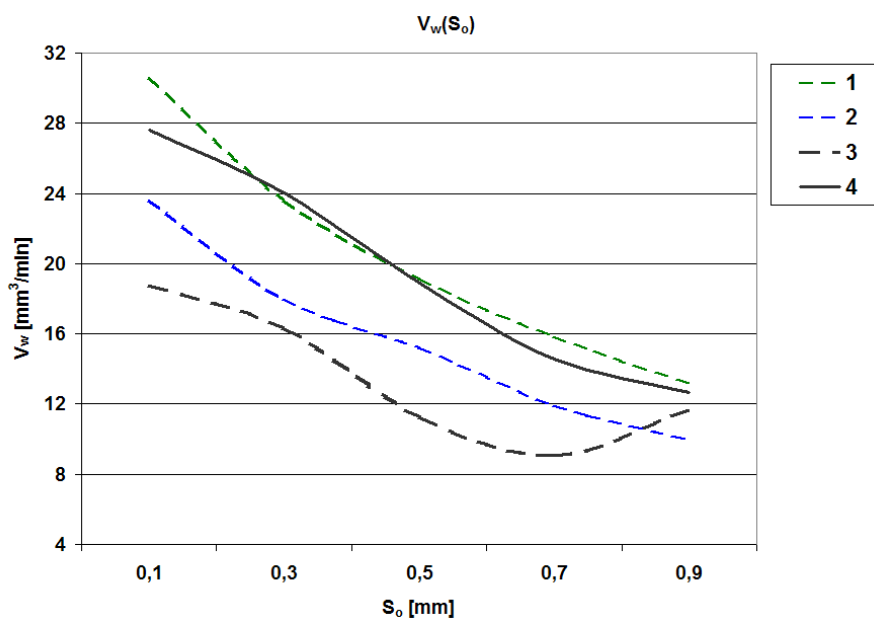
Rys. 5.34. Porównanie przekrojów powierzchni obrabianej dla ECM - CNC (a) i USECM - CNC (b).



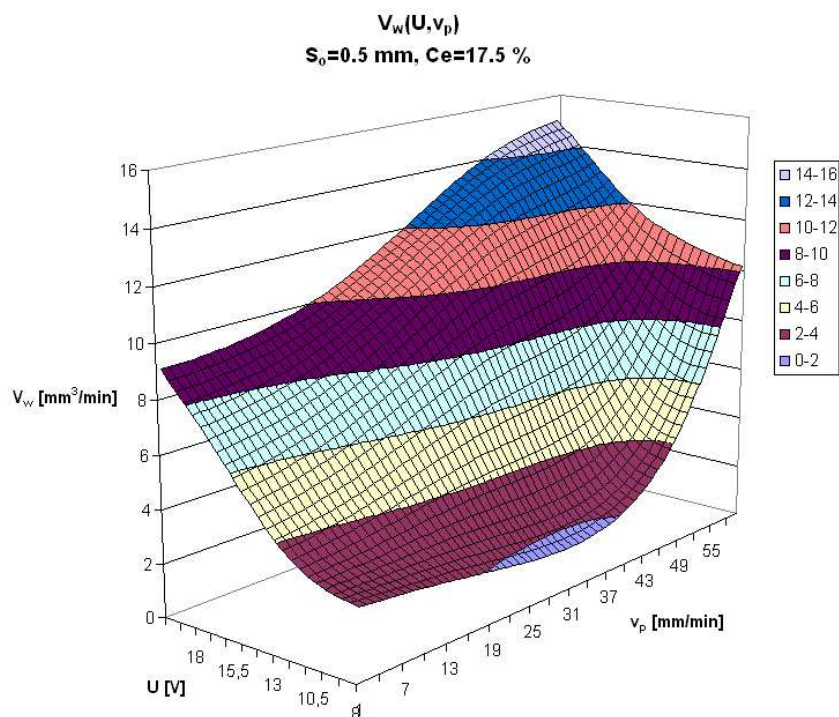
Rys. 5.35. Porównanie przekrojów powierzchni obrabianej dla ECM - CNC (a) i USECM - CNC (b).

Kolejnym badanym wskaźnikiem technologicznym była wydajność obróbki V_w , która w przypadku obróbki elektrochemicznej elektrodą uniwersalną jest znacząco mniejsza niż w przypadku drążenia elektrochemicznego. Ogranicza to znacznie obszar zastosowania obróbki USECM - CNC. Przedstawione na Rys. 5.36 zależności $V(S_o)$ pokazują, że wprowadzenie drgań do szczeliny międzyelektrodowej znacznie poprawia wydajność obróbki. Widoczne jest to zwłaszcza dla małych wartości S_o . Krzywa $V_w(S_o)$ otrzymana z badań USECM - CNC pokrywa się z krzywą $V_w(S_o)$ otrzymaną z symulacji komputerowej dla $E = 0$ V, co również potwierdza, że wprowadzenie drgań ultradźwiękowych do szczeliny międzyelektrodowej zmniejsza spadek potencjału na anodzie i katodzie.

Kolejnym badanym wskaźnikiem technologicznym była chropowatość powierzchni. Analiza wyników pokazała, że pomimo wzrostu gęstości prądu dla USECM - CNC,



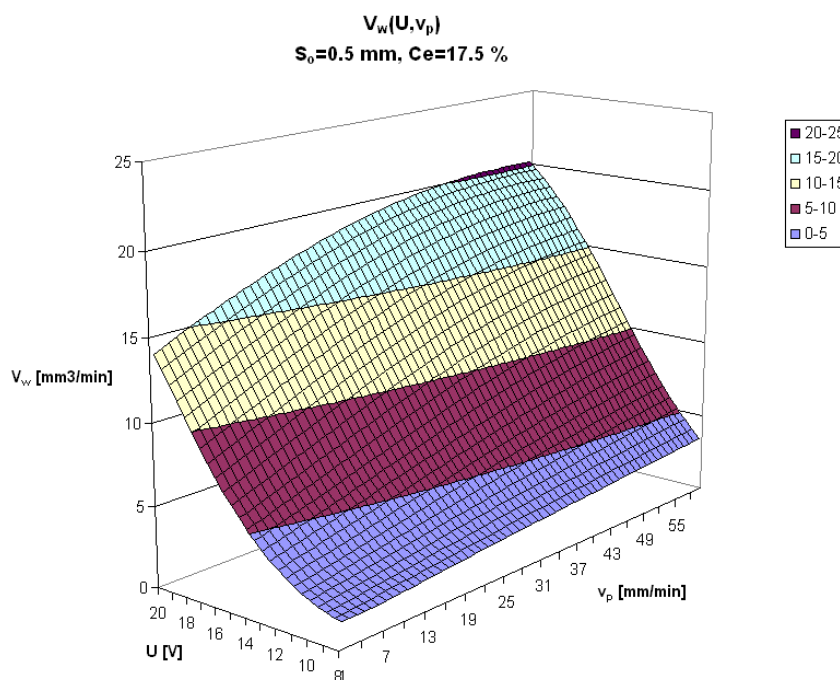
Rys. 5.36. Zależności $V_w(S_o)$ dla $U = 20 V$, $Ce = 17.5 \%$, $v_p = 30 mm/min$; 1 - krzywa otrzymana z symulacji dla $E = 0 V$, 2 - krzywa otrzymana z symulacji dla $E = 5 V$, 3 - krzywa z analizy wyników badań ECM - CNC, 4 - krzywa z analizy wyników badań USECM - CNC.



Rys. 5.37. Zależność wydajności obróbki V_w od prędkości przesuwu elektrody roboczej v_p i napięcia U dla elektrody kulistej, $S_o = 0.5 mm$, $Ce = 17.5 \%$, bez drgań US.

chropowatość dla obróbki z ultradźwiękami jest nawet nieznacznie większa (dla $S_o > 0.3 \text{ mm}$) niż dla prób bez ultradźwięków (Rys. 5.39). W teorii ECM mechanizm wygładzania wynika z różnic pomiędzy prędkością roztwarzania dla zagłębień i wierzchołków chropowatości. Produkty procesu roztwarzania mają tendencję do gromadzenia się na dnach nierówności, co powoduje, że warunki procesu roztwarzania ($\eta k_v, \kappa, E$) są różne dla dna i wierzchołków chropowatości. Podczas ECM - CNC wspomaganą ultradźwiękami *mikro - strugi* powstające w wyniku zapadania się pęcherzyków kawitacyjnych powodują wyrównanie się warunków roztwarzania, co w rezultacie powoduje nawet niewielki wzrost chropowatość dla powierzchni obrabianej elektrochemicznie ze wspomaganie ultradźwiękowym. Jest to zupełnie inna sytuacja, niż w przypadku drażenia, gdzie ultradźwięki wyraźnie poprawiają jakość warstwy wierzchniej. Prawdopodobnie wynika to z różnicy pomiędzy wartościami chropowatości dla drażenia ($Ra > 1 \mu\text{m}$, $Rz > 7 \mu\text{m}$) i obróbki elektrodą uniwersalną ($Ra \approx 0.5 \mu\text{m}$, $Rz \approx 4 \mu\text{m}$). Zdecydowanie większe nierówności powierzchni dla USECM powodują, że napływ świeżego elektrolitu jest niewystarczający i efekt wyrównania się prędkości roztwarzania dla wierzchołków i zagłębień chropowatości nie występuje.

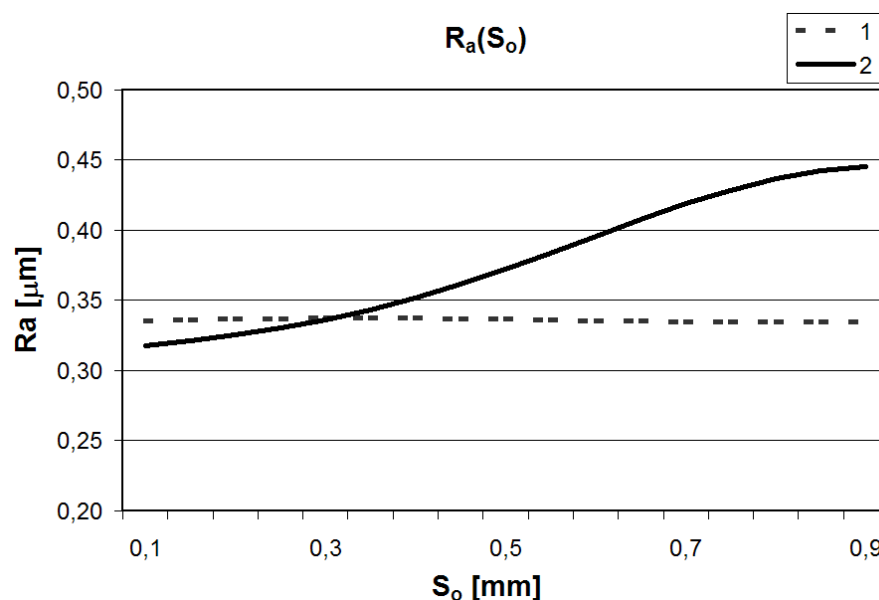
Z zależności $Ra(U, S_o)$ przedstawionych na Rys. 5.40 i 5.41 widać że chropowatość rośnie wraz z grubością szczeliny międzyelektrodowej. Dla ECM - CNC wraz ze



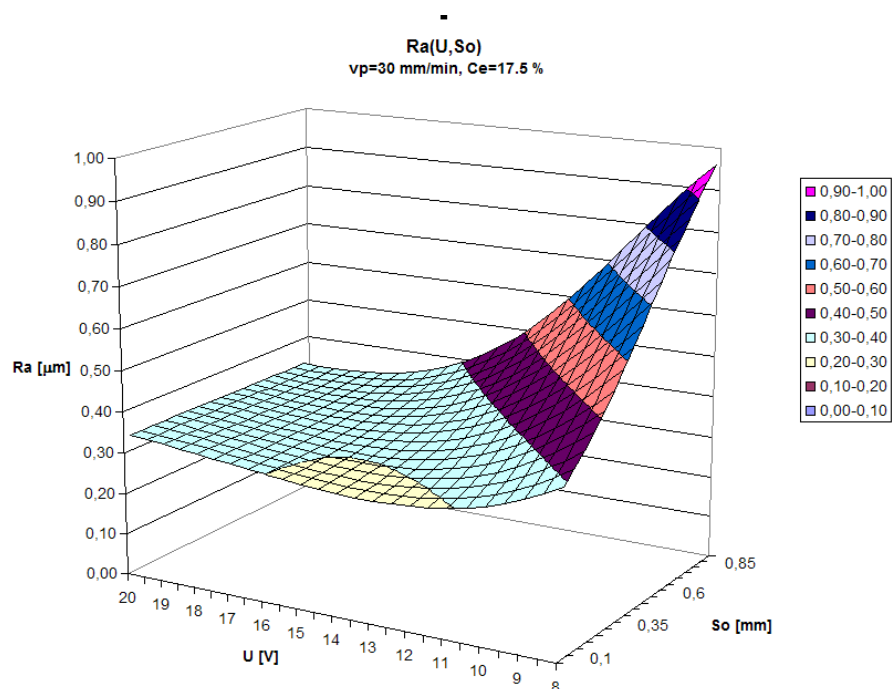
Rys. 5.38. Zależność wydajności obróbki V_w od prędkości przesuwu elektrody roboczej v_p i napięcia U dla elektrody kulistej, $S_o = 0.5 \text{ mm}$, $Ce = 17.5 \%$, $P = 90 \text{ W}$.

zmniejszaniem napięcia międzyelektrodowego wartość chropowatości maleje. Spowodowane to jest zmniejszeniem grubości szczeliny międzyelektrodowej i problemami z dostarczeniem i wymianą elektrolitu w szczeliny międzyelektrodowej. W przypadku obróbki USECM - CNC widać korzystny wpływ ultradźwięków - szczególnie dla niewielkich wartości napięcia międzyelektrodowego.

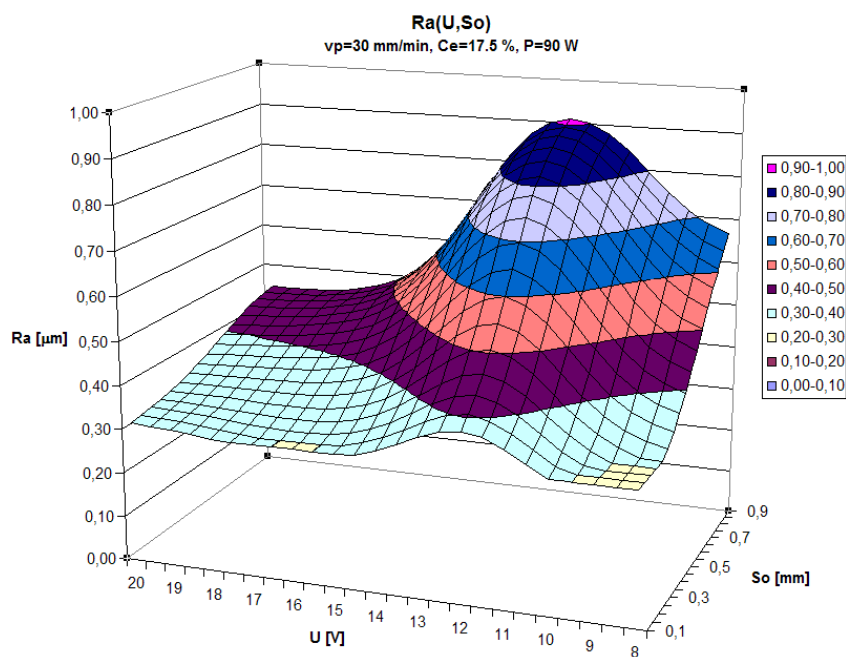
Jednym z następstw zjawisk kawitacyjnych, powstałych w wyniku oddziaływania ultradźwięków mogą być m.in. reakcje sonochemiczne [119]. Terminem tym określa się zjawiska chemiczne zachodzące w polu ultradźwiękowym. Z punktu widzenia roztworzenia elektrochemicznego najważniejsze z nich to przyspieszenie reakcji konwencjonalnych oraz procesy redukcji w roztworach wodnych [59]. Dlatego też w trakcie badań rozpoznawczych jednym z badanych czynników było stężenie elektrolitu, co umożliwiło analizę wpływu drgań ultradźwiękowych na przebieg reakcji chemicznych zachodzących w szczeliny międzyelektrodowej. Z porównania zależności $Ra(U, Ce)$ (Rys. 5.42 i 5.43) dla obu badanych procesów wynika, że chropowatość maleje wraz ze wzrostem stężenia elektrolitu Ce i zwiększaniem napięcia międzyelektrodowego. Najmniejsza wartość chropowatości dla obu przypadków jest na poziomie $\approx 0.3 \mu m$. Wraz ze wzrostem stężenia elektrolitu zmienia się napięcie przy którym chropowatość osiąga wartość maksymalną. Dla $Ce = 25 \%$ maksimum Ra jest dla $U \approx 10 V$, natomiast dla $Ce = 10 \%$ maksimum Ra jest dla $U \approx 16 V$.



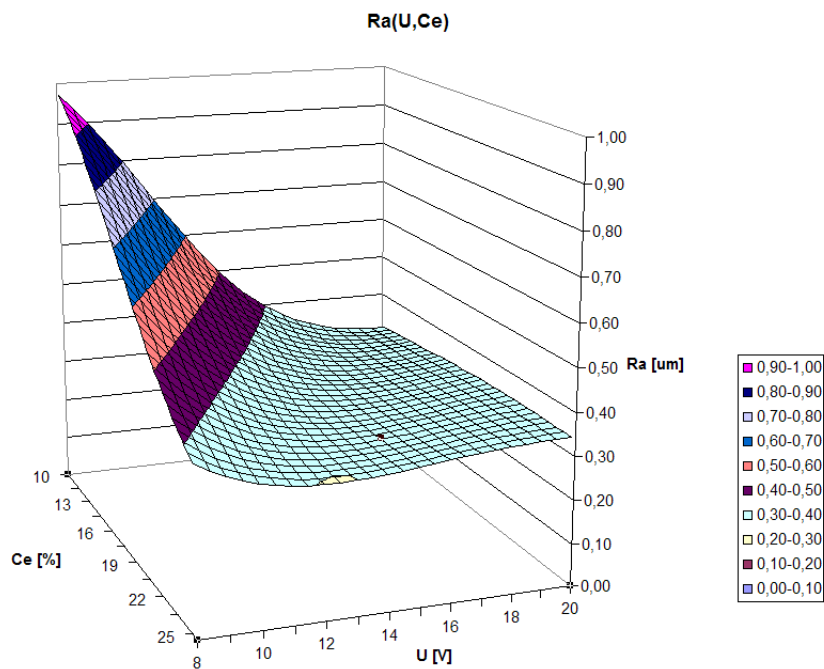
Rys. 5.39. Zależności $Ra(S_o)$ dla dwóch badanych odmian obróbki; 1 - krzywa dla obróbki ECM - CNC, 2 - krzywa dla USECM - CNC; $U = 20 V$, $v_p = 30 mm/min$, $Ce = 17.5 \%$, $P = 90 W$.



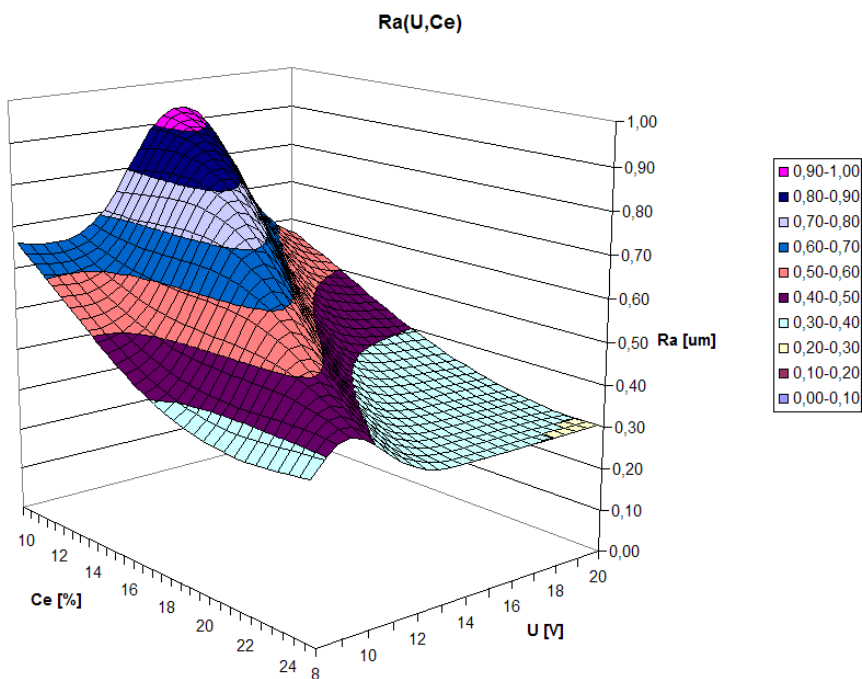
Rys. 5.40. Zależności $Ra(U, S_o)$ dla obróbki ECM - CNC; $v_p = 30 \text{ mm/min}$,
 $Ce = 17.5 \%$, bez drgań ER.



Rys. 5.41. Zależności $Ra(U, S_o)$ dla obróbki USECM - CNC; $v_p = 30 \text{ mm/min}$,
 $Ce = 17.5 \%$, $P = 90 \text{ W}$.



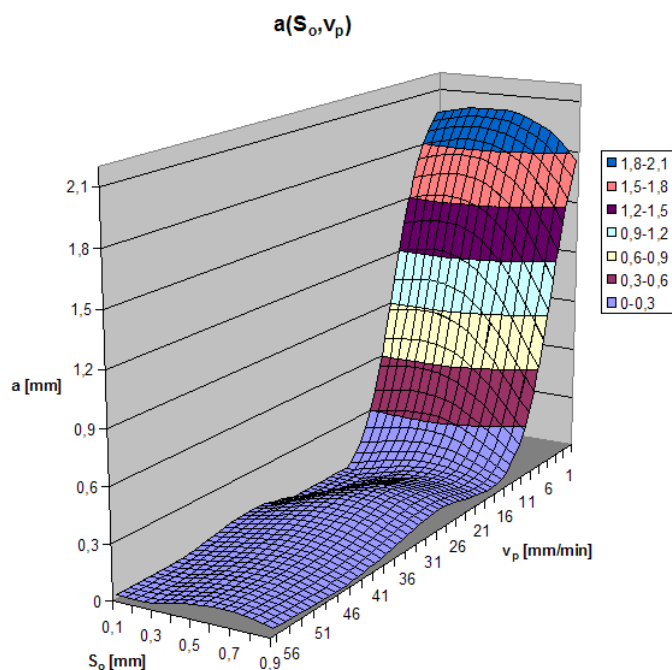
Rys. 5.42. Zależności $Ra(U, Ce)$ dla obróbki ECM - CNC; $v_p = 30 \text{ mm/min}$,
 $U = 14 \text{ V}$, bez drgań ER.



Rys. 5.43. Zależności $Ra(U, Ce)$ dla obróbki USECM - CNC; $v_p = 30 \text{ mm/min}$,
 $U = 14 \text{ V}$, $P = 90 \text{ W}$.

Elektroda płaska

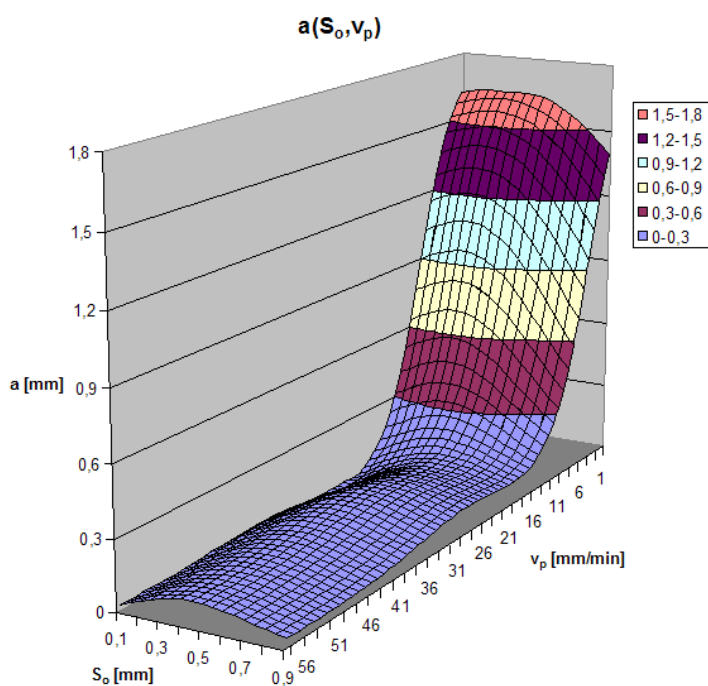
Poniżej przedstawiono wyniki analizy danych doświadczalnych dla obróbki drgającą elektrodą walcową. Z zależności $a(S_o, v_p)$ (Rys. 5.44 i 5.45) widać, że w przypadku elektrody walcowej o promieniu $R = 5 \text{ mm}$ wpływ ultradźwięków nie jest tak wyraźny jak w przypadku elektrody z częścią roboczą w kształcie czaszy kulistej. Z przedstawionych na Rys. 5.44 i 5.45 zależności wynika, że dla wartości S_o poniżej 0.3 mm grubość usuniętego naddatku jest bliska zeru, czyli roztwarzanie praktycznie nie ma miejsca. Ma to związek ze złymi warunkami hydrodynamicznymi w szczeliny międzyelektrodowej. Kształt czoła elektrody roboczej powoduje, że utrudnione jest doprowadzenie elektrolitu do obszaru roztwarzania elektrochemicznego. Doprowadzenie elektrolitu poprzez dyszę sprawdza się jedynie dla małych powierzchni elektrod.



Rys. 5.44. Zależność grubości usuniętego naddatku a od prędkości przesuwu elektrody roboczej v_p i grubości szczeliny początkowej S_o dla elektrody płaskiej;

$$U = 14 \text{ V}, Ce = 17.5 \text{ \%}.$$

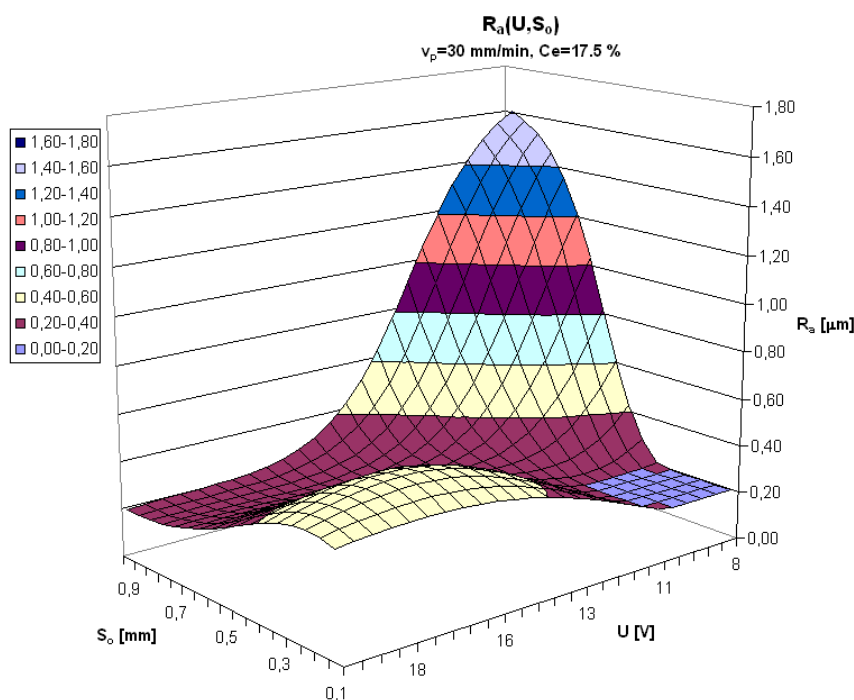
Przypuszczenie o niekorzystnych warunkach hydrodynamicznych lub nawet lokalnych brakach elektrolitu potwierdzają zależności chropowatości od napięcia międzyelektrodowego U i grubości szczeliny początkowej S_o (Rys. 5.46 i 5.47). W zakresie niewielkich wartości S_o ($0.1 \div 0.5 \text{ mm}$) oraz dla wartości napięcia U w przedziale $14 \div 20 \text{ V}$ obserwujemy lokalny wzrost chropowatości co potwierdza, że w tym za-



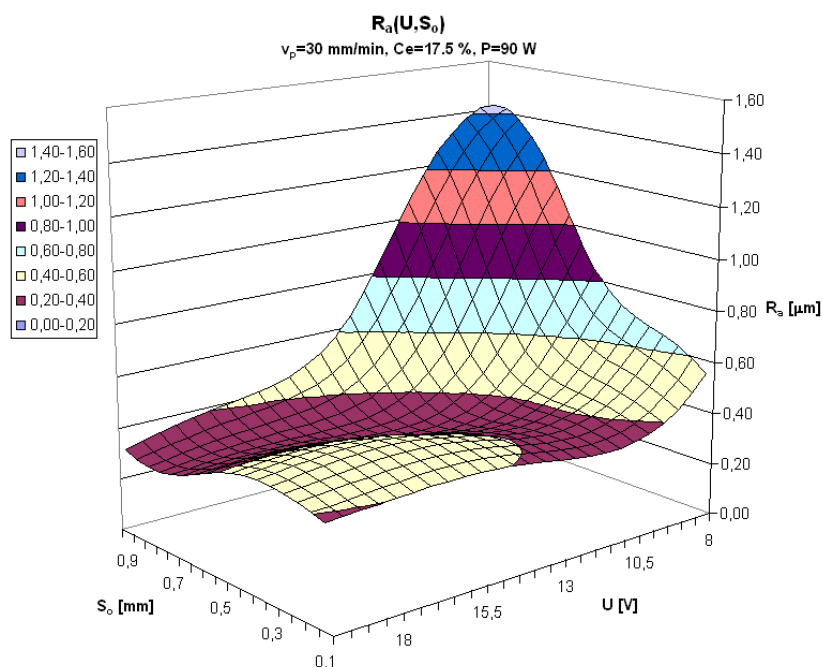
Rys. 5.45. Zależność grubości usuniętego naddatku a od prędkości przesuwu elektrody roboczej v_p i grubości szczeliny początkowej S_o dla elektrody płaskiej;
 $U = 14 V$, $Ce = 17.5 \%$, $P = 90 W$.

kresie parametrów U i S_o powstają nieoptymalne warunki roztwarzania elektrochemicznego.

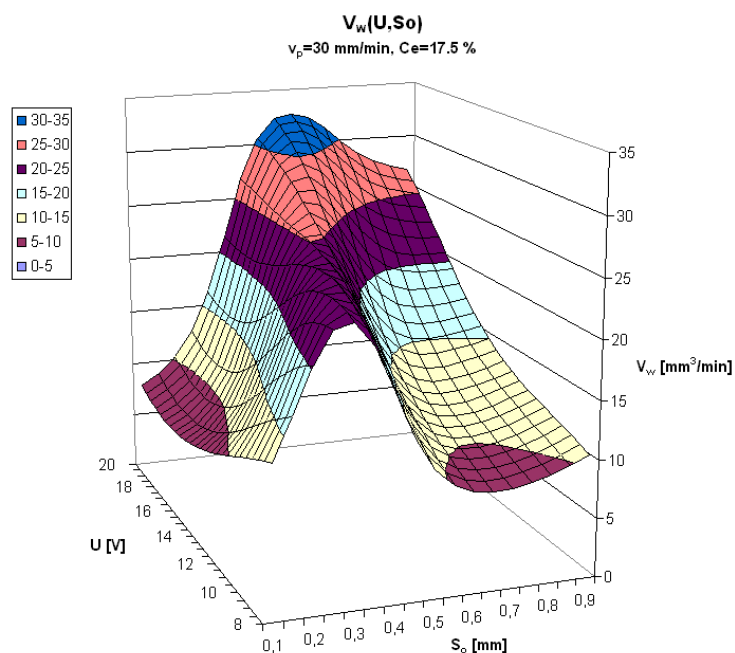
Na Rys Rys. 5.48 i 5.49, gdzie przedstawiono zależności wydajności obróbki $V_w(U, S_o)$, widać, że we wspomnianym wyżej obszarze, wbrew temu co mówi teoria ECM, obserwujemy znaczny spadek wydajności V_w . Następuje całkowita zmiana jakościowa przebiegu procesu. Obserwowany spadek wydajności wraz ze wzrostem napięcia U zdaje się również potwierdzać przypuszczenie o nieodpowiednich warunkach hydrodynamicznych, które są niewystarczające do usunięcia produktów roztwarzania elektrochemicznego ze szczeliny międzyelektrodowej. Prawdopodobnie przyjęty w badaniach sposób dostarczania elektrolitu, relatywnie duża powierzchnia (78.5 mm^2) i kształt szczeliny międzyelektrodowej są głównymi przyczynami takiego charakteru wymienionych wyżej zależności. W związku z tym również nie obserwujemy znacznych różnic pomiędzy obróbką bez i z ultradźwiękami.



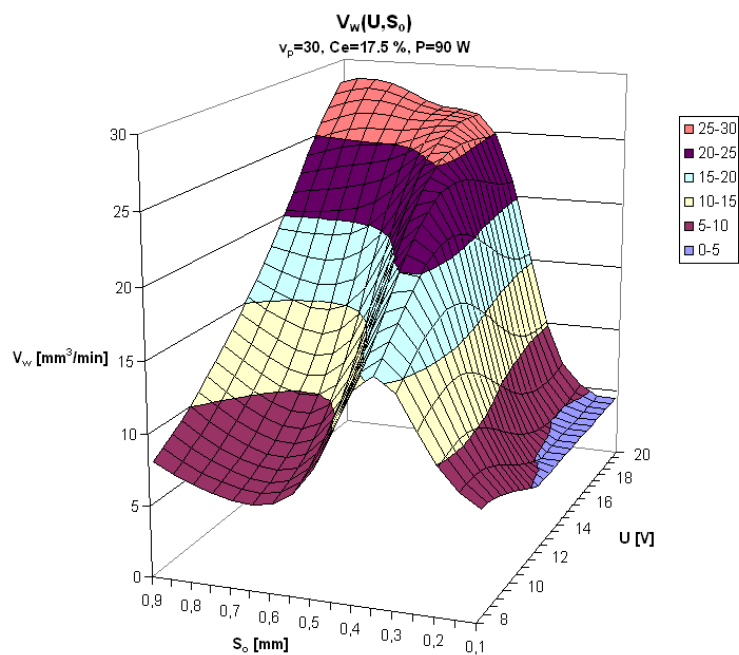
Rys. 5.46. Zależność chropowatości powierzchni R_a od napięcia międzyelektrodowego U i grubości szczeliny początkowej S_o dla elektrody płaskiej, $v_p = 30 \text{ mm/min}$, $Ce = 17.5 \%$, bez drgań US.



Rys. 5.47. Zależność chropowatości powierzchni R_a od napięcia międzyelektrodowego U i grubości szczeliny początkowej S_o dla elektrody płaskiej, $v_p = 30 \text{ mm/min}$, $Ce = 17.5 \%$, $P = 90 \text{ W}$.



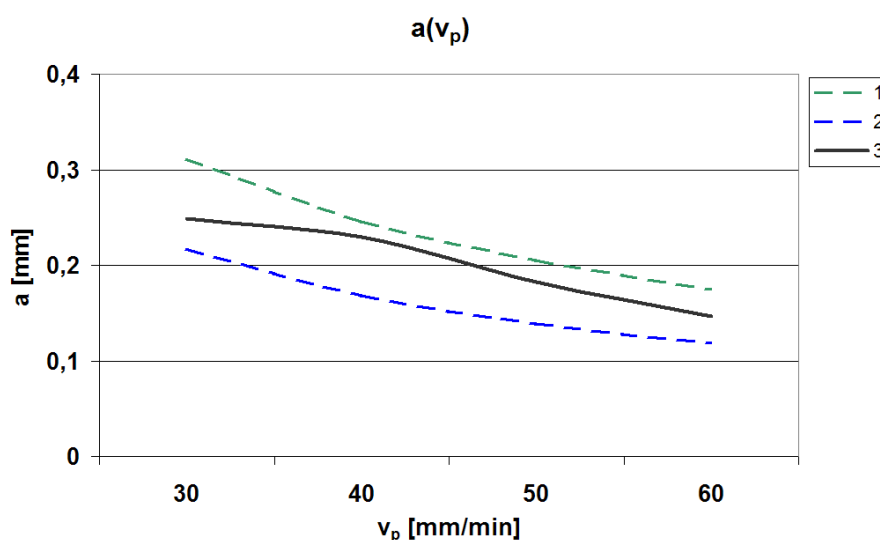
Rys. 5.48. Zależność wydajności obróbki V_w od prędkości przesuwu elektrody roboczej v_p i napięcia U dla elektrody płaskiej, $S_o = 0.5 \text{ mm}$, $Ce = 17.5 \%$, bez drgań US.



Rys. 5.49. Zależność wydajności obróbki V_w od prędkości przesuwu elektrody roboczej v_p i napięcia U dla elektrody płaskiej, $S_o = 0.5 \text{ mm}$, $Ce = 17.5 \%$, $P = 90 \text{ W}$.

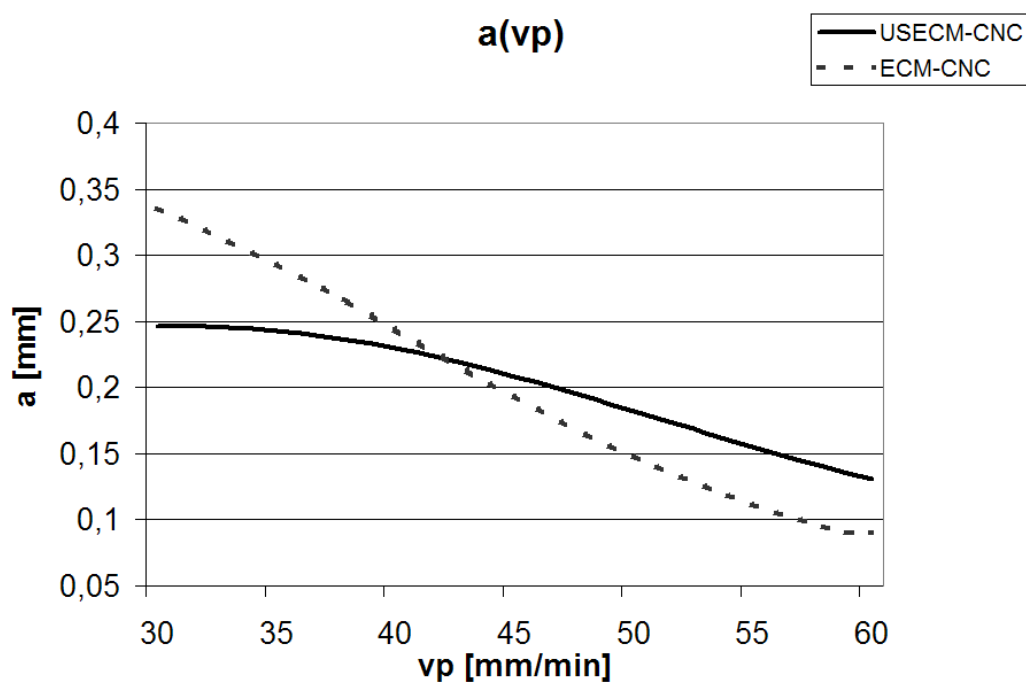
5.4.3. Obróbka USECM - CNC z wierszowaniem elektrodą roboczą

Do analizy wyników badań otrzymanych z wierszowania wykorzystano wyniki symulacji zmian grubości usuniętego naddatku a oraz wydajności V_w dla różnych wartości E (Rys. 3.13, 3.14). Przedstawione Rys. 5.50 porównanie zależności $a(v_p)$ otrzymanej z badań USECM - CNC z zależnościami $a(v_p)$ dla $E = 0 V$ i $E = 5 V$ otrzymanymi z symulacji ECM - CNC potwierdza, że także w przypadku wierszowania drgania ultradźwiękowe powodują zwiększenie grubości usuniętego naddatku. Efekt ten jest wyraźny dla prędkości posuwu elektrody roboczej $v_p > 40 \text{ mm/min}$, co potwierdzają zależności pokazane na Rys. 5.51. Również otrzymane wartości wydajności V_w dla obróbki z drganiami ultradźwiękowymi elektrody są zbliżone do wartości wydajności otrzymanych z symulacji dla $E = 0 V$.

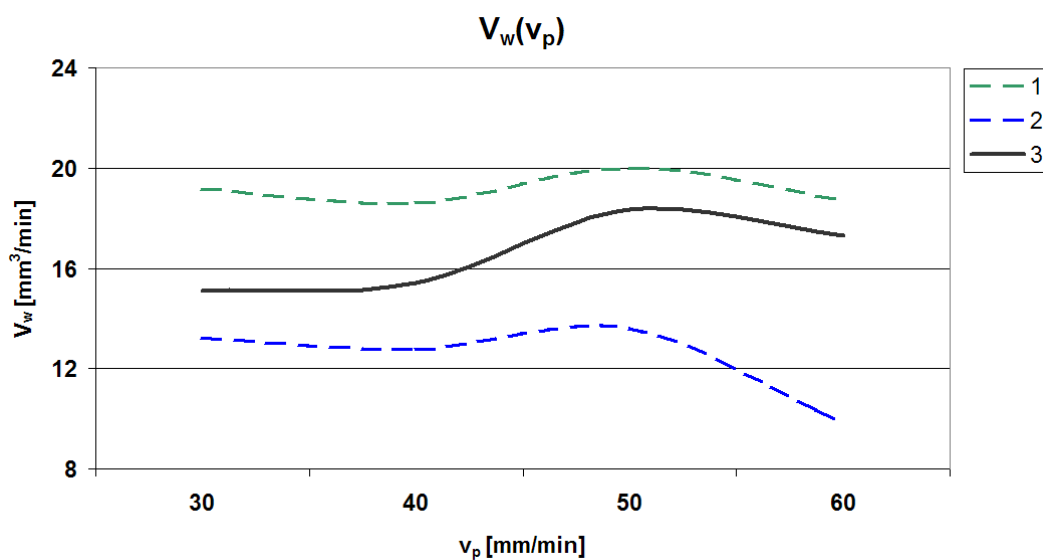


Rys. 5.50. Porównanie zależności $a(v_p)$ dla obróbki USECM - CNC powierzchni płaskiej z wierszowaniem, $U = 14 V$, $S_o = 0.1 \text{ mm}$, $c/R = 0.4 \text{ mm}$; 1 - krzywa otrzymana z symulacji dla $E = 0 V$, 2 - krzywa z symulacji dla $E = 5 V$, 3 - USECM - CNC ($P = 90 W$).

Jednym z podstawowych wskaźników technologicznych świadczących o możliwości wykorzystania obróbki elektrodą uniwersalną w operacjach wykańczających jest falistość powierzchni D , która pokazuje w jakim stopniu kształt powierzchni elektrody roboczej wpływa na jakość przedmiotu po obróbce. Analiza wyników badań obróbki USECM - CNC przedstawiona w [9] pokazuje, że głównym parametrem wpływającym na falistość obrobionej powierzchni jest stosunek promienia elektrody roboczej R do wartości posuwu poprzecznego c . Falistość istotnie rośnie wraz ze wzrostem c/R (Rys. 5.53), jednak dla obróbki z drganiami ultradźwiękowymi elektrody roboczej jest wyraźnie większa od falistości dla ECM - CNC. Wzrost falisto-

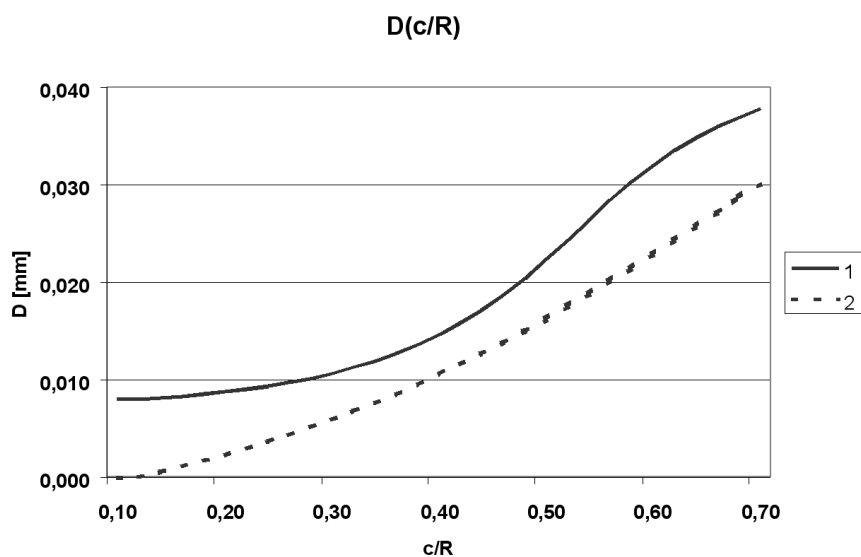


Rys. 5.51. Porównanie zależności $a(v_p)$ dla ECM - CNC i USECM - CNC powierzchni płaskiej z wierszowaniem, $U = 14V$, $S_o = 0.1 \text{ mm}$, $c/R = 0.4 \text{ mm}$.



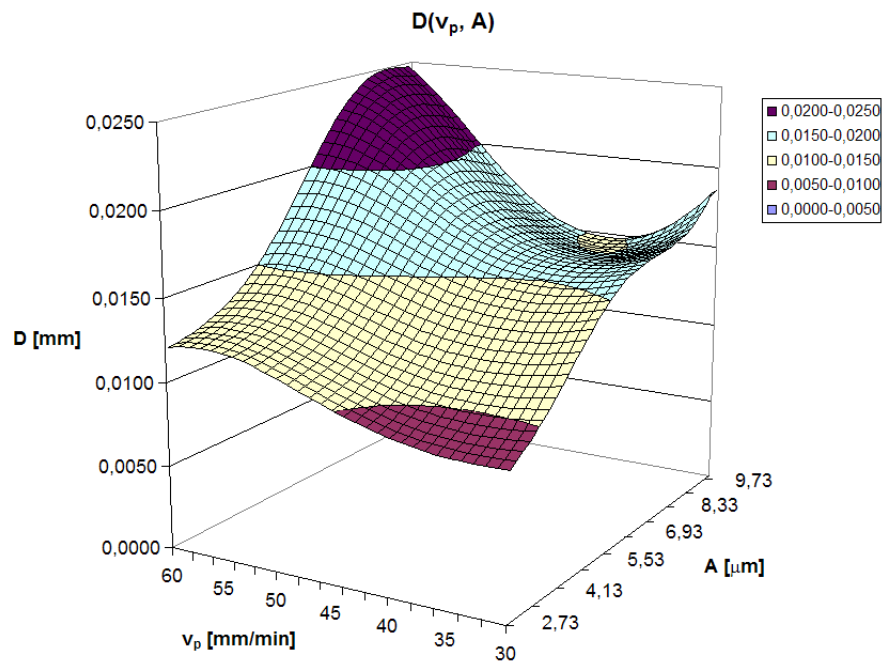
Rys. 5.52. Porównanie zależności $V_w(v_p)$ dla obróbki USECM - CNC powierzchni płaskiej z wierszowaniem, $U = 14V$, $S_o = 0.1 \text{ mm}$, $c/R = 0.4 \text{ mm}$; 1 - krzywa otrzymana z symulacji dla $E = 0 \text{ V}$, 2 - krzywa z symulacji dla $E = 5 \text{ V}$, 3 - USECM - CNC ($P = 90 \text{ W}$).

ści wynika prawdopodobnie z charakteru różnic w kształcie przekroju w kierunku prostopadłym do kierunku pomiędzy ECM - CNC i USECM - CNC (Rys. 5.34 i 5.35). Falistość powierzchni rośnie również wraz ze zwiększeniem amplitudy drgań ultradźwiękowych oraz prędkości posuwu ER (Rys. 5.54). Z przedstawionych na Rys. 5.55 i Rys. 5.56 profilogramów powierzchni obrobionej dla różnych wartości P widać wyraźnie, że zwiększenie mocy drgań ultradźwiękowych powoduje zwiększenie nierówności oraz stają się one bardziej strome.

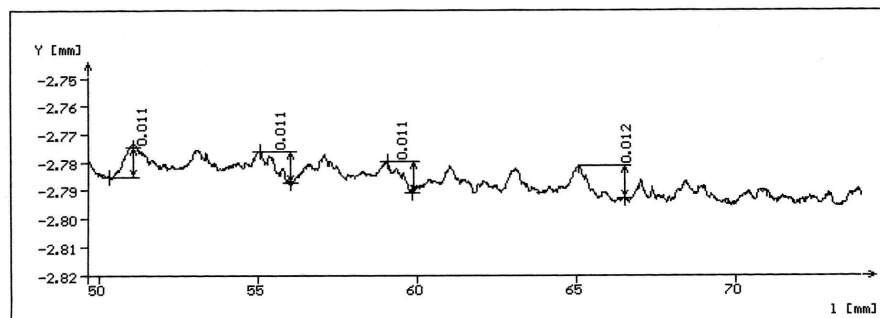


Rys. 5.53. Porównanie zależności $D(c/R)$, $U = 14 V$, $S_o = 0.1 mm$, $v_p = 45 mm/min$; 1 - USECM - CNC, $P = 90 W$, 2 - ECM - CNC.

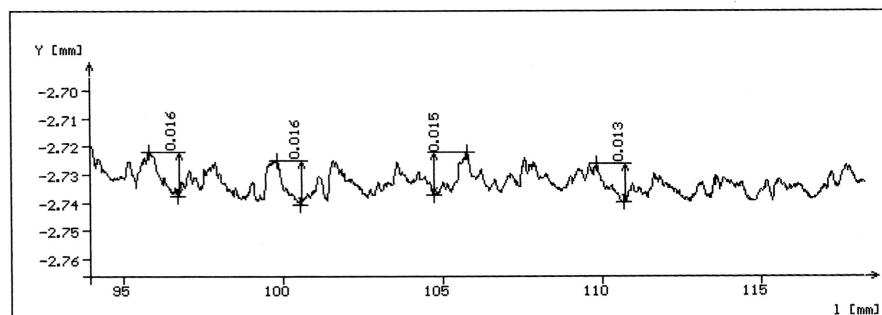
Analizując wyniki badań można sformułować wniosek, że wpływ mocy ultradźwięków na wskaźniki technologiczne tj. grubość usuniętego naddatku, wydajność obróbki oraz chropowatość powierzchni zależy w dużym stopniu od pozostałych parametrów procesu, głównie od prędkości obróbki v_p oraz grubości szczeliny międzyelektrodowej S_o . Na Rys. 5.57 przedstawiono zależność $V_w(v_p, P)$ dla elektrody kulistej. Widać z niej, że w zakresie małych prędkości v_p wraz ze wzrostem mocy ultradźwięków wydajność obróbki maleje. Natomiast dla prędkości przesuwu powyżej $40 mm/min$ zależność wydajności od mocy ultradźwięków zmienia charakter i wraz ze wzrostem P wzrasta wydajność obróbki. Wzrost prędkości przesuwu elektrody oznacza zmniejszenie grubości szczeliny międzyelektrodowej co wskazuje, że wpływ P jest istotny dopiero od pewnej wartości granicznej grubości szczeliny międzyelektrodowej. Analiza wyników badań obróbki USECM - CNC powierzchni płaskiej z wierszowaniem pokazuje, że wraz ze wzrostem mocy drgań ultradźwiękowych następuje zmniejszenie grubości usuniętego naddatku a oraz wydajności obróbki V_w (Rys. 5.58, 5.59).



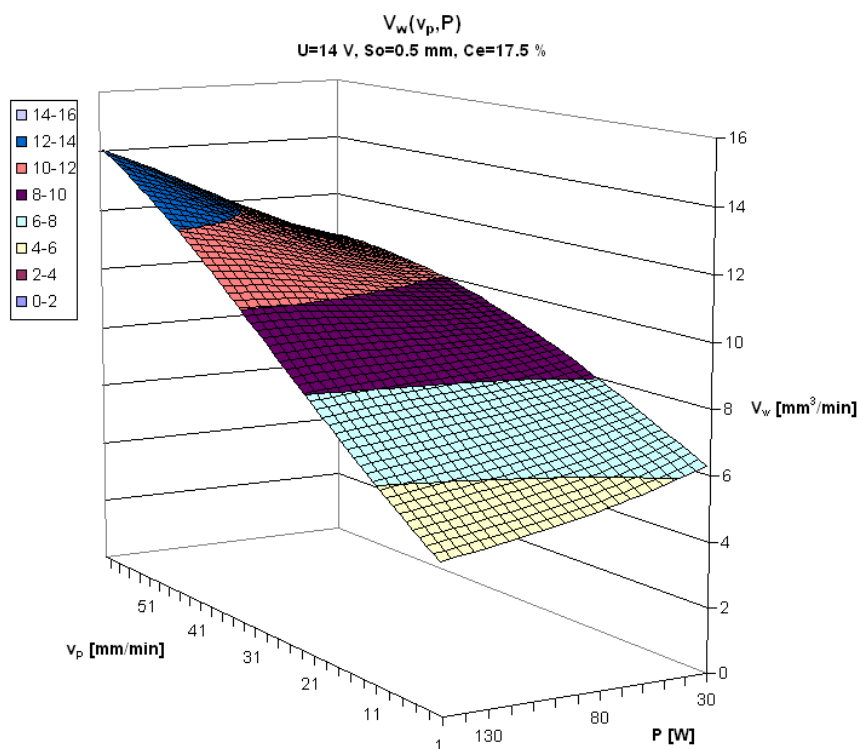
Rys. 5.54. Porównanie zależności falistości powierzchni $D(v_p)$, $U = 14 V$,
 $S_o = 0.1 mm$, $c/R = 0.4$.



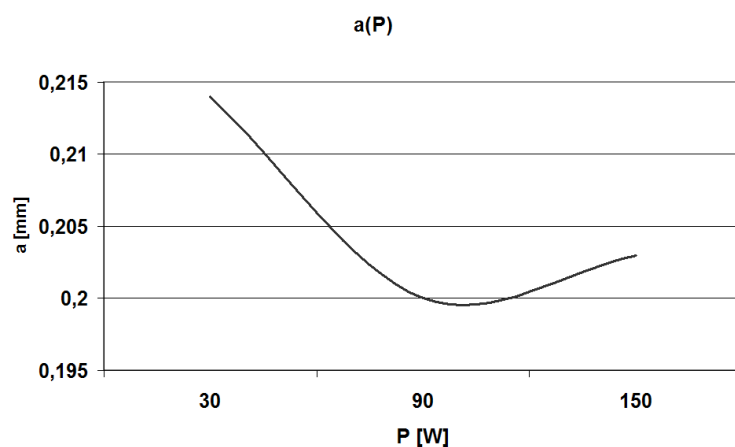
Rys. 5.55. Profilogram powierzchni po obróbce USECM - CNC dla $U = 14 V$,
 $v_p = 45 mm/min$, $S_o = 0.1 mm$, $c/R = 0.4$; $P = 30 W$.



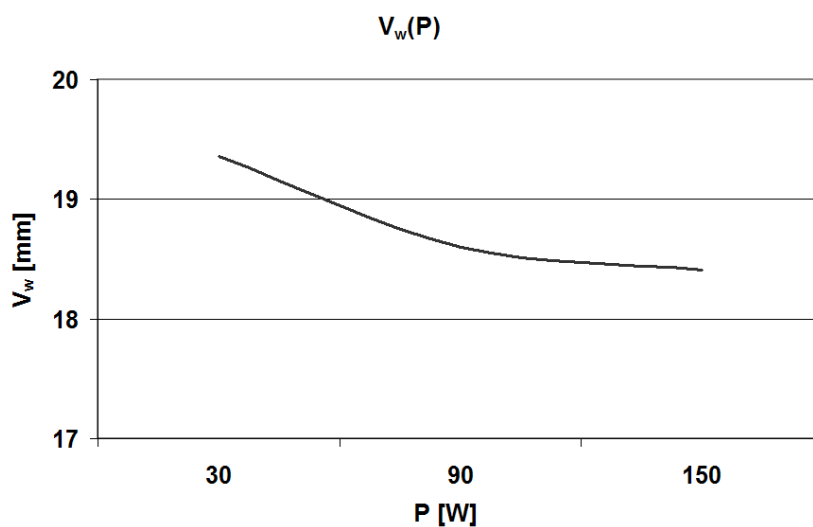
Rys. 5.56. Profilogram powierzchni po obróbce USECM - CNC dla $U = 14 V$,
 $v_p = 45 mm/min$, $S_o = 0.1 mm$, $c/R = 0.4$; $P = 150 W$.



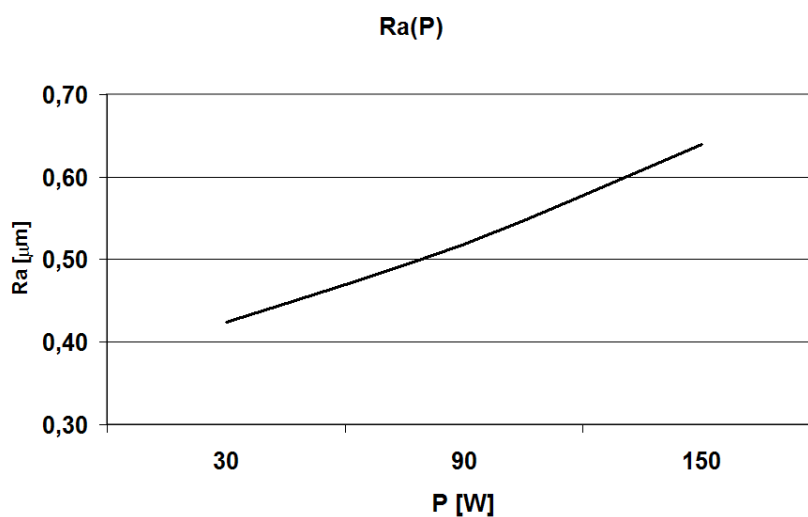
Rys. 5.57. Zależność wydajności obróbki V_w od prędkości przesuwu elektrody roboczej v_p i mocy drgań ultradźwiękowych P dla elektrody kulistej - pojedyncze przejście, $U = 14\text{ V}$, $S_o = 0.5\text{ mm}$, $Ce = 17.5\%$.



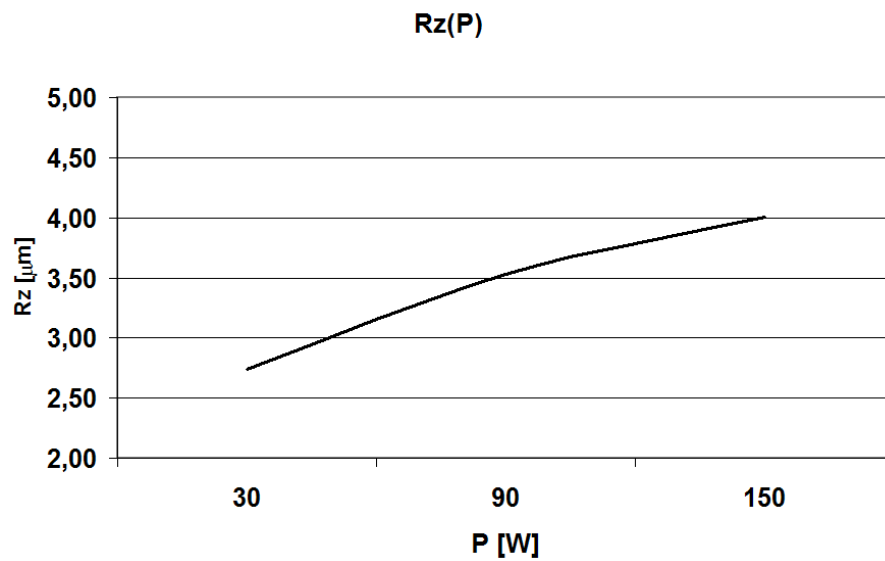
Rys. 5.58. Zależność $a(P)$ dla następujących parametrów obróbki: $U = 14\text{ V}$, $v_p = 45\text{ mm}/\text{min}$, $S_o = 0.1\text{ mm}$.



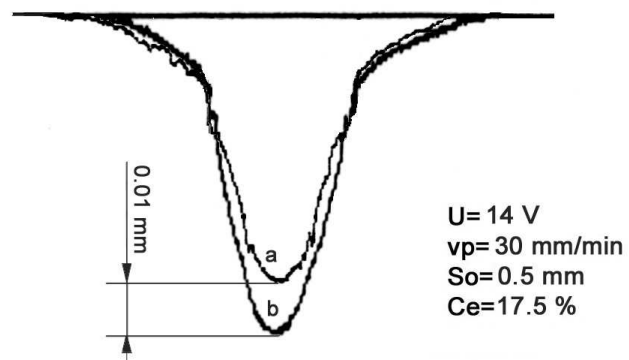
Rys. 5.59. Zależność $V_w(P)$ dla następujących parametrów obróbki: $U = 14 V$,
 $v_p = 45 \text{ mm/min}$, $S_o = 0.1 \text{ mm}$.



Rys. 5.60. Zależność $Ra(P)$ dla następujących parametrów obróbki: $U = 14 V$,
 $v_p = 45 \text{ mm/min}$, $S_o = 0.1 \text{ mm}$.



Rys. 5.61. Zależność $Rz(P)$ dla następujących parametrów obróbki: $U = 14 \text{ V}$, $v_p = 45 \text{ mm/min}$, $S_o = 0.1 \text{ mm}$.



Rys. 5.62. Porównanie przekrojów powierzchni obrabianej dla USECM - CNC, $P = 150 \text{ W}$ (a) i USECM - CNC, $P = 30 \text{ W}$ (b).

5.5. Wnioski z badań doświadczalnych

Podsumowując dotychczasowe rozważania można stwierdzić, że:

1. przeprowadzone na wstępie badania drążenia elektrochemicznego USECM pokazały, że drgania ultradźwiękowe powodują zmianę charakterystyki układu elektrochemicznego elektroda robocza - elektrolit - przedmiot obrabiany, powodując zmniejszenie spadku potencjału na anodzie i katodzie oraz zmianę obrabialności elektrochemicznej. Obrabialność elektrochemiczna rośnie wraz z mocą drgań ultradźwiękowych, natomiast istnieje optymalna wartość mocy ultradźwięków, przy której E osiąga wartość minimalną, która wynosi $70 W$ (odpowiada to amplitudzie drgań ER $A = 4.83 \mu m$).
2. zarówno w przypadku drążenia jaki i ECM - CNC zastosowanie drgań ultradźwiękowych elektrody roboczej powodują zwiększenie lokalnej prędkości roztwarzania. W wyniku tego obserwujemy wyraźny wzrost wydajności procesu V_w oraz grubości usuniętego naddatku a w stosunku do obróbki bez wspomagania US,
3. wpływ ultradźwięków na chropowatość powierzchni zależy od jej wartości. Dla USECM gdzie $Ra > 1 \mu m$, $Rz > 7 \mu m$ obserwujemy zmniejszenie chropowatości powierzchni w porównaniu do obróbki z ultradźwiękami. Natomiast dla obróbki elektrodą uniwersalną minimalne wartości chropowatości w obu badanych przypadkach są zbliżone do $0.3 \mu m$,
4. badania obróbki USECM - CNC powierzchni płaskiej z wierszowaniem pokazały, że drgania ultradźwiękowe elektrody roboczej powodują istotny wzrost falistości powierzchni. Ma to związek ze zwiększeniem grubości usuniętego naddatku w pojedynczym przejściu ER. Minimalna możliwa do uzyskania falistość dla USECM - CNC wynosi $D = 0.01 mm$,
5. wprowadzenie ultradźwięków do procesu ECM - CNC przynosi najwięcej korzyści dla takich wartości parametrów obróbki (U , v_p , S_o), dla których zapewnienie optymalnego przebiegu procesu roztwarzania elektrochemicznego jest utrudnione. Obserwujemy znaczny wzrost a i V_w dla grubości szczeliny międzyelektrodowej $S \approx 0.1 mm$ oraz znaczny spadek chropowatości dla $U = 8 \div 10 V$,
6. istnieje wartość graniczna szczeliny międzyelektrodowej, powyżej której wprowadzenie drgań ultradźwiękowych do szczeliny międzyelektrodowej nie przynosi poprawy wskaźników technologicznych procesu,
7. badania obróbki USECM - CNC z użyciem elektrody walcowej pozwalają na sformułowanie wniosku, że równoległe z wprowadzeniem drgań elektrody roboczej wzrastają wymagania dotyczące dostarczenia i szybkości wymiany elektro-

- litu w szczelinie międzyelektrodowej. Nieodpowiedni sposób dostarczania elektrolitu oraz zbyt duża powierzchnia ER były przyczyną braku różnic pomiędzy USECM - CNC i USECM - CNC dla elektrody walcowej,
8. badania doświadczalne potwierdziły przydatność oprogramowania do komputerowego modelowania procesu elektrochemicznej obróbki elektrodą kulistą,
 9. analiza wyników badań wstępnych potwierdziła, że sieci neuronowe są bardzo dobrym narzędziem do modelowania procesów kształtowania elektrochemicznego.
 10. obróbka USECM - CNC powierzchni krzywoliniowych wymaga zapewnienia prostopadłego kierunku osi elektrody do stycznej wystawionej w punkcie przecięcia osi ER z PO.

Rozdział 6

Analiza zjawisk zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej

Analizując wpływ ultradźwięków na proces obróbki elektrochemicznej należy zwrócić uwagę na fakt, że dla stosowanej w badaniach częstotliwości drgań ultradźwiękowych ($f \approx 20 \text{ KHz}$), długość fali λ jest o rząd wielkości większa od grubości szczelin międzyelektrodowych zwykle stosowanych w obróbce elektrochemicznej. Przykładowo, dla wody morskiej, prędkość rozchodzenia się ultradźwięków wynosi 1440 m/s , co, wg (2.1), dla częstotliwości 20 kHz daje długość fali $\lambda = 0.072 \text{ m}$. Dlatego też przy analizie zjawisk zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej należy przede wszystkim uwagę na mechanizmy wtórne oddziaływania ultradźwięków, które są spowodowane lokalnymi siłami powstającymi w ośrodku. Jak pokazała przedstawiona w Rozdziale 4 analiza numeryczna przepływu elektrolitu przez szczelinę międzyelektrodową, głównym zjawiskiem które powstaje w obszarze roztwarzania jest kawitacja. Dlatego też poniżej zostanie przeprowadzona analiza określająca warunki powstawania zarodków kawitacji w obszarze szczeliny międzyelektrodowej.

6.1. Warunki powstawania pęcherzyków kawitacyjnych w szczelinie międzyelektrodowej

Rozważmy szczelinę międzyelektrodową wypełnioną elektrolitem o stałej temperaturze T_e . Jak już wcześniej wspomniano, w zależności od miejsca powstania pęcherzyków kawitacyjnych można wyróżnić dwa sposoby zarodkowania:

- zarodkowanie homogeniczne (jednorodne),
- zarodkowanie heterogeniczne (niejednorodne).

Z punktu widzenia przebiegu roztwarzania elektrochemicznego oba powyższe mechanizmy ogrywają istotną rolę.

6.1.1. Zarodkowanie homogeniczne

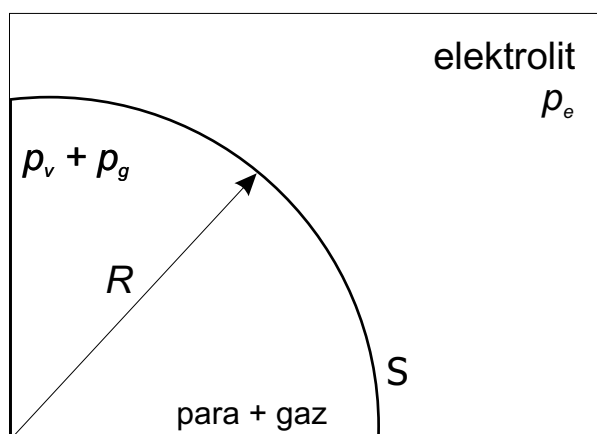
Proces zarodkowania homogenicznego rozpoczyna się w miejscach mikroskopijnych luk powstałych w wyniku ruchów termicznych cząstek elektrolitu. Na Rys. 6.1 przedstawiono schemat granicy pomiędzy elektrolitem a zarodkiem kawitacyjnym. Warunek równowagi dla zarodka o promieniu R zawierającego jedynie parę elektrolitu ($p_g = 0$) przyjmuje następującą postać:

$$p_v - p_e = \frac{2\gamma}{R} \quad (6.1)$$

gdzie γ - napięcie powierzchniowe, czyli ilość pracy potrzebnej do zwiększenia powierzchni cieczy. Powyższe równanie jest ważne jeżeli założymy, że koncepcja napięcia powierzchniowego jest poprawna również dla odległości międzymolekularnych [8]. Przy $T_e = const.$ zachodzi warunek $p_v = p_{sat}(T_e)$. Jeżeli zachodzi warunek:

$$p_e < p_v - \frac{2\gamma}{R} \quad (6.2)$$

powstają warunki do dalszego powiększania się zarodka kawitacyjnego.



Rys. 6.1. Schemat granicy elektrolit - pęcherz kawitacyjny [8].

Zwiększanie R prowadzi do zwiększenia nadciśnienia powodującego wzrost zarodka. W rezultacie prowadzi to do zerwania sił międzycząsteczkowych umożliwiając powstanie pęcherzyka kawitacyjnego. Wytrzymałość cieczy na rozciąganie definiuje się

poprzez krytyczny rozmiar pustki (luki) R_c , którego osiągnięcie gwarantuje powstanie pęcherzyka kawitacyjnego:

$$\Delta p_c = \frac{2S}{R_c} \quad (6.3)$$

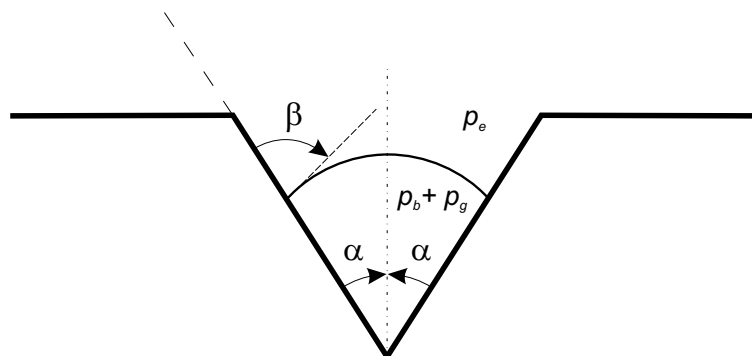
Przykładowo, dla przyjętego w trakcie modelowania numerycznego napięcia powierzchniowego $S = 0.0717 \text{ N/m}$ i $R_c = 10^{-10} \text{ m}$ (rzęd odległości międzycząsteczkowych) $\Delta p_c = 1.434 \cdot 10^9 \text{ Pa}$. Dla elektrolitu zawierającego gaz powstały w procesie roztwarzania elektrochemicznego, ciśnienie w zarodku kawitacyjnym jest sumą $p_v + p_g$. W takim przypadku:

$$\Delta p_c = \frac{2\gamma}{R_c} - p_g \quad (6.4)$$

Rozpuszczony w elektrolicie gaz zmniejsza naprężenia potrzebne do wzrostu pęcherzyka kawitacyjnego. W przypadku gdy ilość rozpuszczonego gazu jest na tyle duża, że $p_g > \frac{2S}{R_c}$ powstają warunki do wzrostu pęcherzyka przy $p_e > p_{sat}$.

6.1.2. Zarodkowanie heterogeniczne

Powyższe rozważania dotyczyły jedynie elektrolitu i rozpuszczonego w nim gazu. Dla elektrolitu przepływającego przez szczelinę międzyelektrodową, należy rozważyć również wpływ powierzchni elektrod na warunki powstawania kawitacji. W skali mikro powierzchnie elektrod nie są płaskie, więc należy wziąć pod uwagę strukturę geometryczną ich powierzchni.



Rys. 6.2. Schemat zarodka kawitacji powstałego w lokalnym obniżeniu powierzchni [8].

Prosty model pęcherza wzrastającego w lokalnym obniżeniu chropowatości zaprezentowano w pracy [8] (Rys. 6.2). Równowaga powstającego w dołku chropowatości zarodka kawitacji opisana jest zależnością:

$$(p_v + p_g) - p_e = \frac{2\gamma \sin \beta}{R} \quad (6.5)$$

Analogicznie jak w przypadku zarodkowania heterogenicznego można określić naprężenia konieczne do wzrostu pęcherzyka kawitacyjnego:

$$\Delta p_c = \frac{2\gamma \sin \beta}{R_c} \quad (6.6)$$

Przykładowo przyjmując $\beta = \pi/4$ otrzymujemy Δp_c dla zarodkowania heterogenicznego równe $\frac{\sqrt{2}}{2}\Delta p_c$. Warto również zauważyć, że dla $\beta > \alpha + \frac{\pi}{2}$ nastąpi wzrost pęcherzyka dla $p_e > p_{sat}$. Jak widać, charakter ośrodka jakim jest mieszanina elektrolitu z produktami roztwarzania, sprzyja temu zjawisku. Pęcherzyki często tworzą się i zanikają na granicy elektrolit - elektroda, co przy systematycznym powtarzaniu się tego zjawiska może również doprowadzić do zniszczenia elektrody.

6.2. Wpływ zapadania się pęcherzyków na transport masy w szczelinie międzyelektrodowej

Gdy zostaną stworzone warunki niezbędne do wzrostu pęcherzyka kawitacyjnego, następuje faza jego gwałtownego wzrostu z R_{min} do R_{max} (R_{max} zwykle osiąga wymiar $\approx 100 R_{min}$). Następnie pęcherzyk kawitacyjny gwałtownie się zapada, lokalnie generując bardzo ekstremalne warunki temperatury i ciśnienia. Czas zapadania się pęcherzyka jest bardzo krótki (rzędu 10^{-6} s), dlatego też, gaz zawarty w pęcherzyku traktowany jest jako adiabatyczny:

$$p_g = p_{go} \left(\frac{R_{min}}{R} \right)^{3k} \quad (6.7)$$

gdzie p_{go} - początkowe ciśnienie gazu w pęcherzyku, p_g - ciśnienie gazu w kulistym pęcherzyku o promieniu R , k - wykładnik adiabaty. Z równania (6.7) ciśnienie p_g w momencie rozpoczęcia fazy zapadania się pęcherzyka dla $p_{go} = 0 \text{ bar}$, $R_{max} = 100R_{min}$ i $k = 1$ wynosi 10^{-6} bar . Maksymalne ciśnienie i temperatura w pęcherzyku w trakcie zapadania opisane są następującymi równaniami [8]:

$$p_{max} = p_{go} \left[\frac{(k-1) \left(p_\infty - p_v - p_{go} + \frac{3\gamma}{R_{min}} \right)}{p_{go}} \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (6.8)$$

$$T_{max} = T_o \left[\frac{(k-1) \left(p_\infty - p_v - p_{go} + \frac{3\gamma}{R_{min}} \right)}{p_{go}} \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (6.9)$$

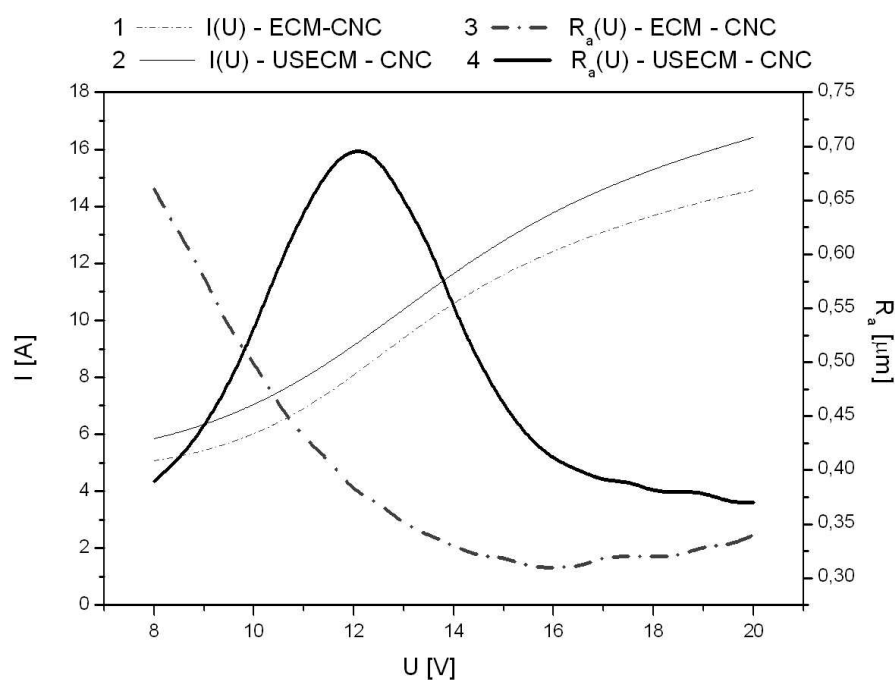
gdzie: p_{go} , T_o - początkowe ciśnienie i temperatura, p_∞ - ciśnienie w pewnej odległości od pęcherzyka kawitacyjnego. Pomijając dyfuzję gazu z elektrolitu do pęcherzyka oraz ściśliwość cieczy, przyjmując spadek ciśnienia zewnętrznego p_∞ rzędu 0.1 bar

otrzymujemy następujące wartości $p_{max} = 10^{10}$ bar i $T_{max} = 4 \cdot 10^4 \cdot T_0$. Równania (6.8) i (6.9) obowiązują dla pęcherzyków o kształcie kulistym. W rzeczywistości, kształty pęcherzyków są dalekie od kuli, jednak analiza ta prowadzi do maksymalnych, możliwych w trakcie zapadania, wartości ciśnienia i temperatury. Również dyfuzja gazu oraz ściśliwość elektrolitu zmniejszają wartości p_{max} i T_{max} , jednak przeprowadzona analiza daje pewną informację o warunkach panujących w trakcie zapadania się pojedynczego pęcherzyka kawitacyjnego. W danej chwili, w *nadźwiękawianym* ośrodku, tworzy się i zapada ogromna ilość pęcherzyków kawitacyjnych. Szacuje się, że w miejscach zapadania się pęcherzyków powstają temperatury rzędu ≈ 5000 K, ciśnienie sięga ≈ 1000 atm., gradient temperatury rzędu 107 K/s [5, 119], co powoduje, że to zjawisko wprowadza bardzo wyjątkowe warunki do szczeliny międzyelektrodowej. Badania nad kształtem pęcherzyków [6, 57, 59] wykazały bardzo szerokie spektrum ich kształtów i aktywnego oddziaływania w cieczy. Przykładowo pęcherzyki deformują się do postaci lejkowatych wirów skierowanych końcówką do powierzchni granicznych. Tworzenie się takiego lejka poprzedza proces zaniku pęcherzyka kawitacyjnego, który doczepiony do powierzchni ciała stałego przekazuje mu swoją energię i zapada się nieodwracalnie. W konsekwencji, lokalnie powstające *mikro - strugi* elektrolitu, mają znaczący wpływ na skład oraz właściwości warstw elektrolitu przyległych do elektrod.

Zweryfikowanie tej hipotezy w warunkach roztwarzania elektrochemicznego jest praktycznie niemożliwe (przeszkodą jest przede wszystkim mała szczelina oraz czas trwania zjawisk kawitacyjnych). Wpływ ultradźwięków na procesy wymiany masy w szczelinie międzyelektrodowej, obserwowany jest przede wszystkim poprzez zmianę wskaźników technologicznych roztwarzania elektrochemicznego, czyli zwiększenie grubości usuniętego naddatku, zwiększenie wydajności obróbki oraz zmianę chropowatości powierzchni.

W trakcie badań USECM - CNC interesujące wyniki otrzymano dla chropowatości powierzchni. Przedstawione na Rys. 6.3 porównanie wyników dla ECM - CNC i USECM - CNC pokazuje, że pomimo wzrostu natężenia prądu Ra dla USECM - CNC przyjmuje większe wartości niż dla obróbki bez drgań ultradźwiękowych. Jest to w sprzeczności z mechanizmem wygładzania w ECM, który wynika z różnic w prędkości roztwarzania dla wierzchołków i dołków chropowatości. Produkty roztwarzania elektrochemicznego zbierają się w dołkach chropowatości, powodując zmniejszenie prędkości roztwarzania. Powoduje to wygładzenie nierówności obrabianej powierzchni. Mechanizm ten ulega wzmocnieniu wraz z gęstością prądu oraz kiedy zastosujemy elektrolit pasywujący, czyli np. $NaNO_3$. Biorąc pod uwagę powyższe rozważania dotyczące zarodkowania i zapadania się pęcherzyków kawitacyjnych, efekt zwiększenia

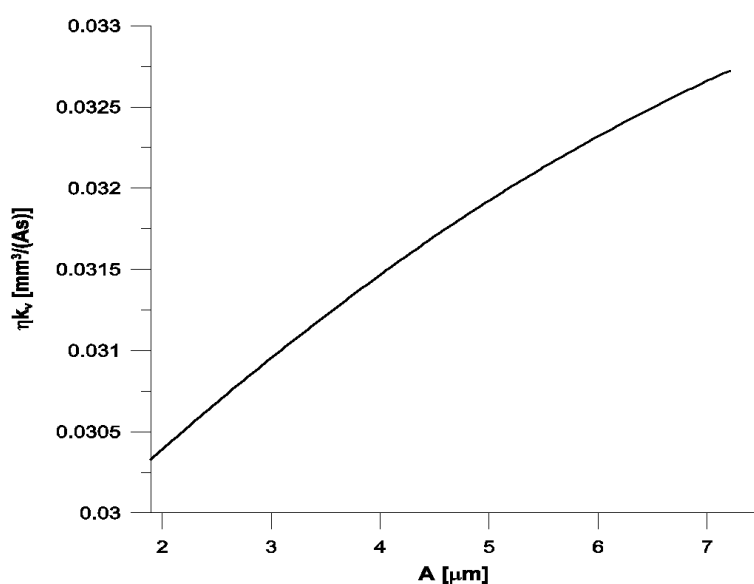
chropowatości powierzchni w przypadku USECM - CNC może być wytłumaczony następująco. W warstwach przyległych do przedmiotu obrabianego istnieją znacznie lepsze warunki zarodkowania heterogenicznego. W obszarze tym (zwłaszcza w zagłębieniach chropowatości powierzchni), produkty roztwarzania elektrochemicznego: gaz, ciepło oraz cząstki roztworzonego materiału obniżają naprężenia niezbędne do wzrostu pęcherzyka kawitacyjnego. Konsekwencją powstania takiego pęcherzyka jest chwilowe przerwanie procesu roztwarzania, poprzez blokadę elektrody. Gwałtowne zapadnięcie się pęcherzyka powoduje napływ świeżego elektrolitu, co w konsekwencji powoduje lokalne zwiększenie prędkości roztwarzania. Efekt ten jest wyraźny w przedziale napięcia międzyelektrodowego $12 \div 20$ V. Grubość szczeliny międzyelektrodowej jest wprost zależna od napięcia międzyelektrodowego, i jest najmniejsza dla $U = 8$ V. Ze względu na trudności z zapewnieniem odpowiednich warunków hydrodynamicznych dla małej szczeliny międzyelektrodowej, chropowatość dla ECM - CNC zwiększa się wraz z obniżeniem napięcia i osiąga największe wartości dla $U = 8$ V. W przypadku obróbki z ultradźwiękami chropowatość osiąga największą wartość dla $U = 12$ V, natomiast dla $U = 8$ V jest dwa razy mniejsza niż dla ECM - CNC. Podobnie jak w przypadku innych wskaźników technologicznych, również dla chropowatości powierzchni korzystny wpływ ultradźwięków widoczny



Rys. 6.3. Porównanie zależności $I(U)$ (krzywe 1 i 2) oraz $Ra(U)$ (krzywe 3 i 4) dla ECM - CNC i USECM - CNC; $v_p = 30$ mm/min, $C_e = 17.5$ %, $S_o = 0.5$ mm, $P = 90$ W.

jest dla małych grubości szczelin międzyelektrodowych. Wraz ze zwiększeniem szczeliny międzyelektrodowej pozytywny wpływ ultradźwięków maleje, a dla większych szczelin staje się nieistotny. Maksimum chropowatości powierzchni dla $U = 12 V$ wskazuje, że dla tych warunków obróbki zjawiska kawitacji heterogenicznej osiągają największą intensywność.

Kompleksowy opis zjawisk zachodzących w obszarze roztwarzania elektrochemicznego wymaga również przedstawienia zależności badanych wskaźników technologicznych wraz ze zmianą amplitudy ultradźwięków A . Częściowo dokonano opisu tych zjawisk przy interpretacji wyników badań doświadczalnych (Rys. 5.18 i Rys. 5.19).

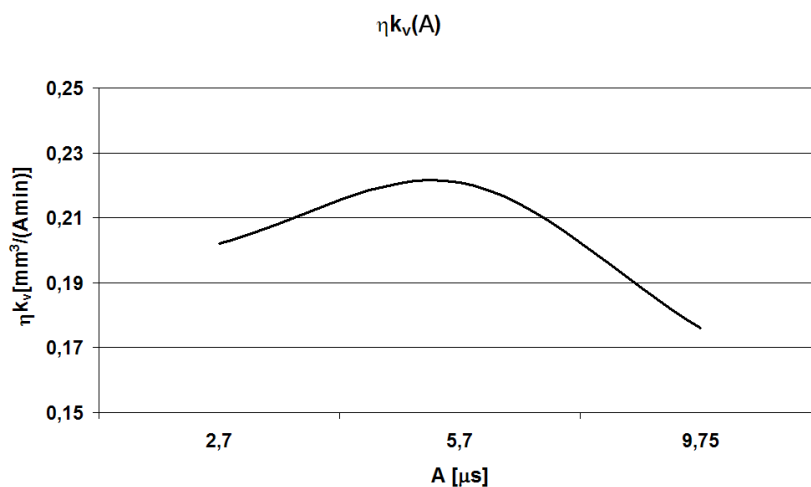


Rys. 6.4. Zależność ηk_v od amplitudy drgań ultradźwiękowych A dla drażenia USECM; $v_f = 0.8 \text{ mm/min}$.

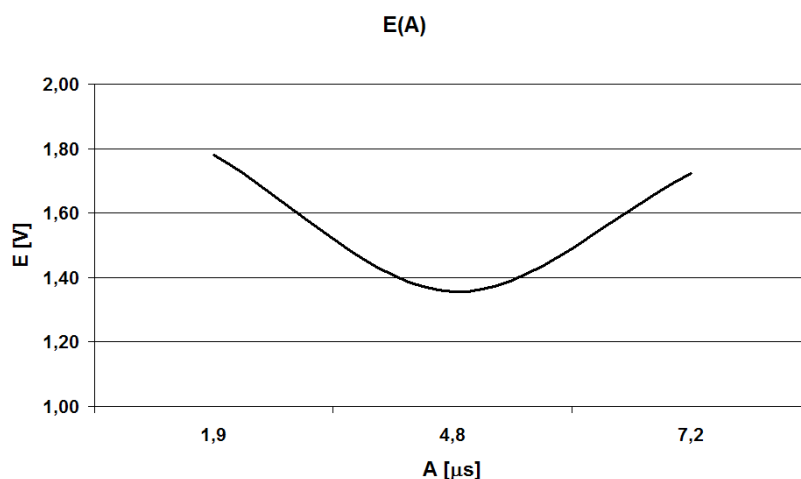
Rys. 6.4 potwierdza słuszność przypuszczenia wynikającego z zależności (5.11), że gęstość prądu maleje ze wzrostem amplitudy drgań ultradźwiękowych, co spowodowane jest wzrostem intensywności występowania zjawiska kawitacji. Z Rys. 6.6 wynika, że polaryzacja elektrod osiąga minimum dla amplitudy drgań ultradźwiękowych $A \approx 6 \mu\text{m}$, a następnie wzrasta ze wzrostem A , co znajduje odzwierciedlenie w zmianach grubości szczeliny międzyelektrodowej.

W oparciu o dotychczasowe rozważania można przypuszczać, że wzrost mocy ultradźwięków zmniejsza klasyczną polaryzację spowodowaną wzrostem stężenia jonów wodoru w pobliżu katody i jonów materiału obrabianego w pobliżu anody. Z punktu widzenia mechanizmów transportu masy w szczelinie międzyelektrodowej największe znaczenie ma kawitacja heterogeniczna, której skutkiem jest zwiększenie transportu masy na granicy przedmiot obrabiany - elektrolit. Kawitacja heteroge-

niczna odpowiedzialna jest za zmianę polaryzacji elektrod, co powoduje korzystną zmianę grubości usuniętego naddatku oraz wydajności obróbki. W miarę zwiększania mocy drgań ultradźwiękowych obserwujemy zwiększenie E . Wraz ze zwiększeniem amplitudy drgań elektrody roboczej wzrasta udział zjawisk kawitacji homogenicznej (wewnątrz szczeliny międzyelektrodowej), na skutek której w szczelinie międzyelektrodowej tworzy się duża ilość pęcherzyków wypełnionych parami i gazem. Powoduje to znaczne straty energii przepływającego elektrolitu oraz utrudnia dyfuzję jonów anody w głąb szczeliny międzyelektrodowej.



Rys. 6.5. Zależność η_{k_v} od amplitudy drgań ultradźwiękowych dla obróbki kulistą elektrodą uniwersalną USECM - CNC; $v_p = 30 \text{ mm/min}$.



Rys. 6.6. Zależność E od amplitudy drgań ultradźwiękowych A dla drążenia USECM; $v_f = 0.8 \text{ mm/min}$.

Rozdział 7

Podsumowanie i wnioski

7.1. Podsumowanie

W pracy przeprowadzono analizę wspomaganego drganiami ultradźwiękowymi procesu obróbki elektrochemicznej elektrodą uniwersalną. Wyniki przeprowadzonej w Rozdziale I analizy danych literaturowych, były podstawą do sformułowania celu i zakresu przedstawionej pracy. W Rozdziale II scharakteryzowano podstawowe właściwości oraz zastosowania drgań ultradźwiękowych. Przeprowadzona analiza zjawisk zachodzących w nadźwiękawanym ośrodku oraz przegląd literatury dotyczącej zjawiska kawitacji pokazał, że odgrywa ona znaczącą rolę w analizowanym procesie obróbki. Pozwoliło to na określenie możliwości zastosowania oraz postawienie hipotez dotyczących ewentualnego wpływu ultradźwięków na proces roztwarzania elektrochemicznego.

Wykorzystując opracowany model matematyczny stworzono oprogramowanie do komputerowej symulacji USECM - CNC. Przeprowadzone symulacje pokazały, że model obróbki USECM - CNC zakładający stałe parametry elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej okazał się niewystarczający do symulacji tego procesu. Również czas trwania obliczeń jest zbyt duży, aby stosować go w aplikacjach przemysłowych. Dlatego też, wprowadzając pojęcie stanu quasiustalonego obróbki i zakładając, że ultradźwięki powodują zmianę charakterystyki układu elektrochemicznego elektroda robocza - elektrolit - przedmiot obrabiany, określono warunki zastosowania modelu ECM - CNC do przewidywania wskaźników technologicznych obróbki USECM - CNC. Otrzymane, przykładowe zależności pokazują, że poprzez prawi-

dłowy dobór ηk_v oraz E możliwa jest symulacja obróbki USECM - CNC i określenie wpływu zmian tych parametrów na wskaźniki technologiczne obróbki.

Charakterystyki $\eta k_v = (j, w, T)$ oraz $E_a - E_k = E(j, w, T)$ związane są z charakterem przepływu elektrolitu przez szczelinę międzyelektrodową, dlatego też w kolejnym etapie pracy stworzono model numeryczny przepływu przez szczelinę międzyelektrodową w USECM - CNC. Otrzymane rezultaty pokazały, że drgania ultradźwiękowe wprowadzają jakościową zmianę przepływu w szczelinie. Analiza otrzymanych wyników w aspekcie obróbki elektrochemicznej pozwala na stwierdzenie, że drgania intensyfikują procesy wymiany masy oraz ułatwiają ewakuacje produktów roztwarzania z obszarów przyelektrodowych a intensywność tych zjawisk zależy od amplitudy drgań. Weryfikacja otrzymanych wyników w warunkach roztwarzania elektrochemicznego jest praktycznie niemożliwa (przeszkodą jest przede wszystkim mała szczelina oraz bardzo krótki czas trwania zjawisk kawitacyjnych). Wpływ ultradźwięków obserwowany jest poprzez zmianę wskaźników technologicznych roztwarzania elektrochemicznego.

Rezultaty badań obróbki USECM i USECM - CNC pokazały, że zastosowanie drgań ultradźwiękowych elektrody roboczej powoduje zmianę przebiegu procesu roztwarzania elektrochemicznego, zwiększenie lokalnej prędkości roztwarzania. W efekcie następuje zmiana grubości usuniętego naddatku a oraz wydajności obróbki V_w . Porównanie procesów roztwarzania elektrochemicznego bez ultradźwięków z procesem z drganiami elektrody pokazało, że poprawa wyżej wymienionych wskaźników związana jest ze zmianą wartości ηk_v i E . Przedstawione zależności $S_k(P)$, $\eta k_v(P)$ i $E(P)$ pokazują, że parametry te zależą od mocy (amplitudy) drgań ultradźwiękowych. W trakcie badań drażenia elektrochemicznego USECM zaobserwowano poprawę jakości warstwy wierzchniej przez zmniejszenie chropowatości powierzchni. W przypadku obróbki USECM - CNC wprowadzenie drgań ultradźwiękowych elektrody roboczej powoduje niewielki wzrost chropowatości powierzchni, jednak jak pokazują zależności $Ra(U, S_o)$ i $Ra(U, C_e)$ możliwy jest taki dobór parametrów procesu aby otrzymane wartości Ra i Rz nie różniły się od otrzymanych w ECM - CNC. Przeprowadzone badania obróbki USECM - CNC powierzchni płaskiej z wierszowaniem ER, potwierdziły wnioski z badań USECM - CNC z pojedynczym przejściem ER. Istotnym, w aspekcie zastosowania USECM - CNC, wskaźnikiem technologicznym jest falistość powierzchni D . Jak pokazały przeprowadzone badania, drgania ultradźwiękowe elektrody roboczej powodują wzrost falistości powierzchni, co ma bezpośredni związek ze zwiększeniem grubości usuniętego naddatku w trakcie pojedynczego przejścia ER. Badania obróbki USECM - CNC elektrodą walcową pokazały, że kluczowym aspektem przy projektowaniu obróbki USECM - CNC jest odpo-

wiednia wymiana elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej. Zgodnie z wynikami analizy numerycznej, wprowadzenie drgań ultradźwiękowych wprowadza jakościową zmianę przepływu w szczelinie międzyelektrodowej, wpływając korzystnie na proces roztwarzania, jednak równolegle wzrastają wymagania dotyczące szybkości wymiany elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej.

W ostatnim etapie pracy przeprowadzono analizę zjawisk zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej. W oparciu o przeprowadzone rozważania określono, że z punktu widzenia mechanizmów transportu masy na granicy faz w szczelinie międzyelektrodowej, korzystny wpływ na proces roztwarzania elektrochemicznego ma kawitacja heterogeniczna, która odpowiedzialna jest za zmianę polaryzacji elektrod. Natomiast kawitacja homogeniczna utrudnia dyfuzję jonów i jest źródłem strat hydrodynamicznych przepływającego przez szczelinę elektrolitu.

Wynikiem realizacji pracy jest dalsze poznanie procesu roztwarzania elektrochemicznego wspomaganego drganiami ultradźwiękowymi. Opracowany model numeryczny przepływu może być również z powodzeniem wykorzystany do interpretacji zjawisk zachodzących w innych procesach obróbkowych wspomaganymi drganiami ultradźwiękowymi (np. USEDM, USM).

7.2. Wnioski

Postawiony na wstępie cel pracy został osiągnięty: przeprowadzone badania umożliwiły dalsze poznanie procesu obróbki elektrochemicznej elektrodą uniwersalną wspomaganego drganiami ultradźwiękowymi. Przeprowadzona analiza numeryczna pozwoliła na określenie zmian pola prędkości oraz ciśnienia w szczelinie międzyelektrodowej w stosunku do obróbki bez drgań ultradźwiękowych. Poniżej zostaną przedstawione najważniejsze wnioski sformułowane na podstawie przeprowadzonych badań.

7.2.1. Wnioski o charakterze poznawczym

1. Rozwiązanie układu równań opisujących proces kształtowania elektrochemicznego metodą różnic skończonych dla obróbki USECM - CNC przy założeniu stałych właściwości elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej okazało się niewystarczające do symulacji procesu USECM - CNC.
2. Czas trwania obliczeń związanych z rozwiązaniem układu równań opisujących proces kształtowania jest bardzo duży ($t_{sym} = 2000 \text{ min.}$ przy długości obrabianego odcinka 2 mm). Jest to związane z górnym ograniczeniem długości kroku czasowego $\Delta t < T/4$ (w analizowanym przypadku $\Delta t = 12.5 \mu\text{m}$).

3. Przeprowadzone symulacje zmian grubości usuniętego naddatku wraz ze zmianą polaryzacji E oraz ich porównanie z wynikami badań doświadczalnych pokazały, że istnieją możliwości wykorzystania oprogramowania do symulacji obróbki ECM - CNC do przewidywania grubości usuniętego naddatku za pomocą USECM - CNC.
4. Charakter zjawisk zachodzących w szczelnie międzyelektrodowej narzuca sporo ograniczeń dotyczących możliwości badania procesu USECM - CNC. Przeprowadzone prace pokazały potencjałe możliwości wykorzystania metod i oprogramowania CFD do modelowania zjawisk zachodzących w szczelnie międzyelektrodowej.
5. Rozwiązanie równań opisujących przepływ elektrolitu przez szczelinę międzyelektrodową pozwoliło uzyskać informacje o rozkładzie pola prędkości, pola ciśnienia oraz intensywności zjawisk kawitacyjnych w szczelinie międzyelektrodowej. Analiza numeryczna pokazała, że intensywność oddziaływania ultradźwięków zależy od amplitudy drgań ultradźwiękowych, a głównym mechanizmem oddziaływań czynnych jest kawitacja. Zweryfikowanie wyników analizy numerycznej, ze względu na wymiary szczeliny międzyelektrodowej oraz czas, w jakim zachodzą badane zjawiska ($< 50 \mu s$) jest praktycznie niemożliwe. Otrzymane wyniki znajdują jednak potwierdzenie, pośrednio poprzez rezultaty badań obróbki USECM i USECM - CNC, gdzie wprowadzenie drgań ultradźwiękowych daje bardzo korzystne efekty.
6. Wyniki badań doświadczalnych pozwoliły sformułować wniosek, że wpływ mocy ultradźwięków na wskaźniki technologiczne tj. grubość usuniętego naddatku, wydajność obróbki oraz chropowatość powierzchni zależy w dużym stopniu od pozostałych parametrów procesu, głównie od prędkości elektrody v_p oraz grubości szczeliny międzyelektrodowej S_o .
7. Badania obróbki USECM - CNC powierzchni płaskiej z wierszowaniem pokazały, że drgania ultradźwiękowe elektrody roboczej powodują istotny wzrost falistości powierzchni. Ma to związek ze zwiększeniem grubości usuniętego naddatku w pojedynczym przejściu ER. Minimalna możliwa do uzyskania falistość dla USECM - CNC wynosi $D = 0.01 \text{ mm}$ (dla $c = 0.5 \text{ mm}$),
8. Istnieje wartość graniczna szczeliny międzyelektrodowej, powyżej której wprowadzenie drgań ultradźwiękowych do szczeliny międzyelektrodowej nie przynosi poprawy wskaźników technologicznych procesu.
9. Badania obróbki USECM - CNC z użyciem elektrody walcowej pozwalają na sformułowanie wniosku, że równoległe z wprowadzeniem drgań elektrody roboczej wzrastają wymagania dotyczące dostarczenia i szybkości wymiany elektro-

litu w szczelinie międzyelektrodowej. Nieodpowiedni sposób dostarczania elektrolitu oraz zbyt duża powierzchnia ER były przyczyną braku różnic pomiędzy USECM - CNC i USECM - CNC dla elektrody walcowej.

10. Analiza wyników badań wstępnych potwierdziła, że sieci neuronowe są bardzo dobrym narzędziem do modelowania procesów kształtowania elektrochemicznego.
11. Drgania ultradźwiękowe wprowadzają jakościową zmianę przepływu w szczelinie. Przenosząc wyniki na grunt ECM można stwierdzić, że drgania intensyfikują procesy wymiany masy oraz ułatwiają ewakuację produktów roztwarzania ze szczeliny międzyelektrodowej.
12. W szczelinie międzyelektrodowej panują korzystne warunki powstawania pęcherzyków kawitacyjnych. Rozpuszczony w elektrolicie gaz oraz produkty roztwarzania obniżają naprężenia niezbędne do wzrostu pęcherzyków kawitacyjnych. Moc (amplituda) drgań ultradźwiękowych musi być tak dobrana, aby w szczelinie międzyelektrodowej nastąpiła intensyfikacja kawitacji heterogenicznej (zachodzącej na granicy faz). Zbyt duża moc (amplituda) drgań ultradźwiękowych prowadzi do intensyfikacji kawitacji homogenicznej (wewnątrz szczeliny), co ma niekorzystny wpływ na proces roztwarzania elektrochemicznego.

7.2.2. Wnioski o charakterze użytkowym

Podstawowe korzyści związane z wprowadzeniem drgań ultradźwiękowych do obróbki USECM - CNC przedstawiają się następująco:

1. Drgania ultradźwiękowe powodują zmianę charakterystyki układu elektrochemicznego elektroda robocza - elektrolit - przedmiot obrabiany, powodując zmniejszenie spadku potencjału na anodzie i katodzie oraz zmianę obrabialności elektrochemicznej. Obrabialność elektrochemiczna rośnie wraz z mocą drgań ultradźwiękowych, natomiast istnieje optymalna wartość mocy ultradźwięków, przy której E osiąga wartość minimalną wynosi $70 W$ (odpowiada to amplitudzie drgań ER $A = 4.83 \mu m$).
2. Zarówno w przypadku drażenia jaki i ECM - CNC zastosowanie drgań ultradźwiękowych elektrody roboczej powoduje zwiększenie lokalnej prędkości roztwarzania. W wyniku tego obserwujemy wyraźny wzrost wydajności procesu V_w oraz grubości usuniętego naddatku a w stosunku do obróbki bez wspomaganie US. Zwiększenie grubości usuniętego naddatku jest wyraźne dla $S_0 = 0.1 \div 0.4 mm$.
3. Wpływ ultradźwięków na chropowatość powierzchni zależy od wartości chropowatości obrabianej powierzchni. Dla USECM gdzie $Ra > 1 \mu m$, $Rz > 7 \mu m$

obserwujemy zmniejszenie chropowatości powierzchni w porównaniu do obróbki bez ultradźwięków. Natomiast dla obróbki elektrodą uniwersalną minimalne wartości chropowatości w obu badanych przypadkach są zbliżone od $0.3 \mu m$,

4. Wprowadzenie ultradźwięków do procesu ECM - CNC przynosi najwięcej korzyści dla takich wartości parametrów obróbki (U, v_p, S_o), dla których zapewnienie optymalnego przebiegu procesu roztwarzania elektrochemicznego jest utrudnione. Obserwujemy znaczny wzrost a i V_w dla grubości szczeliny międzyelektrodowej $S \approx 0.1 mm$ oraz znaczny spadek chropowatości dla $U = 8 \div 10 V$.

7.2.3. Wnioski do dalszych badań

W ramach pracy starano się kompleksowo przedstawić zagadnienia związane z zastosowaniem ultradźwięków w obróbce elektrochemicznej, jednak niektóre zagadnienia zostały jedynie wstępnie rozwiązane a inne musiały zostać pominięte. Dlatego też, dalsze badania obróbki USECM - CNC powinny dotyczyć następujących zagadnień:

1. Doskonalenia modelu numerycznego przepływu elektrolitu w obróbce elektrochemicznej wspomaganiej ultradźwiękami. W modelu tym należy uwzględnić wydzielanie się gazu, roztwarzanego się materiału oraz zmiany temperatury elektrolitu. Celem modelowania numerycznego powinno być stworzenie pełnego modelu obróbki USECM, uwzględniającego reakcje elektrodowe zachodzące wewnątrz szczeliny.
2. Przeprowadzenia analiz numerycznych oraz badań doświadczalnych mających na celu stworzenie zależności pomiędzy ciśnieniem wejściowym elektrolitu p_{in} a zjawiskami zachodzącymi w szczelinie oraz wskaźnikami technologicznymi procesu.
3. W trakcie realizacji pracy skoncentrowano się na jednym z efektów wprowadzenia drgań ultradźwiękowych, czyli na kawitacji oraz następstwach tego zjawiska. Wprowadzenie ultradźwięków związane jest również ze zmianą przewodności właściwej elektrolitu czy wzrostem temperatury elektrolitu, dlatego też dalsze prace powinny obejmować również te aspekty wprowadzenia drgań. Zwrócono również uwagę na zjawiska sonochemiczne, które mogą zachodzić w szczelinie międzyelektrodowej, dlatego też w dalszym etapie prac dotyczących obróbki elektrochemicznej wspomaganiej ultradźwiękami konieczne jest przeanalizowanie możliwości występowania i ewentualnego wpływu tych zjawisk na procesy elektrodowe.
4. Badania mające na celu ustalenie dokładnych zależności współczynnika obrabialności elektrochemicznej ηk_v oraz spadku potencjału na elektrodach E

w funkcji amplitudy drgań ultradźwiękowych, oraz uzupełnienie tymi zależnościami bazy danych technologicznych dla obróbki ECM - CNC. Umożliwi to wykorzystanie tych informacji do projektowania procesu technologicznego USECM - CNC.

5. Badania w celu określenia wpływu kształtu części roboczej elektrody uniwersalnej na rozkład intensywności zjawisk kawitacyjnych wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej. Związane jest to z określeniem zależności wpływu ultradźwięków w funkcji kąta pomiędzy kierunkiem drgań ER a normalną do wybranego punktu PO. Prace te mają ścisły związek z możliwościami zastosowania trójosiowego układu sterowania do obróbki USECM - CNC.

Bibliografia

- [1] *Fluent 6.1 Documentation*.
- [2] D. H. Ahmed, R. Deam, J. Naser, F. Chen. Optimising the focus tube length for abrasive water jet using numerical simulations. *Profiles in Industrial Research Knowledge and Innovation*, strony 14 – 19, Swinburne University, Australia, 15 - 19 lipca 2002.
- [3] H. S. J. Altena, A. De Silva, J. A. McGeough. Simulation of the process based on the characteristic relations. *Proceedings of The 2nd International Conference on Machining and Measurements of Sculptured Surfaces MMSS'2000*, strony 407 – 418, Kraków, Polska, wrzesień 2000.
- [4] D. K. Aspinwall, Y. Kasuga, A. L. Mantle. The use of ultrasonic machining for the production of holes in γ -TiAl. *Proceedings of The 13th International Symposium for Electromachining ISEM XIII*, strony 925 – 937, Bilbao, Hiszpania, 2001.
- [5] C. E. Banks, R. G. Compton. Voltammetric exploration and applications of ultrasonic cavitation. *ChemPhysChem*, 4(2):169 – 178, luty 2003.
- [6] J. Bień, L. Stępnia, L. Wolny. *Ultradźwięki w dezynfekcji wody i preparowaniu osadów ściekowych przed ich odwadnianiem*, wolumen 37 serii *Monografie*. Politechnika Częstochowska, 1995.
- [7] P. Bradshaw. Turbulence modeling with application to turbomachinery. *Progress in Aerospace Sciences*, 32(6):575 – 624, grudzień 1996.
- [8] Ch. E. Brennen. *Cavitation and Bubble Dynamics*. Numer 44 serii Oxford Engineering Science. Oxford University Press, New York and Oxford, 1995.
- [9] M. Chuchro. *Modelowanie procesu obróbki elektrochemicznej uniwersalną elektrodą kulistą*. Praca doktorska, Politechnika Krakowska, 1998.
- [10] M. Chuchro, J. Czeka, A. Ruszaj. Electrical discharge machining with ultrasonic assistance. *MECHANICS 2002 - Proceedings of The International Scientific Conference*, numer 193 serii Scientific Bulletins of Rzeszów University of Technology, strony 57 – 66, 2002.
- [11] M. Chuchro, J. Czeka, A. Ruszaj. Zastosowanie drgań ultradźwiękowych do wspo-

- magania procesu drażenia elektroerozyjnego. *Materiały Konferencji EM'03 - Obróbka Erozyjna (Electromachining)*, strony 38 – 45, Bydgoszcz - Rydzyna, 2003.
- [12] M. Chuchro, i in. Modernizacja procesu obróbki elektrochemicznej łopatek silników przepływowych w WSK Rzeszów. *Materiały Konferencji EM'2000*, wolumen MECHANIKA 46 serii *Zeszyty Naukowe ATR*, strony 23 – 30. Akademia Techniczno - Rolnicza Bydgoszcz, 2000.
- [13] M. Chuchro, A. Ruszaj. Drażenie elektrochemiczne kokil. *Mechanik*, 3:169 – 169, 1981.
- [14] M. Chuchro, A. Ruszaj, J. Czekaj, T. Krzywda. Possibility of electrodischarge machining supported by ultrasonic vibrations. *DAAAM International Scientific Book*, strony 089 – 096, Wiedeń, Austria, 2002.
- [15] M. Chuchro, A. Ruszaj, M. Zybura - Skrabalak. Badania procesów kształtowania materiałów obróbką elektrochemiczną i elektrochemiczno - ścierną. *Prace IOS, Seria Referaty*, 446:141 – 161, 1999.
- [16] M. Chuchro, A. Ruszaj, M. Zybura - Skrabalak, H. Altena, A. De Silva, J.A. McGeough, Kozak J. Advantages od electrodischarge machining by electrode ultrasonic vibrations. *Proceedings of The Symposium on Research on Clean Hybrid Micromachining (HMM) Processes*, strony A2-1 – A2-19, 2001.
- [17] M. Chuchro, M. Zybura - Skrabalak, A. Ruszaj, J. Czekaj, S. Skoczypiec, G. Skrabalak. Primary research on hybrid erosion machining processes. *Proceedings of The 2nd International Conference on Machining and Measurement of Sculptured Surfaces MMSS'2000*, strony 565 – 578, 2000.
- [18] D. Clifton, Y. Imai, J. A. McGeough. Some ultrasonic effects in machining materials encountered in the offshore industries. *MATADOR Conference*, 1993.
- [19] D. Clifton, A. R. Mount, G. M Alder, Jardine D. Ultrasonic measurement of the inter - electrode gap in electrochemical machining. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 42:1259 – 1267, 2002.
- [20] L. Davidson. *An Introduction to Turbulence Models*, wolumen 97/2 serii *Publications*. Chalmers University of Technology, Geteborg, listopad 2003.
- [21] A. D. Davydov, J. Kozak. *Vysokoskorostnoe Elektrochimizseskoje Formoobrazovanie*. Izd. Nauka, Moskwa, 1990.
- [22] L. Dąbrowski. *Podstawy komputerowej symulacji kształtowania elektrochemicznego*. Numer 154 serii *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej - Mechanika*. 1992.
- [23] L. Dąbrowski. Symulacja komputerowa drażenia elektrochemicznego (ECM). *Materiały Konferencji EM'97 - Obróbka Erozyjna (Electromachining)*, strony 140 – 147, Bydgoszcz - Golub Dobrzyń, 1997.
- [24] L. Dąbrowski, J. Yu. Effect of ultrasonic wave on EDM process. *Materiały Konferencji EM'03 - Obróbka erozyjna (Electromachining)*, strony 19 – 19, 2003.
- [25] P. Domanowski, A. F. Budzyński, J. Kozak. Curvilinear surfaces shaping by electrochemical generating machining (ECGM). *Proceedings of The 1st International Conference on Machining and Measurements of Sculptured Surfaces MMSS'97*, strony 355 – 364, Listopad 1997.

- [26] W. Duch, G. H. F. Diercksen. Neural networks as tools to solve problems in physics and chemistry. *Computer Physics Communication*, (82), 1994.
- [27] J. Gawlik, K. Karbowski, A. Ruszaj. The neural - genetic optimisation of the electrochemical machining. *Computer Integrated Manufacturing*, wolumen 1, strony 166 – 173. WNT Warszawa, 1999.
- [28] J. Gawlik, K. Karbowski, A. Ruszaj, M. Zybura - Skrabalak. Computer aided prediction of efficiency of electrochemical machining with universal electrode - tools by neural networks. *Proceedings of The 13th Conference BIAM'96*, strony 25 – 27, Zagrzeb, Chorwacja, 18 - 20 czerwca 1996.
- [29] J. R. Glimore. Ultrasonic machining and polishing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 64:785 – 793, 1993.
- [30] V. V. Gostev. Kacestvo poverchnosti tverdykh splavov pri almazno - elektroliiceskom slifovanii. *Elektronn. Obr. Mat.*, (3), 1968.
- [31] R. Górecka. *Teoria i technika eksperymentu*. Pomoce dydaktyczne. Politechnika Krakowska, 1995.
- [32] R. Gryboś. *Podstawy Mechaniki Płynów*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 1998.
- [33] R. A. Gurwicz. *Almazno - elektroliticeskoje sverlenie tverdykh splavov*. Wyd. Naukowe Dumkla, Kijów, 1975.
- [34] J. O. Hinze. *Turbulence*. McGraw Hill, New York, 1975.
- [35] B. Kacprzyński. *Planowanie eksperymentów*. Wyd. Naukowo - Techniczne, Warszawa, 1974.
- [36] K. Karbowski, A. Ruszaj. Computer aided electrochemical machining process designing when using system AUTOCAD 12. *Proceedings of The 6th International DAAAM Symposium: Intelligent Manufacturing Systems*, strony 163 – 164, 26 - 28 października 1995.
- [37] G. V. Kargin. Electrochemical shaping using tabular section cathode tool. *Russian Engineering Journal*, 4(4):73 – 76, 1975.
- [38] A. M. Kotlar, M. V. Szczerbak. Experimental investigations of abrasive electrochemical grinding. *Elektronnaja Obrabotka Materialov*, (4):29 – 32, 1974.
- [39] J. Kozak. *Obróbka elektrochemiczna i modelowanie matematyczne procesów obróbki elektrochemicznej*. Podręcznik internetowy.
- [40] J. Kozak. *Kształtowanie powierzchni obróbką elektrochemiczną bezstykową (ECM)*. Numer 41 serii Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej - Mechanika. 1976.
- [41] J. Kozak. Analiza powiązań procesów mikroskrawania i roztwarzania anodowego w szlifowaniu elektrochemicznym. *Materiały XIX Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej*, strony 275 – 282, 1996.
- [42] J. Kozak. Analiza procesu wygładzania w czasie obróbki ultradźwiękowej ze wspomaganie elektrochemicznym. *Stud. i Mat*, 14(1/2):283 – 285, 1996.
- [43] J. Kozak. Wybrane zagadnienia hybrydowych obróbek erozyjnych. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*, 16(spec.):59 – 65, 1996. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- [44] J. Kozak. Analiza procesu obróbki elektrochemicznej elektrodą drgającą. *Mate-*

- riaty Konferencji EM'97 - Obróbka Erozyjna (*Electromachining*), strony 204 – 212, Bydgoszcz, Golub - Dobrzyń, 1997.
- [45] J. Kozak, A. F. Budzyński, P. Domanowski. Computer simulation electrochemical shaping (ECM - CNC) with using universal tool electrode. *Proceedings of The 13th International Conference on Computer - Aided Production Engineering CAPE 1997*, strony 287 – 293, czerwiec 1997.
- [46] J. Kozak, M. Chuchro, A. Ruszaj, Karbowski K. The computer aided simulation of electrochemical process with universal spherical electrodes when machining sculptured surface. *Proceedings of The 15th International Conference on Computer - Aided Production Engineering CAPE 1999*, strony 425 – 430, kwiecień 1999.
- [47] J. Kozak, L. Dąbrowski, M. Rozenek, R. Sławiński. Modelowanie obróbki elektrochemicznej elektrodami uniwersalnymi (ECM - CNC). Praca dla IOS Kraków, 1993.
- [48] J. Kozak, L. Dąbrowski, A. Ruszaj, R. Sławiński. Computer simulation of numerically controlled electrochemical machining (ECM - NC) with a spherical tool electrode. *Proceedings of The 11th International Conference on Computer - Aided Production Engineering CAPE 1995*, strony 205 – 210, wrzesień 1995.
- [49] J. Kozak, K. P. Rajurkar. Hybrid machining process evaluation and development. *Proceedings of The 2nd International Conference on Machining and Measurements of Sculptured Surfaces MMSS'2000*, strony 501 – 536, 2000.
- [50] J. Kozak, K. P. Rajurkar, L. Dąbrowski. Effects of ultrasonic vibrations on the performance characteristics of electrical discharge machining. *Proceedings of The 3rd International Conference on Machining and Measurements of Sculptured Surfaces MMSS'2003*, strony 330 – 337, wrzesień 2003.
- [51] J. Kozak, K. P. Rajurkar, S. Malicki. Study of electrochemical machining utilizing a vibrating tool electrode. *Proceedings of The 16th International Conference on Computer - Aided Production Engineering CAPE 2000*, strony 173 – 181, 2000.
- [52] J. Kozak, K. P. Rajurkar, A. Ruszaj, R. J. Sławiński. Sculptured surface finishing by NC - electrochemical machining with ball - end electrode. *Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń*, 22(1):54 – 74, 1998.
- [53] J. Kozak, A. Ruszaj, L. Dąbrowski, R. J. Sławiński. Symulacja komputerowa obróbki elektrochemicznej elektrodą sferyczną ze sterowaniem numerycznym (ECM - CNC). *Materiały Konferencji Elektromachining EM'94, Bydgoszcz - Ciechocinek*, strony 192 – 203, T. I., 1994.
- [54] D. Kremer, i in. Effects of ultrasonic vibration on the performances in EDM. *Annals of the CIRP*, 38(1):199 – 202, 1989.
- [55] D. Kremer, A. Malouli, K. Raissi. Ultrasonic machining and polishing of surfaces. *Proceedings of The 2nd International Conference on Machining and Measurements of Sculptured Surfaces MMSS'2000*, strony 467 – 490, wrzesień 2000.
- [56] D. Kremer, S. M. Saleh, S. R. Ghabrial, A. Moisan. The state of art of ultrasonic machining. *Annals of the CIRP*, 30(1), 1981.
- [57] H. Kuttruff. *Ultrasonics Fundamentals and Applications*. Elsevier Science Publishers LTD, 1991.
- [58] V. G. Levich. *Physicochemical Hydrodynamics*. Prentice - Hall, New York, 1962.

- [59] A. Śliwiński. *Ultradźwięki i ich zastosowania*. Wydawnictwo Naukowo - Techniczne. Warszawa, 2001.
- [60] J. A. McGeough. *Principles of Electrochemical Machining*. Chapman and Hall, Londyn, 1974.
- [61] T. Miller. Przyrządy do pomiaru topografii powierzchni. *Mechanik*, 12:638 – 639, 1997.
- [62] T. Miller. Wieloparametrowe skomputeryzowane urządzenia do pomiaru topografii powierzchni. *Mat. VII Konferencji Naukowo - Technicznej: Metrologia w technikach wytwarzania maszyn*, numer 63 serii Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej - Mechanika, strony 95 – 102, Kielce, Polska, 1997.
- [63] T. Miller, A. Ruszaj. The investigations of surface geometrical structure after machining with universal tools. *Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń*, 23(1):81 – 95, 1999.
- [64] T. Miller, A. Ruszaj. Surface geometrical structure measurements and modelling after machining with universal tools. *MEASUREMENT'99 - Proceed. 2nd International Conference on Measurement*, strony 213 – 216, Smolenice, Słowacja, 26 - 29 kwiecień 1999.
- [65] T. Miller, A. Ruszaj. Wybrane zagadnienia pomiarowe w badaniach struktury geometrycznej powierzchni. *Mat. VIII Konferencji Naukowo - Technicznej: Metrologia w Technikach Wytwarzania Maszyn*, numer 63 serii Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej - Mechanika, strony 287 – 293, 1999.
- [66] Y. Naizhang, W. Bin, Y. Xueying, Y. Jiawen, Y. Chenge. Investigation on application of electrochemical contour evolution machining. *Proceedings of The 9th International Symposium for Electromachining ISEM IX*, Nagoya, 1990.
- [67] R. Nowicki. Diagnostyka akustyczna w paśmie ultradźwiękowym. *Przegląd Mechaniczny*, (3):12 – 15, 1994.
- [68] K. E. Oczos. Istota, znaczenie i rozwój hybrydowych procesów obróbki ubytkowej. *Zeszyty Naukowe Akademii Techniczno - Rolniczej*, wolumen 225 serii *Mechanika*, strony 145 – 164, Bydgoszcz, 2000.
- [69] Ł. G. Łojcianskij. *Mechanika żidkosti i gaza*. Izd. Nauka, Moskwa, 1973.
- [70] T. Paczkowski. Symulacja komputerowa obróbki elektrochemicznej elektrodą drgającą. *Zeszyty Naukowe Akademii Techniczno - Rolniczej*, wolumen 225 serii *Mechanika*, strony 175 – 182, Bydgoszcz, 2000.
- [71] T. Paczkowski. *Badania teoretyczne i doświadczalne obróbki elektrochemicznej elektrodą drgającą*. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, 2002.
- [72] S. A. Perusich, R. C. Alkire. Ultrasonically induced cavitation studies of electrochemical passivity and transport mechanism. I. Theoretical. *Journal of The Electrochemical Society*, 138(3):700 – 707, 1991.
- [73] S. A. Perusich, R. C. Alkire. Ultrasonically induced cavitation studies of electrochemical passivity and transport mechanism. II. Experimental. *Journal of The Electrochemical Society*, 138(3):708 – 713, 1991.
- [74] R. Polański. *Planowanie doświadczeń w technice*. Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa, 1984.

- [75] K. P. Rajurkar, D. Zhu, J. A. McGeough, J. Kozak, A. De Silva. New developments in Electro - Chemical machining. *Annals of the CIRP*, 48(2):567 – 579, 2000.
- [76] 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.
- [77] A. Ruszaj. Badania procesu ECM dla różnych wariantów kinematyki elektrod. *Szkola Naukowa Obróbek Erozyjnych. Zbiór referatów wygłoszonych w latach: 1987, 1988, 1989*, strony 79 – 91, 1989.
- [78] A. Ruszaj. *Procesy obróbek elektrochemicznej i elektroerozyjnej w różnych odmianach kinematycznych*, wolumen 76 serii *Zeszyty Naukowe IOS*. 1989.
- [79] A. Ruszaj. Investigations on the process of electrochemical sinking taking into account the randomness of phenomena occurring in the machining area. *WEAR*, (147):25 – 40, 1991.
- [80] A. Ruszaj. *Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi*. IOS, Kraków, 1999.
- [81] A. Ruszaj. Obróbka elektrochemiczna - stan badań oraz perspektywy nowych zastosowań. *Materiały Konferencji EM'2000 - Obróbka erozyjna (Electromachining)*, strony 142 – 153, Bydgoszcz - Wenecja, 2000.
- [82] A. Ruszaj, M. Chuchro, J. Czekał, J. Dziedzic, M. Zybura - Skrabalak, A. Novak. Możliwości zastosowania technologii obróbki elektrochemicznej (ECM) w przemyśle. *Mechanik*, (1):35 – 38, 1993. (Prace IOS, ser. Biuletyn).
- [83] A. Ruszaj, M. Chuchro, J. Czekał, M. Krehlik, M. Zybura - Skrabalak. The investigation aiming to increase the flexibility of electrochemical grinding. *International Journal of Electrical Machining*, (3):25 – 32, 1998.
- [84] A. Ruszaj, M. Chuchro, M. Zybura - Skrabalak. Some problems of electrochemical machining process automation. *Proceedings of 7th International DAAAM Symposium*, strony 377 – 378, Wiedeń, 17 - 19 październik 1996.
- [85] A. Ruszaj, M. Chuchro, M. Zybura. The influence of phenomena occurring into interelectrode gap on accuracy of electrochemical machining. *Proceedings of The 31st International MATADOR Conference*, strony 421 – 425, Manchester, UK, 20 - 21 kwietnia 1995.
- [86] A. Ruszaj, J. Czekał, M. Chuchro, S. Skoczypiec. Badania procesu obróbki elektrochemicznej - ścierną uniwersalną elektrodą. *Obróbka ścierna w technikach wytwarzania. Monografia*, strony 219 – 226. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [87] A. Ruszaj, J. Czekał, M. Krehlik, M. Zybura - Skrabalak, M. Chuchro, D. Nowak. The advantages of electrochemical grinding process application for sculptured surface machining. *Proceedings of The 1st International Conference on Machining and Measurement of Sculptured Surfaces MMSS'97*, strony 398 – 403, Kraków, Polska, 1997.
- [88] A. Ruszaj, J. Czekał, M. Krehlik, M. Zybura - Skrabalak, M. Chuchro, D. Nowak. The electrochemical grinding of surface after rough milling when using universal

- tools. *Proceedings of The 14th International Conference on Computer - Aided Production Engineering CAPE 1998*, 1998.
- [89] A. Ruszaj, J. Czekaj, S. Skoczypiec, M. Chuchro. Some aspects of surface electrochemical microfinishing. *Proceedings of The 19th International Conference on Computer - Aided Production Engineering CAPE 2005*, Melbourne, Australia, 21 - 23 listopada 2005. Artykuł w druku.
- [90] A. Ruszaj, J. Czekaj, Miller T., S. Skoczypiec. Electrochemical finishing surfaces after rough milling. *Proceedings of 3rd International Conference on Advances in Production Engineering (APE'2004)*, wolumen 3, strony 199 – 206, Warszawa, Polska, 17 - 19 czerwca 2004.
- [91] A. Ruszaj, J. Czekaj, M. Zybura - Skrabalak, M. Chuchro, S. Skoczypiec, S. Dąbrowski. Zastosowanie drgań ultradźwiękowych do wspomagania procesu drażenia elektroerozyjnego. *Materiały Konferencji EM'03 - Obróbka Erozyjna (Electromachining)*, strony 261 – 268, Bydgoszcz - Rydzyna, 2003.
- [92] A. Ruszaj, J. Czekaj, M. Zybura - Skrabalak, A. Novak, J. Rosiek. The influence of ECM process parameters on shape errors when using nonprofiled electrode - tool. *Proceedings of The 10th International Symposium for Electromachining ISEM X*, strony 459 – 465, Magdeburg, maj 1992.
- [93] A. Ruszaj, A. Dziedzic, M. Zybura - Skrabalak. Wybrane zagadnienia sterowania procesem obróbki elektrochemicznej. *Obróbka Erozyjna - Materiały Konferencyjne EM'94*, wolumen 2, strony 68 – 76, Bydgoszcz - Ciechocinek, 1994.
- [94] A. Ruszaj, J. Dziedzic, J. Czekaj, M. Krehlik. Electrochemical machining with electrode displacement controlled in three axes. *Proceedings of The 11th International Symposium for Electromachining ISEM XI*, strony 553 – 563, Lausanne, Szwajcaria, 17 - 21 kwietnia 1995.
- [95] A. Ruszaj, i in. Badania w celu określenia możliwości sterowania procesem obróbki elektrochemicznej nieprofilowaną elektrodą z wykorzystaniem komputera przemysłowego. Sprawozdania IZTW nr 7894, 8030, 7974, Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie, 1993, 1994.
- [96] A. Ruszaj, i in. Elektrochemiczna obróbka wykańczająca elektrodą uniwersalną (ECM - CNC) powierzchni o podwójnej krzywiznie. Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego KBN Nr 7 T07D 032 10, 1998.
- [97] A. Ruszaj, i in. Urządzenia do precyzyjnego elektrochemicznego drażenia łopatek silników przepływowych. *Zeszyty Naukowe Akademii Techniczno - Rolniczej*, wolumen 225 serii *Mechanika*, strony 199 – 205, 2000.
- [98] A. Ruszaj, i in. Porównanie wybranych sposobów wspomagania procesu roztwarzania elektrochemicznego ECM. Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego KBN Nr 7 T07D 002 18, 2002.
- [99] A. Ruszaj, M. Zybura - Skrabalak. The mathematical modeling of electrochemical machining with flat enden universal electrodes. *Journal of Materials Processing Technology*, 109(3):333 – 338, 2001.
- [100] A. Ruszaj, M. Zybura - Skrabalak, M. Chuchro. Kształtowanie właściwości warstwy wierzchniej materiałów obróbką elektroerozyjną i elektrochemiczną. *Materiały VII Konferencji Naukowo-Technicznej nt: Przepływowe Maszyny Wirnikowe*, strony 233 – 240, Rzeszów, 1993.

- [101] A. Ruszaj, M. Zybura - Skrabalak, M. Chuchro. The modelling of electrochemical machining process when using nonprofiled electrode. *Proceeding of The 4th International Conference MAT-TEC'93: Improvement of Materials*, strony 93 – 98, Gournay-sur-Marne, France, 1993.
- [102] A. Ruszaj, M. Zybura - Skrabalak, M. Chuchro. Wpływ zjawisk w szczelinie między-elektrodowej na dokładność obróbki elektrochemicznej. *Zbiór Referatów Pierwszego Forum Prac Badawczych: Kształtowanie Części Maszyn Przez Usuwanie Materiału*, strony 316 – 326, Koszalin, 1994.
- [103] A. Ruszaj, M. Zybura - Skrabalak, M. Chuchro. Badania w celu zwiększenia dokładności kształtowania elementów na obrabiarkach elektrochemicznych. *Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń*, 19(3):69 – 77, 1995.
- [104] A. Ruszaj, M. Zybura - Skrabalak, M. Chuchro, J. Czekaj. Zastosowanie obróbki ścierniej do wspomaganiania niekonwencjonalnych procesów wytwarzania. *Mat. XXV Naukowej Szkoły Obróbki Ścierniej, Wrocław - Duszniki-Zdrój*, strony 55 – 60, 11 - 14 września 2002.
- [105] A. Ruszaj, M. Zybura - Skrabalak, M. Chuchro, J. Czekaj, J. Dziedzic, M. Krehlik. The finishing electrochemical machining of curvilinear surfaces. *Proceedings of The 1996 Engineering Systems Design and Analysis Conference (ESDA 1996)*, wolumen 3, strony 207 – 214, Nowy York, 1996. ASME.
- [106] A. Ruszaj, M. Zybura - Skrabalak, J. Czekaj. Obrabiarka elektrochemiczna o złożonej kinematyce elektrod. etap: Założenia technologiczno - ekonomiczne EOCA 40. Seria Sprawozdania IOS, nr. bibl. IZTW 6865, Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, 1987.
- [107] A. Ruszaj, M. Zybura - Skrabalak, S. Skoczypiec, R. Żurek. Electrochemical machining supported by electrode ultrasonic vibrations. *Proceedings of The 13rd International Symposium of Electromachining ISEM XIII*, wolumen 2, strony 953 – 964, Bilbao, Hiszpania, 2001.
- [108] A. Ruszaj, M. Zybura - Skrabalak, R. Żurek, S. Skoczypiec, G. Skrabalak. Electrochemical machining supported by electrode ultrasonic vibrations. *Proceedings of The Symposium on Research on Clean Hybrid Micromachining (HMM) Processes*, strony B6-1 – B6-15, Kraków, Poland, 2001.
- [109] A. Ruszaj, M. Zybura - Skrabalak, R. Żurek, S. Skoczypiec, G. Skrabalak. Electrochemical drilling supported by electrode ultrasonic vibrations. *Postępy Technologii Maszyn*, 27(1):41 – 53, 2003.
- [110] A. Ruszaj, M. Zybura, M. Chuchro. Wybrane zagadnienia kształtowania elektrochemicznego elektrodami uniwersalnymi. *Zbiór referatów wygłoszonych na posiedzeniu Sekcji KBM PAN - Kraków*, numer 53 serii Prace IOS, strony 16 – 17 marzec, 109 - 120 1995.
- [111] A. Ruszaj, M. Zybura, R. Żurek, G. Skrabalak. Some aspects of electrochemical machining process supported by electrode ultrasonic vibrations optimization. *Proceedings of The 2nd International Conference on Advances in Production Engineering*, wolumen 2, strony 281 – 290, Warszawa, Polska, czerwiec 2001.
- [112] A. Ruszaj, M. Zybura, R. Żurek, G. Skrabalak. Some aspects of the electrochemical machining process supported by electrode ultrasonic vibration optimization. *Journal of Engineering Manufacture*, 217:1365 – 1371, 2003.

- [113] N. Sato. A theory for breakdown of anodic oxide films on metals. *Elektrochem. Acta*, 16(10):1683 – 1692, 1971.
- [114] H. Sholl, T. Błaszczuk, P. Krzyczmonik. *Elektrochemia. Zarys teorii i praktyki*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 1998.
- [115] A. De Silva, H. Altena, J. A. McGeough. Precision ECM through empirical modeling of process characteristic. *Proceedings of The 2nd International Conference on Machining and Measurements of Sculptured Surfaces MMSS'2000*, strony 382 – 394, wrzesień 2000.
- [116] A. K. Singhal, M. M. Athavale, H. Li, Y. Jiang. Mathematical basis and validation of the full cavitation model. *Journal of Fluid Engineering*, 124:617 – 624, wrzesień 2002.
- [117] K. S. Suslick. Sonochemistry. *Science*, 247:1439 – 1445, marzec 1990.
- [118] K. S. Suslick. Sonoluminescence and sonochemistry. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 2001.
- [119] K. S. Suslick, Y. Didenko, M. M. Fang, T. Hyeon, K. J. Kolbeck, W. B. McNamara, M. M. Mdleleni, Wong M. Acoustic cavitation and its chemical consequences. *Philosophical Transaction of the Royal Society A*, 357:335 – 353, 1999.
- [120] L. M. Szczerbakow. Fiziko - chemiczeskije osnovy teorii formoobrazowanija poverchnostej pri rozmernoj elektrochimiczeskoj obrabotke. *Fiz. i Chim. Obrab. Mater.*, (5), 1968.
- [121] R. Tadeusiewicz. *Sieci neuronowe*. Akademicka Oficyna Wydawnicza RM, Warszawa, wydanie II, 1993.
- [122] I. Tenocak. *Computational methodology for the simulation of turbulent cavitating flows*. Praca doktorska, University of Florida, 2002.
- [123] T. B. Teo, D. K. Aspinwall, H. Wise. Review on ultrasonic machining. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 38(4):239 – 255, 1998.
- [124] V. D. Vermel, i in. Avtomatizacija podgotovki programm elektrochimiceskoj obrabotki poverchnostej elektrodom s polusfericeskoj rabocej castju na trechkoordinatnom stanke s CzPU. *Elektron. Obr. Mat.*, (3):9 – 15, 1994.
- [125] X. Wang, J. Zhou, G. K. Gan, B. Ngoi. Theoretical and experimental studies of ultraprecision machining of brittle materials with ultrasonic vibration. *Int. J. Adv. Manuf. Technology*, 20:99 – 102, 2002.
- [126] S. Zaborski. *Elektrochemiczna instensyfikacja obróbki śiernej materiałów trudno-skrawalnych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2000.
- [127] A. N. Zajcev, i in. K vaprosy o rascete parametrov elektrochimiceskogo formoobrazovanija sloznofasonnyh detalej. *Elektronn. Obr. Mat.*, (5), 1989.
- [128] F. Zawistowski. New system of electrochemical form machining using universal rotating tools. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 30:475 – 483, 1990.
- [129] J. Zhixin, Z. Jianhua, Xing A. Study on a new kind of combined machining technology of ultrasonic machining and electrical discharge machinign. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 37(2):193 – 199, 1997.
- [130] M. Zybura - Skrabalak. *Porównanie wybranych sposobów wygładzania powierzchni*

- materialów obróbką elektrochemiczną bezstykową.* Prace IOS. Zeszyty Naukowe. 80, 1999.
- [131] M. Zybura - Skrabalak, M. Chuchro, A. Ruszaj. Polepszenie jakości warstwy wierzchniej obróbką elektrochemiczną bezstykową. *Materiały II Międzynarodowej Konferencji Naukowo - Technicznej WW'93: Wpływ Technologii na Stan Warstwy Wierzchniej*, strony 127 – 130, Gorzów Wlkp. - Lubniewice, 1993.
- [132] M. Zybura - Skrabalak, A. Ruszaj. Electrochemical smoothing of surfaces after rough electrodischarge machining. *Proceedings of The 2nd Inter. Symp. Advanced Manufacturing Processes, Systems and Technologies (AMPST'99)*, strony 369 – 377, West Yorkshire, UK, 30 - 31 marzec 1999. University of Bradford.