

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA  
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH  
W BYDGOSZCZY

ZESZYTY NAUKOWE NR 225

# MECHANIKA 46

***em2000***

OBRÓBKA EROZYJNA (ELECTROMACHINING)

BYDGOSZCZ - 2000

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA  
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH  
W BYDGOSZCZY

ZESZYTY NAUKOWE NR 225

# MECHANIKA 46



***em2000***

OBRÓBKA EROZYJNA (ELECTROMACHINING)

BYDGOSZCZ - 2000

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO  
dr hab. inż. Janusz Prusiński, prof. nadzw. ATR

REDAKTOR NAUKOWY  
dr hab. inż. Maciej Woropay, prof. nadzw. ATR

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE  
mgr Michał Górecki, mgr inż. Daniel Morzyński

Wydano za zgodą Rektora  
Akademii Techniczno-Rolniczej  
w Bydgoszczy

ISSN 0208-6395

WYDAWNICTWA UCZELNIANE  
AKADEMII TECHNICZNO-ROLNICZEJ W BYDGOSZCZY

---

Wyd. I. Nakład 150 egz. Ark. aut. 13,65. Ark. druk. 15,25. Papier druk. kl. III.  
Oddano do druku i druk ukończono w maju 2000 r.

Uczelniany Zakład Małej Poligrafii ATR Bydgoszcz, ul. Ks. A. Kordeckiego 20  
Zamówienie nr 3/2000

2000 10 20/138

## Spis treści

1. Wiktor Babul, Andrzej Maranda, Jerzy Nowaczewski, Józef Paszula – Nowe kierunki rozwoju inżynierii materiałowej z wykorzystaniem metod wybuchowych .....	7
2. Jan Berkan – Nowe technologie w zakresie drażenia i wycinania elektroerozyjnego .....	15
3. Maria Chuchro, Adam Ruszaj, Zbigniew Chuchro, Jan Czekaj, Mikołaj Krehlik, Wit Woda, Maria Zybura-Skrabalak, Szczepan Białek, Władysław Kniewski, Antoni Malec – Modernizacja procesu obróbki elektrochemicznej łopatek silników przepływowych w WSK Rzeszów .....	23
4. Lucjan Dąbrowski, Mieczysław Marciniak – Hybrydowa obróbka przetłoczno-ścierna .....	31
5. Andrzej Gołąbczak – Produkty erozji w procesie elektrochemicznego ostrzenia ściernic ze spoiwem metalowym .....	37
6. Ashraf I. Hassan, Jan Kosmol, Jerzy Bursa – Analysis of Stresses in Abrasive Water-jet Machining (AWJM) .....	45
7. Wojciech Kacalak, Ryszard Lewkowicz, Ryszard Ściegienka – Wybrane zagadnienia obróbki jonowej powierzchni metali .....	61
8. Stanisław Kowalski, Kazimierz Wieczorowski – Ekologiczne aspekty procesów zgrubnego stykowego przecinania na przykładzie cięcia anodowo-mechanicznego .....	69
9. Jerzy Kozak, Kamalakar P. Rajurkar, Sławomir Malicki – Computer Simulation of Electrochemical Sinking Process .....	77
10. Jerzy Kozak, Marek Rozenek – Analiza energochłonności obróbki elektrochemicznej ciągłej i impulsowej .....	89
11. Leszek Kudła – Problemy kształtowania miniaturowych elementów z cienkich folii sposobami obróbki elektroerozyjnej .....	99
12. Adam Miernikiewicz – Erozja elektryczna spontaniczna i stymulowana .....	107
13. Piotr Niedzielski, Jacek Grabarczyk, Andrzej Gołąbczak, Petr Zahalka – Plazmowe wytwarzanie warstw nanokrystalicznego diamentu na narzędziach skrawających do materiałów drewnopochodnych .....	119
14. Bogdan Nowicki, Robert Pierzynowski, Sławomir Spadło – Badania wpływu wybranych parametrów obróbki BEDMM na jej efekty .....	127
15. Kazimierz E. Oczóś – Analiza porównawcza procesów obróbki ubytkowej form i matryc .....	135
16. Kazimierz E. Oczóś – Istota, znaczenie i rozwój hybrydowych procesów obróbki ubytkowej .....	145
17. Ewa Ozimina, Janusz Musiał, Michał Styp-Rekowski – Technologiczne uwarunkowania recyrkulacji płynów obróbkowych w procesach obróbki erozyjnej .....	165
18. Tomasz Paczkowski – Symulacja komputerowa obróbki elektrochemicznej elektrodą drgającą .....	175

19. Edward Pająk – Analiza systemów sterowania przecinarek anodowo- -mechanicznych .....	183
20. Robert Pierzynowski – Wybrane aspekty stopowania elektrodą szczotkową .....	191
21. Adam Ruszaj, Maria Chuchro, Zbigniew Chuchro, Jan Czekaj, Mikołaj Krehlik, Wit Woda, Maria Zybura-Skrabalak, Szczepan Białek, Władysław Kniewski, Antoni Malec – Urządzenia do precyzyjnego elektrochemicznego drażenia łopatek silników lotniczych .....	199
22. Grzegorz Siudyła – Analiza dokładności pozycjonowania w obrabiarkach elektroerozyjnych sterowanych numerycznie .....	207
23. Andrzej Stankiewicz – Projekt zastosowania sterowania rozmytego do drażarek elektroerozyjnych typu EDIOS .....	215
24. Stanisław Zaborski, Henryk Żebrowski – Dekohezja węglików spiekanych w strefie skrawania podczas obróbki elektrochemiczno-ściernej .....	223
25. Maria Zybura-Skrabalak, Adam Ruszaj – Struktura geometryczna powierz- chni w procesie obróbki elektrochemicznej .....	233

*Konferencja EM2000 (Electromachining) jest szóstym spotkaniem specjalistów zajmujących się problematyką obróbki erozyjnej. Po raz pierwszy tematykę konferencji rozszerzono o inne niekonwencjonalne zarówno metody obróbki, jak też i zastosowania metod uznawanych za tradycyjne, poszerzając w ten sposób krąg zainteresowanych osób; praktyków i teoretyków.*

*Tradycyjnie już Konferencja EM2000 organizowana jest w uzgodnieniu i pod patronatem Sekcji Podstaw Technologii Komitetu Budowy Maszyn Polskiej Akademii Nauk i Jego Magnificencji Rektora Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy przy wydatnej pomocy przy jej organizacji ze strony Komitetu Badań Naukowych oraz Zarządu Głównego i Bydgoskiego Oddziału Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich.*

*Jak zawsze konferencję zorganizowali, pracownicy Katedry Obrabiarek i Robotów istniejącej do niedawna w strukturze Wydziału Mechanicznego ATR w Bydgoszczy. Aktywnie wspierali ich przedstawiciele Wydziału Mechanicznego Politechniki Łódzkiej. Nad poziomem merytorycznym konferencji czuwał Komitet Naukowy, w którego pracach uczestniczyli znamienici przedstawiciele nauki polskiej, reprezentujący różne specjalności naukowe. Organizatorzy składają wszystkim przedstawicielom Komitetu Naukowego gorące podziękowania za wnikliwe recenzje nadesłanych referatów oraz życzliwe uwagi dotyczące organizacji konferencji.*

*Dzięki finansowej pomocy ze strony Komitetu Badań Naukowych i Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich konferencja odbywa się w Wenecji w ośrodku położonym na Pałukach oraz w najbliższych okolicach, na których istnieją liczne ślady działalności człowieka już z czasów prehistorycznych (VII-VI w. p.n.e.), a także znanych z wydarzeń mających miejsce w czasach powstawania i początkowych latach istnienia państwa polskiego (X-XIII w.). Jako organizatorzy mamy nadzieję, że świadomość powyższych faktów może współcześnie stać się dodatkowym czynnikiem stymulującym postęp, przyczyniając się tym samym do osiągnięcia założonego celu konferencji.*

*Przewodniczący Komitetu Organizacyjnego*

*Prof. dr hab. inż. Andrzej GOŁĄBCZAK*



## NOWE KIERUNKI ROZWOJU INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ Z WYKORZYSTANIEM METOD WYBUCHOWYCH

Wiktor Babul<sup>1</sup>, Andrzej Maranda<sup>2</sup>, Jerzy Nowaczewski<sup>2</sup>, Józef Paszula<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych,  
ul. Księcia Janusza, 00-961 Warszawa

<sup>2</sup>Wydział Uzbrojenia i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej,  
ul. S. Kaliskiego 2, 01-489 Warszawa

W pracy mającej charakter przeglądu przedstawiono krótkie charakterystyki metod wybuchowych stosowanych w inżynierii materiałowej: prasowania i obciążania materiałów intermetalicznych oraz magnetycznych, stopowania i umacniania połączonego z azotowaniem. Do referatu załączono obszerny spis publikacji dotyczących głównie prac wykonanych w WAT.

*Słowa kluczowe:* wysokoenergetyczna obróbka metali, materiały wybuchowe, detonacja, fale uderzeniowe

### 1. WSTĘP

Podczas detonacji materiałów wybuchowych (MW) w bardzo krótkim czasie (od  $10^{-7}$ ÷ $10^{-5}$  sek.) generowane są produkty, które mają początkowe ciśnienia rzędu kilkudziesięciu gigapaskali i temperatury kilku tysięcy kelwinów. Umiejętnie wykorzystywanie wspomnianych właściwości materiałów wybuchowych może być nowoczesnym „narzędziem” w wielu dziedzinach techniki i nauki. Zastosowanie MW w obróbce metali ma już wieloletnią historię. Techniki wybuchowe wykorzystywane są w technologiach umacniania, łączenia i ulepszania warstw wierzchnich, np.: przez napylenie proszków. Stosowane są również w innych dziedzinach obróbki metali, np. prasowaniu proszków, likwidacji naprężeń spawalniczych i tłoczeniu.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań - prowadzonych w Wojskowej Akademii Technicznej - dotyczących wybuchowego prasowania i obciążania materiałów intermetalicznych i magnetycznych oraz wybuchowego umacniania połączonego z azotowaniem. Zasygnalizowano również problematykę wybuchowego stopowania, które aktualnie jest jedną z najbardziej nowoczesnych wybuchowych metod obróbki powierzchni metali.

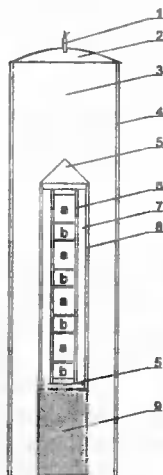


## 2. PRASOWANIE I OBCIĄŻANIE MATERIAŁÓW MAGNETYCZNYCH ORAZ INTERMETALICZNYCH

Stopy intermetaliczne (uporządkowane fazy międzymetaliczne) należą do materiałów, które obecnie uważa się za perspektywiczne gdyż można je wykorzystywać do wytwarzania, np. elementów silników spalinowych. Do obróbki materiałów intermetalicznych stosuje się oprócz konwencjonalnych także metody wysokoenergetyczne z wykorzystaniem materiałów wybuchowych. Pozwalają one na modyfikację struktury intermetalików poprzez jej zdefektowanie, co w konsekwencji prowadzi do zmiany ich właściwości fizykomechanicznych.

### 2.1. PRASOWANIE WYBUCHOWE PROSZKÓW

Do prasowania mieszanin proszków metali tworzących związki intermetaliczne [4, 16], proszków intermetalicznych ( $\text{FeAl}$ ,  $\text{Fe}_3\text{Al}$ ,  $\text{NiAl}$ ,  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ,  $\text{Al}_3\text{Ti}$  [5, 6, 17, 20], i proszków magnetycznych metali ziem rzadkich ( $\text{Sm-Fe-N}$ ,  $\text{Nd-Fe-B}$ ,  $\text{Pr-Fe-B}$  [8, 9], stosowano układy wybuchowe o symetrii cylindrycznej. Przykład takiego układu [16] przedstawiono na rys. 1. Próbkę mieszanin po wstępnym zaprasowaniu w pastylki umieszczano w pojemnikach wykonanych z miedzi lub stali. Pojemniki takie były umieszczane w układzie wybuchowym i poddawane jednokrotnemu lub wielokrotnemu obciążeniu materiałem wybuchowym.



Rys. 1. Schemat układu wybuchowego do prasowania próbek mieszanin intermetalicznych: 1 - zapalnik, 2 - detonator fali płaskiej, 3 - materiał wybuchowy, 4 - rura papierowa, 5 - korki stalowe, 6 - rura miedziana, 7 - woda, 8 - rura stalowa, 9 - łapacz pędu, a - pojemnik z prasowanym materiałem, b - przeładki miedziane [16]

Do obciążania próbek zastosowano trzy typy materiałów wybuchowych o różnicowanych parametrach detonacji: amonale (o zawartości aluminium w zakresie  $1\div 10$  cg/g), materiały wybuchowe zawieszinowe uczulane pyłem glinowym lub heksogenem. Zmiana zastosowanego materiału wybuchowego oraz geometrii stosowanego układu wybuchowego pozwala na dobranie optymalnych parametrów fali uderzeniowej obciążającej próbkę prasowanego proszku.

Umiejętne stosowanie wybuchowego prasowania proszków pozwala na osiągnięcie bardzo specyficznych ich właściwości. Jest to niemożliwe przy wykorzystaniu konwencjonalnych metod prasowania proszków. I tak po wybuchowym prasowaniu proszków magnetycznych metali ziem rzadkich uzyskuje się materiał, którego gęstość osiąga ponad 90 % wartości gęstości teoretycznej bez utraty własności magnetycznych tych związków [8, 9]. Dodatkowo materiały te po prasowaniu wybuchowym wykazują lepsze właściwości mechaniczne przy wzroście części parametrów magnetycznych prasowanych proszków (na przykład remanencji).

W przypadku prasowanych proszków intermetalicznych, oprócz wzrostu gęstości, bardzo często obserwowany jest duży przyrost twardości tych materiałów. Tablica 1 przedstawia wyniki pomiarów gęstości i twardości po kolejnych etapach obróbki badanych materiałów.

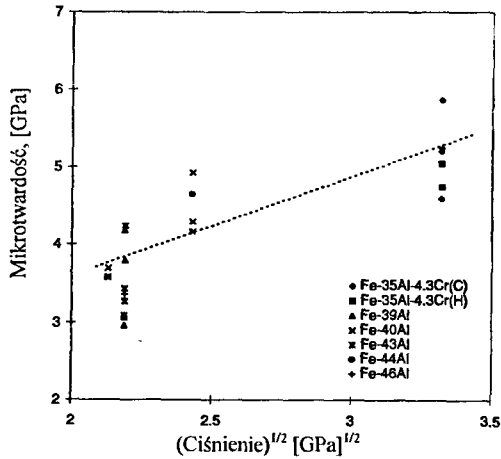
Tablica 1. Gęstość i mikrotwardość [HV] badanych próbek prasowanych proszków po kolejnych etapach obróbki [6, 16, 17, 20]

Próbka	Materiał wyjściowy		Materiał po obciążeniu wybuchowym	
	Gęstość, kg/m <sup>3</sup>	HV	Gęstość, kg/m <sup>3</sup>	HV
TiAl	2700	-	3300	568
Ti <sub>3</sub> Al	2900	-	3800	592
NiAl	-	356	-	500
Al <sub>3</sub> Ti	-	604	-	611
FeAl	-	259	-	442

## 2.2. MODYFIKACJA STRUKTURY ORAZ CHARAKTERYSTYK FIZYKOMECHANICZNYCH STOPÓW INTERMETALICZNYCH

Wybuchową obróbkę materiałów intermetalicznych można wykorzystać do modyfikowania ich struktury oraz charakterystyk wytrzymałościowych. W pracach [5, 6] przedstawiono wyniki badań materiałów intermetalicznych poddanych działaniu obciążenia wybuchowego w układach cylindrycznych. Ze względu na dużą kruchość elementów wykonanych ze stopów intermetalicznych konieczne jest zastosowanie specjalnego układu wybuchowego, w którym osłabia się działanie fal rozrzedzenia powodujących pękanie próbek poddawanych wysokim ciśnieniom (rzędu 10 GPa). Zastosowany układ wybuchowy pozwala na uzyskanie w obciążanej próbce płaskiej fali, co jest niezbędnym warunkiem powstania jednorodnej fali obciążenia w dużym przekroju próbki.

Po obciążeniu wybuchowym próbki były badane i poddawane kolejnym procesom obróbki plastycznej na gorąco. Obserwowano wzrost mikrotwardości omawianych intermetalików w stosunku do stanu lanego oraz po homogenizacji. Bezpośrednio po wybuchu nie obserwowano zasadniczych zmian struktury badanych materiałów. Po dodatkowej obróbce cieplnej nie występowała jednak rekryształizacja materiału (tak jak dzieje się z materiałami nie obciążanymi wybuchowo) lecz tworzyły się drobnoziarniste struktury pozbawione defektów. Dzięki temu, obok zwiększenia mikrotwardości obciążanych próbek, uzyskuje się ich uplastycznienie. Potwierdziły to badania mikrotwardości materiałów poddanych obciążeniu wybuchowemu. Na rys. 2 przedstawiono zacytowany z pracy [5] wykres zależności mikrotwardości od oszacowanego ciśnienia fali uderzeniowej generowanej w próbkach badanych materiałów intermetalicznych przez obciążenie detonacją materiałów wybuchowych w układzie cylindrycznym.



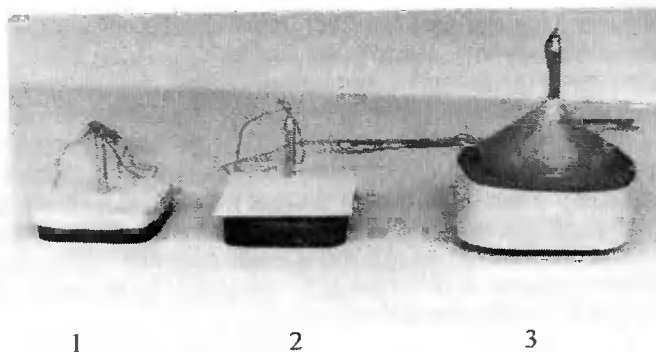
Rys. 2. Średnia mikrotwardość w zależności od pierwiastka z ciśnienia fali uderzeniowej dla wybuchowo prasowanych stopów intermetalicznych FeAl [5]

### 3. OBCIĄŻANIE WYBUCHOWE POŁĄCZONE Z AZOTOWANIEM JARZENIOWYM

Efektom procesu azotowania jarzeniowego jest wytworzenie dyfuzyjnej warstwy powierzchniowej, charakteryzującej się dobrymi właściwościami użytkowymi. Tworzenie się dyfuzyjnych warstw wierzchnich zależy od stanu energii wewnętrznej warstwy powierzchniowej obrabianego materiału. Stan energetyczny warstwy powierzchniowej zależy w dużej mierze od obróbki poprzedzającej jarzeniowe azotowanie. Jedną z możliwych obróbek powierzchni jest jej wybuchowe obciążenie. Wyniki badań wpływu odkształcenia plastycznego uzyskanego metodą wybuchową na rezultaty procesu jarzeniowego przedstawiono między innymi w pracach [11, 12, 14, 15].

Zazwyczaj modelowym materiałem poddawanym wybuchowemu obciążeniu była stal 33H3MF, w niektórych przypadkach żelazo armco. W badaniach używano kilku typów materiałów wybuchowych różniących się m. in. prędkością detonacji (2,1÷7,0 km/sek), ciśnieniem detonacji (0,9÷18,4 GPa) oraz czasem trwania impulsu ciśnienia (0,4÷38,1  $\mu$ sek). Dla różnych rodzajów stosowanych materiałów wybuchowych, grubości warstwy i krotności obciążania zmieniano kształt impulsu ciśnienia oddziałującego na umacnianą powierzchnię metalu. Stosowano różne warianty układów do wybuchowego obciążania (rys. 3).

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że odkształcenie plastyczne nie ogranicza się do warstwy wierzchniej, ale rozchodzi się pasmowo w głąb materiału. Zgniot wytworzony metodą wybuchową ma istotny wpływ na grubość tworzącej się, wskutek azotowania jarzeniowego, warstwy dyfuzyjnej azotków żelaza. Dla procesów azotowania jarzeniowego trwających 3 godziny, grubość całkowita  $g_{50}$  wzrasta o ~100  $\mu$ m, dla procesów 12 godzinnych wzrasta o ~120  $\mu$ m., w porównaniu z warstwą azotowaną uzyskaną na stali 33H3MF bez obciążania wybuchowego [14].



Rys. 3. Różne warianty układów wybuchowego obciążania: 1 - bezpośrednio silnym materiałem wybuchowym, 2 - uderzenie płytką, 3 - bezpośrednio słabym materiałem wybuchowym [12]

#### 4. STOPOWANIE OBJĘTOŚCIOWE

Stopowanie objętościowe materiałów metalicznych może być osiągnięte poprzez supergłębokie wnikanie dyspersyjnych ziaren napędzanych oddziaływaniem fali uderzeniowej, wygenerowanej wskutek detonacji ładunku materiału wybuchowego (stopowanie wybuchowe) [1]. W zakresie polepszania właściwości mechanicznych oraz użytkowych (wytrzymałość, odporność na ścieranie, odporność korozyjna i inne) metali i stopów ten rodzaj obróbki wydaje się być perspektywiczny. Jako cząstki dyspersyjne stosowane są najczęściej tlenki, borki, węgliki i azotkowęglik:  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $FeB$ ,  $ZrB$ ,  $Mo_2B$ ,  $TiC$ ,  $VC$ ,  $WC$ ,  $CoC$ ,  $TiCN$  i inne.

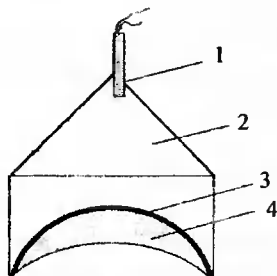
Proces wnikania szybko poruszającego się stałego ciała w metalową matrycę, z prędkością, przy której nie zachodzi jego odparowanie oraz zniszczenie makroskopowej struktury ciała i matrycy, został już wszechstronnie zbadany, np. [3]. Napędzone ciało wnika na głębokość nie większą niż kilka jego charakterystycznych rozmiarów. Przy zderzeniu następuje plastyczna deformacja obu elementów, a w przypadku kruchych materiałów pęknięcie i rozdrabnianie. Kinetyczna energia uderzającego ciała rozkłada się na nieodwracalną deformację i częściowo wydziela w postaci ciepła. Taki ogólny obraz wnikania jest charakterystyczny dla cząstek o różnej wielkości.

Inne zjawiska mogą natomiast zachodzić w przypadku uderzania strumienia cząstek o wielkości  $10\div 100\ \mu m$  napędzonych oddziaływaniem fali uderzeniowej do prędkości rzędu  $2000\ m/s$ , które penetrują matrycę na głębokość odpowiadającą setkom ich rozmiarów [10]. Po takim bardzo głębokim wnikaniu, na szlifach przekrojów widać ślady ruchu ziaren w postaci prawie zamkniętych kanalików. W przypadku cząstek metalicznych na ściankach kanalików czasami widać cienką warstwę materiału cząstki. Cząstka lub jej fragment w miejscu zatrzymania przyjmują różne formy przestrzenne. Supergłębokie wnikanie stwierdzono dla wielu par cząstka/matryca (cząstki: tlenek glinu, żelazo, wolfram, tytan, azotkowęglik tytanu, diament i inne; matryca: różne stале, miedź, aluminium i inne). Przy jednakowych warunkach formowania strumienia ziaren wnikają one głębiej w twarde, kruche stале niż w plastyczne materiały, np. miedź.

Uważa się, że proces super głębokiego wnikania składa się z dwóch faz. Pierwsze stadium obejmuje wejście cząstki na typową głębokość (rzędu jednego lub kilku rozmiarów cząstki) przy niewielkich stratach energii. Natomiast w drugim etapie, który był szczegółowo analizowany w pracy [7], następuje dalsza penetracja matrycy przez cząstkę.

Jej super głębokie wnikanie związane jest z bardzo niskim oporem jej ruchu. Występowanie anomalii w wartości ciśnienia w przypadku cząstek o wielkości  $10\div 100\ \mu\text{m}$  i prędkości ruchu  $1\div 2\ \text{km}/\text{sek}$  wynika z faktu, że przy tak dużych prędkościach deformacji nie zdążą ujawnić się plastyczne właściwości materiału cząstki. Przed poruszającą się cząstką powstają szczeliny, a cząstka wnikając w nie kontaktuje się z materiałem matrycy. Tarcie na powierzchniach kontaktu jest ograniczone wytrzymałością na ścinanie materiałów cząstki oraz matrycy i może być istotnie zmniejszone wskutek ich topnienia [2].

Eksperymenty stopowania wybuchowego przedstawiono w pracach, których współautorem był Usherenko [2, 13, 18, 19]. Cząstki napędzono, stosując wybuchowy układ przedstawiony na rys. 4. W pracy [17] matryca była wykonana ze stali St45, a napędzanymi cząstkami były ziarna tlenku glinu.



Rys. 4. Schemat wybuchowego akceleratora: 1 – zapalnik, 2 - ładunek MW, 3 - metalowa wkładka, 4 - proszek [2]

Analiza wyników penetracji matrycy wykonanej ze stali St45 mikrocząstkami tlenku glinu wykazała, że stosunek głębokości wnikania do średnicy napędzanego ziarna wynosi zawsze powyżej 40. Prawie zawsze zachodzi całkowite zamknięcie kanału wytworzonego podczas ruchu cząstki.

W kolejnej pracy [13] matryce były wykonane z żelaza armco lub molibdenu i poddawano je wstępnie kuciu i wyżarzaniu w celu przygotowania struktury wyjściowej. Ziarna  $\text{Si}_3\text{N}_4$  lub  $\text{TiB}$  w mieszaninie z  $\text{TiB}_2$  o wymiarach  $40\div 125\ \mu\text{m}$  napędzano do prędkości dochodzącej do  $2\ \text{km}/\text{sek}$ . Następnie przeprowadzono badania uzyskanych mikrostruktur. Stwierdzono, że cienka warstwa metalu na powierzchni kanałów znajduje się postaci amorficznej, która może tworzyć się pod wpływem ciepła, wydzielającego się przy tarcu w momencie ruchu cząstek, albo na skutek rozwoju odkształceń plastycznych wywołanych ekstremalnie wysokim ciśnieniem. Do cienkiej warstwy powierzchni kanału, o strukturze amorficznej przylega bezpośrednio strefa z silnie sfragmentowaną strukturą, charakteryzującą się wysoką gęstością dyslokacji. W efekcie oddziaływania cząstek napędzanych do prędkości  $2\ \text{km}/\text{sek}$  metalowa matryca umacnia się w wyniku złożonego mechanizmu. Same cząstki powodują dyspersyjne umacnianie matrycy na skutek ruchu dyslokacji i dysklinacji. Uformowanie się kanałów i związanej z nimi specyficznej struktury prowadzi do częściowej amorfizacji materiału. Amorfizacja mikroplaszczyzn w pobliżu ścianek kanału oraz stopowanie tych stref pierwiastkami pochodzącymi z cząstek przyczyniają się do umocnienia matrycy. Szerokie spektrum dyslokacji i dysklinacji struktur wzdłuż trajektorii ruchu cząstek świadczy o mechanizmie substrukturalnego umocnienia materiału.

Wyniki analogicznych badań przedstawiono w pracy [18]. Opisana w niej matryca wykonana była z molibdenu i stali 08H18N10T a napędzane cząstki były takie same, jak w poprzednio omawianej pracy [13]. Na podstawie rezultatów badań mikrostruktury

stwierdzono różnice w mechanizmie bliźniakowania testowanych materiałów matryc. Wynikały one głównie z odmiennego charakteru dyslokacji na granicy ziaren.

Natomiast w pracy [19], będącej kontynuacją publikacji [13, 18] przeprowadzono pomiary twardości i mikrotwardości w pobliżu i w oddaleniu od wtrąceń. W wyniku wybuchowego stopowania następowało utwardzanie materiałów (żelaza technicznego, stali E3 i 08H18N10T): twardość (HRB) matrycy w oddaleniu od wtrąceń wzrosła 1,1÷1,35 krotnie a mikrotwardość (HV) 1,2÷1,3 krotnie, zaś w pobliżu wnikaających cząstek była jeszcze większa. Przeprowadzono również porównawcze badania ścieralności stali kołowej 60G po wybuchowym stopowaniu oraz hartowaniu i wyżarzaniu. Wykazały one, że uzyskane odporności na ścierania są tego samego rzędu. Tak więc, metoda stopowania wybuchowego pozwala na utwardzanie powierzchni wyrobów na głębokość do 30 mm, przy znacznie mniejszych kosztach obróbki.

## 5. PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonego przeglądu niektórych nowoczesnych metod wybuchowej obróbki metali wynika, że dzięki jej zastosowaniu można otrzymywać materiały o nietypowych właściwościach oraz modyfikować stan warstwy wierzchniej metalowych tworzyw. Maksymalne wykorzystanie technik wybuchowych można uzyskać dzięki pracy interdyscyplinarnych zespołów składających się ze specjalistów z dziedziny materiałów wybuchowych i inżynierii materiałowej. Prace tych zespołów powinny być ukierunkowane obecnie głównie na badania o charakterze utylitarnym.

## LITERATURA

- [1] Anbilevko S.K., Roman O.B., Romanov I.S., Usherenko S.M.: Sverkhglubokije pronikaniye chastits poroshka v pregradu. Poroshkovaja Metalurgija. Vyp. 9. Izd. Vyssheshaja shkola, Minsk 1985.
- [2] Anbilevko S.K., Saj Je.N., Romanov G.S., Usherenko S.M.: Peremeshchenije udarnika v metalle. Fizika Gorenija Vzryva 24, 5, 1988.
- [3] Baum F.A., Orlenko M.P., Staniukovich K.P.: Fizika vzryva. Izd. Nauka, Moskva 1975.
- [4] Bystrzycki J., Paszula J., Trębiński R., Varin R.A.: The Microstructure and Interface Behaviour of Ni/NiAl Composites Produced by the Explosive Compaction of Powders. Journal of Materials Science No 29, 1994.
- [5] Bystrzycki J., Paszula J., Varin R.A.: Structure and Hardness of Explosively Loaded FeAl Intermetallic Alloys. Materials Science and Engineering A239-240, 1997.
- [6] Bystrzycki J., Paszula J., Varin R.A., Bojar Z.: Application of Explosive Loading for Modification of Microstructure and Mechanical Properties of Nickel and Iron Aluminides. Mat. Konf., Lwów 1997.
- [7] Chernyj G.G.: Mekhanizm anomal'no nizkogo soprotivlenija pri dvizhenii tel v tverdykh sredakh. Dokl. AN SSSR 292, 6, 1987.
- [8] Kaszuwara W., Leonowicz M., Januszewski D., Mendoza G., Paszula J., Davies H.A.: Consolidation of Magnetic Powders by Shock Compression. Journal of Materials Science. Electronic Materials 9, 1998.
- [9] Kaszuwara W., Leonowicz M., Wojciechowski S., Paszula J.: Wybrane metody spajania proszków magnetycznie twardych typu ziemia rzadka – metal. Inżynieria Materiałowa 3, 1997.

- [10] Kozorezov K.I., Maksimenko V.N., Usherenko S.M.: *Izbrannyje voprosy sovremennoj mekhaniki*. Izd. MGU, Moskva 1981.
- [11] Maranda A., Nowaczewski J., Rudnicki J., Wierzchoń T.: *Badania wpływu wybuchowego impulsu ciśnienia na właściwości warstwy wierzchniej wybranych stali*. Mat. Krajowej Konf. „Dobór i eksploatacja materiałów inżynierskich”, Jurata 1997.
- [12] Maranda A., Nowaczewski J., Trzcíński W.A., Wierzchoń T., Rudnicki J.: *On Some Problems of the Explosive Hardening of Steel*. Proc. of Twenty-Third Int. Pyrotechnic Seminar, Tsukuba 1997.
- [13] Pozdrin V.F., Usherenko S.M., Gubenko S.I.: *O mekhanizme uprochnenija metallov pri sverkhglubokom pronikanii vysokoskorostnykh chastic*. Fizika Gorenija Vzryva 27, 6, 1991.
- [14] Rudnicki J., Maranda A., Nowaczewski J., Wierzchoń T.: *Wpływ odkształcenia plastycznego otrzymanego metodą wybuchową na proces azotowania jarzeniowego*. Mat. III Ogólnopol. Konf. „Obróbka powierzchniowa”. Częstochowa - Kule 1996.
- [15] Rudnicki J., Maranda A., Nowaczewski J., Wierzchoń T.: *Wpływ odkształcenia plastycznego otrzymanego metodą wybuchową na wyniki procesu azotowania jarzeniowego stali 33H3MF*. Mat. Konf. Naukowo-Technicznej „Nowe Materiały - Nowe Technologie w Przemysle Okrętowym i Maszynowym”. Szczecin - Świnoujście 1998.
- [16] Szewczak E., Paszula J., Leonov W.A., Matyja H.: *Explosive Consolidation of Mechanically Alloyed Ti-Al Alloys*. Materials Science and Engineering A226-228, 1997.
- [17] Świdarska-Środa A., Paszula J., Wyrzykowski J.W., Presz A.: *Microstructure and Microhardness of Explosively Compacted Al/Al<sub>3</sub>Ti Composite*. Proceedings of Int. Conf. on the Quantitative Description of Materials Microstructure, Warszawa 1997.
- [18] Usherenko S.M., Nozdrin V.F., Gubenko S.I.: *Izmenenije struktury metallicheskoj mishenii pri vysokoskorostnom vnedrenii dispersnykh chastits*. Metall. Term. Obrab. Metallov 6, 1991.
- [19] Usherenko S.M., Gubenko S.I.: *Osobennosti struktury i svojstv stali posle „vzryvnogo” legirovanija*. Stal 10, 1996.
- [20] Varin R.A., Bystrzycki J., Zbronic L., Paszula J.: *Shock-Wave (explosive) and Hot Pressing Consolidation of Nanocrystalline Ball Milled Intermetallic Powders*. Proc. of International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials, Vancouver 1999.

## NEW TRENDS IN MATERIAL ENGINEERING ENHANCED BY THE METHODS OF EXPLOSION

### Summary

The present review presents brief characteristics of material engineering explosion methods, including pressing and high-pressure loading of intermetallic and magnetic materials, alloying and hardening combined with nitriding. The paper includes also an extensive list of references which cover the investigations conducted by the Warsaw Military Technical Academy.

Key words: high-energy metal machining, explosives, detonation, shock wave

## NOWE TECHNOLOGIE W ZAKRESIE DRAŻENIA I WYCINANIA ELEKTROEROZYJNEGO

Jan Berkan

Wydział Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej,  
Instytut Technologii Maszyn,  
ul. Narbutta 86, 02-524 Warszawa

W referacie przedstawiono dwie propozycje technologii, które można zastosować w operacjach drażenia i wycinania elektroerozyjnego. Pierwszą z nich jest elektroerozyjne drażenie z zastosowaniem elektrod pośrednich, drugą – jednoczesne wycinanie elektroerozyjne stosowane przy wytwarzaniu części tnących wykrojników.

*Słowa kluczowe:* obróbka elektroerozyjna, drażenie, elektrody pośrednie, jednoczesne wycinanie, wykrojnik

### 1. WSTĘP

W technologii obróbki elektroerozyjnej widoczny jest ogromny postęp wynikający głównie z nowych rozwiązań konstrukcyjnych obrabiarek elektroerozyjnych, włączając w to układy sterowania. Wskaźniki technologiczne tej obróbki są coraz bardziej korzystne dzięki lepszemu poznaniu zjawiska erozji elektrycznej. W związku z tym zwiększyły się znacznie możliwości technologiczne tej obróbki. Istnieje jednak szereg technologii, które zostały opracowane wcześniej i mogą być w dalszym ciągu stosowane, gdyż odznaczają się szczególnymi, korzystnymi cechami, pozwalającymi na szybsze i tańsze wykonanie obróbki określonych powierzchni. Spośród tych technologii przedstawiono dwie:

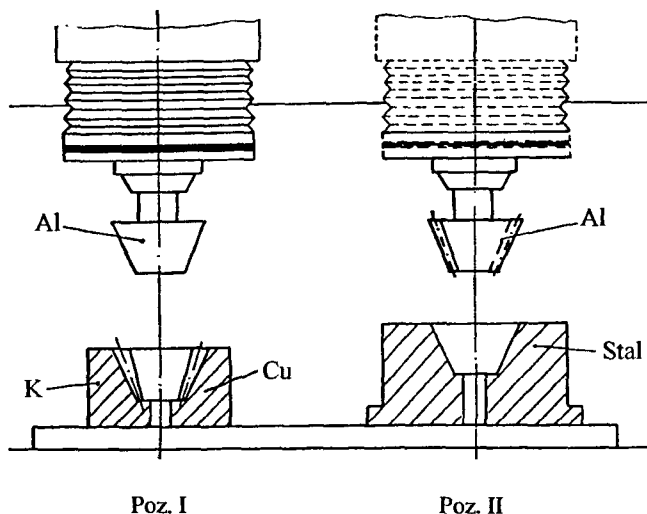
- elektroerozyjne drażenie z zastosowaniem elektrod pośrednich,
- elektroerozyjne jednoczesne wycinanie części tnących wykrojników.

### 2. ELEKTROEROZYJNE DRAŻENIE Z ZASTOSOWANIEM ELEKTROD POŚREDNICH

#### 2.1. ZASADA STOSOWANIA ELEKTROD POŚREDNICH

Technologia stosowania elektrod pośrednich została zaprezentowana na sympozjum „ISEM - 7” w Birmingham [3]. Polega ona na zastosowaniu modelu o kształcie i wymiarach wgłębienia jakie ma być obrobione oraz pośredniej elektrody roboczej. Model i obrabianą część mocuje się na stole roboczym drążarki (rys. 1).





Rys. 1. Zasada stosowania elektrod pośrednich [3]

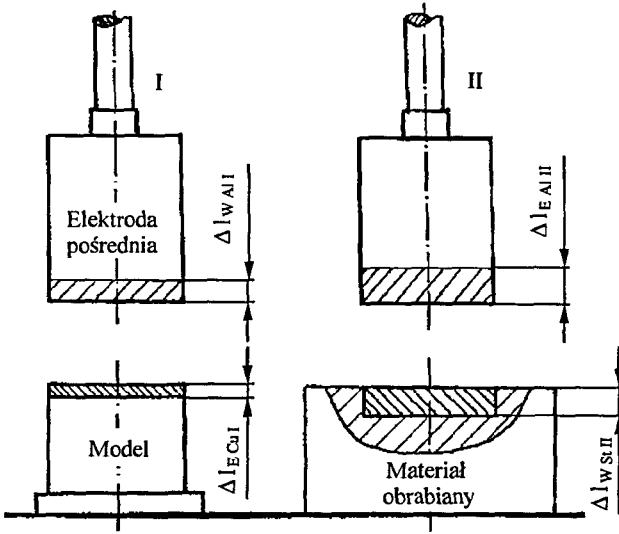
Pośrednia elektroda mocowana jest w głowicy narzędziowej. Roboczy zarys elektrody pośredniej kształtowany jest za pomocą drążenia, gdzie narzędziem jest model odwzorowujący kształt i wymiary zagłębienia. Model może być wykonany obróbką mechaniczną, galwaniczną lub za pomocą prasowania, a właściwie każdą metodą zapewniającą wymaganą dokładność. Powinien on zostać wykonany z materiału o dużej odporności elektroerozyjnej. Operacja przeprowadzana jest w kilku zabiegach. W pierwszym - pośrednia elektroda kształtowana jest zgrubnie (poz. I). Następnie elektroda pośrednia przesuwana jest nad przedmiot obrabiany (poz. II). Następuje wówczas zgrubne drążenie wgłębienia. Po zakończeniu obróbki zgrubnej zużyta elektroda pośrednia wraca do pozycji I, w której jest kształtowana (regenerowana) przy zastosowaniu parametrów wykańczających. W kolejnym zabiegu jest ona przesuwana do pozycji II i zagłębienie obrabiane jest na gotowo. W ten sposób w tej samej operacji elektroda pośrednia jest kształtowana przez odwzorowanie w niej zarysu wzorca i może być wielokrotnie regenerowana. Zaletą tej metody kształtowania elektrody pośredniej jest możliwość uzyskania roboczego zarysu elektrody niewykonalnego lub trudnego do wykonania innymi metodami.

## 2.2. TEORETYCZNE PODSTAWY STOSOWANIA POŚREDNICH ELEKTROD ROBOCZYCH

Porównania metody drążenia z wykorzystaniem pośrednich elektrod roboczych z klasycznym drążeniem dokonano przy założeniu, że model wykonano z miedzi, a elektrodę pośrednią z aluminium. Przyjęto następujące oznaczenia (rys. 2):

- $V_{E-CuI}$  - objętość modelu miedzianego zużyta podczas kształtowania elektrody aluminiowej,
- $V_{W-AlI}$  - objętość elektrody aluminiowej usunięta w czasie formowania na wzorcu miedzianym,
- $V_{W-StII}$  - objętość stali usunięta w czasie drążenia elektrodą aluminiową,
- $V_{E-Al}$  - objętościowe zużycie elektrody aluminiowej podczas obróbki stali,

- $\vartheta_{Cu-Al}$  - współczynnik objętościowego zużycia wzorca miedzianego podczas kształtowania elektrody aluminiowej,  
 $\vartheta_{Al-St}$  - współczynnik objętościowego zużycia elektrody aluminiowej w czasie drążenia stali,  
 $V_{W-St}$  - objętość stali usunięta w czasie drążenia elektrodą miedzianą,  
 $V_{E-Cu}$  - objętościowe zużycie elektrody miedzianej w czasie obróbki stali,  
 $\vartheta_{Cu-St}$  - współczynnik objętościowego zużycia elektrody miedzianej podczas drążenia stali.



Rys. 2. Wskaźniki zużycia w metodzie elektrod pośrednich

Według ogólnie znanych zależności:

$$\vartheta_{Cu-Al} = \frac{V_{E-Cu I}}{V_{W-Al I}} \cdot 100, \% \quad (1)$$

$$\vartheta_{Al-St} = \frac{V_{E-Al II}}{V_{W-St II}} \cdot 100, \% \quad (2)$$

$$\vartheta_{Cu-St} = \frac{V_{E-Cu}}{V_{W-St}} \cdot 100, \% \quad (3)$$

Przekształcając (1) i (2) otrzymamy:

$$\vartheta_{Cu-Al} = \frac{V_{E-Cu I}}{V_{W-Al I}} \cdot 100 \rightarrow V_{W-St II} = \frac{V_{E-Al II}}{\vartheta_{Cu-Al}} \cdot 100, \quad (4)$$

$$\vartheta_{Al-St} = \frac{V_{E-Al II}}{V_{W-St II}} \cdot 100 \rightarrow V_{W-Al I} = \frac{V_{E-Al II}}{\vartheta_{Cu-Al}} \cdot 100, \quad (5)$$

Zakładając, że ubytek objętościowy elektrody aluminiowej podczas kształtowania na wzorcu miedzianym jest taki sam jak podczas drażenia wgłębienia w stali czyli, że elektroda aluminiowa musi być skorygowana o wartość jej zużycia podczas drażenia stali:

$$V_{E-Al II} = V_{W-Al I} = V_{W-Al}$$

po podstawieniu (5) do (4) otrzymamy:

$$V_{W-St II} = \frac{V_{E-Cu I} \cdot 100}{g_{Cu-Al}} \cdot \frac{100}{g_{Al-St}} \quad (6)$$

Chcąc porównać metodę wykorzystującą elektrody aluminiowe pośrednie z metodą klasycznego drażenia stali elektrodą miedzianą, zakładamy takie same zużycia w obu metodach:

$$V_{E-Cu I} = V_{E-Cu} = V_{E-Cu}$$

Po przekształceniu (3):

$$g_{Cu-St} = \frac{V_{E-Cu}}{V_{W-St}} \cdot 100 \rightarrow V_{E-Cu} = \frac{g_{Cu-St} \cdot V_{W-St}}{100}$$

i podstawieniu do (6) otrzymujemy:

$$V_{W-St II} = V_{W-St} = \frac{g_{Cu-St}}{100} \cdot \frac{100}{g_{Cu-Al}} \cdot \frac{100}{g_{Al-St}}$$

a po uproszczeniu:

$$V_{W-St II} = V_{W-St} = \frac{g_{Cu-St}}{n \cdot g_{Cu-Al} \cdot g_{Al-St}} \cdot 100 \quad (7)$$

gdzie:

n - liczba korekcji.

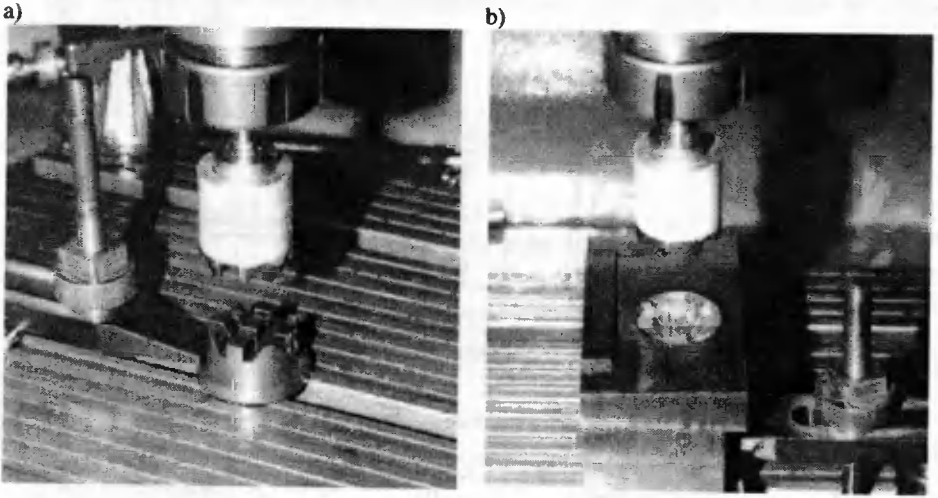
Badania przeprowadzone przez autorów opracowania [3] dały wyniki, które po podstawieniu do zależności (7) i założeniu  $n = 3$  są następujące:

$$V_{W-St II} = 15 \cdot V_{W-St} \quad (8)$$

Wynika z nich, że wykorzystując aluminiowe elektrody pośrednie objętość wyerodowanej stali jest 15-krotnie większa niż w klasycznym drażeniu przy jednakowym zużyciu modelu i elektrody miedzianej. Trwałość modelu miedzianego jest więc wielokrotnie większa od elektrody miedzianej używanej w klasyczny sposób.

### 2.3. MOŻLIWOŚCI STOSOWANIA ELEKTROD POŚREDNICH

Badania własne autora referatu [1] z zastosowaniem miedzi jako materiału wzorca i aluminium na elektrody pośrednie w zakresie drażenia wgłębienia (rys. 3) wykazały, że dla tego kształtu możliwe jest uzyskanie wartości wskaźnika obliczonego ze wzoru (8) równego 12.



Rys. 3. Drażnienie wgłębnia z zastosowaniem elektrody pośredniej: a) kształtowanie elektrody pośredniej, b) drażnienie wgłębnia [1]

Prezentowana technologia może znaleźć zastosowanie do wykonywania wielogniazdowych form dla przemysłu szklarskiego i form oponiarskich.

### 3. ELEKTROEROZYJNE JEDNOCZESNE WYCINANIE CZĘŚCI TNĄCYCH WYKROJNIKÓW

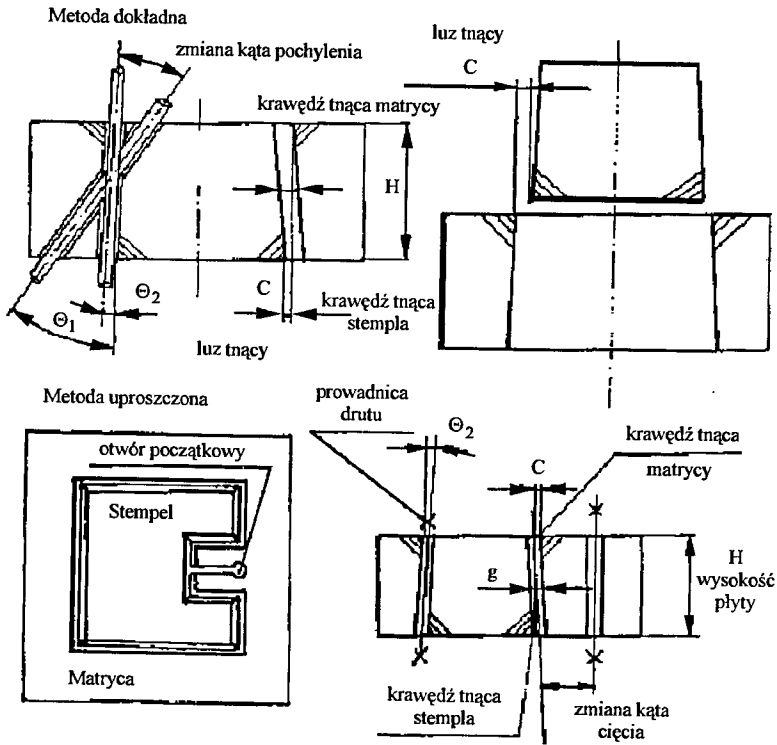
#### 3.1. ZASADA JEDNOCZESNEGO WYCINANIA

Wykonanie części tnących wykrojnika wymaga zazwyczaj oddzielnych operacji wycinania stempla i matrycy z zastosowaniem korekcji wymiarów, w celu uzyskania luzu tnącego o wymaganej wartości. Wycinanie jednoczesne polega na takim wycięciu, aby krawędzie obydwu części (wewnętrznej i zewnętrznej) wycinanego zarysu mogły być wykorzystane jako krawędzie tnące. Przy zwykłym wycinaniu luz między wyciętymi częściami równy jest grubości szczeliny cięcia. Może to być wykorzystane do wykrojników o dużym luzie tnącym (do grubych blach). W większości przypadków luz tnący ma wartość mniejszą od realnych szczelin cięcia. Metoda jednoczesnego wycinania polega na cięciu elektrodą pochyloną pod kątem, co umożliwi uzyskanie dowolnego luzu tnącego (rys. 4).

Żądany luz tnący  $C$  zależy od kąta pochylenia elektrody drutowej, wysokości cięcia  $H$  i grubości szczeliny cięcia  $g$ .

Podstawowym problemem technologicznym jest stadium początku wycinania. W metodzie dokładnej elektroda drutowa pochylona jest o kąt  $\theta_1$ , większy od przewidywanego do dalszego wycinania, aby następnie na linii dojścia do właściwego zarysu zmienić go na właściwy, równy  $\theta_2$ . Należy zauważyć, że nie następuje miejscowe podcięcie zarysów tnących. Na tym właśnie polega dokładność tej metody. W metodzie uproszczonej na początku wycinania następuje zmiana kąta pochylenia elektrody drutowej, ale

zarys tnący w płycie tnącej charakteryzuje się nieciągłością. Nie wpływa to w znaczącym stopniu na dokładność wycinanej części, ale pozostawia mały ślad na jej obwodzie.

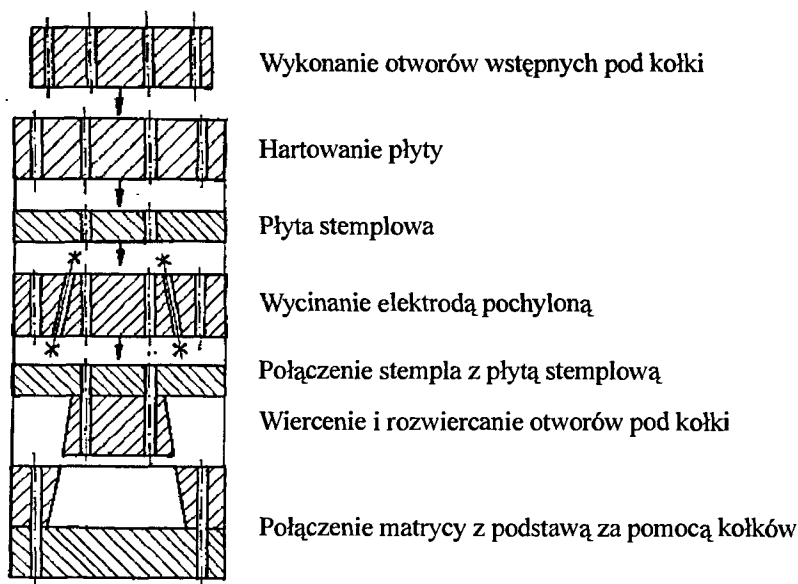


Rys. 4. Zasada metody jednoczesnego wycinania części tnących [4]

### 3.2. TECHNOLOGIA WYKROJNIKA Z ZASTOSOWANIEM JEDNOCZESNEGO WYCINANIA

Zastosowanie jednoczesnego wycinania ułatwia technologię wykrojników o prostej konstrukcji. Teoretycznie czas wycinania części tnących skraca się dwukrotnie. Zaletą jest dobre dopasowanie ich zarysu. Luz tnący ma jednakową wartość na obwodzie. Wycinanie, które ma miejsce po obróbce cieplnej eliminuje szkodliwy wpływ odkształceń hartowniczych na dokładność zarysu części tnących. Przykładową technologię prostego wykrojnika przedstawiono na rys. 4. W półfabrykacie płyty tnącej wykonuje się najpierw wstępne otwory pod kołki ustalające, a następnie poddaje się płytę obróbce cieplnej. Równolegle należy wykonać płytę stemplową ze wstępnie wykonanymi otworami pod kołki wg płyty zasadniczej.

Następną operacją jest wycinanie zarysów części tnących wg uprzednio przedstawionych zasad. Po wycięciu dokonuje się połączenia stempla z płytą stemplową i matrycy z płytą podstawy wykrojnika, ustawiając je według wyciętego zarysu tnącego.



Rys. 5. Technologia wykrojnika z zastosowaniem jednoczesnego wycinania części tnących [2]

## LITERATURA

- [1] Berkan J.: Elektroerozyjne drążenie z zastosowaniem elektrod pośrednich. Program Priorytetowy „Nowe Technologie”, Politechnika Warszawska 1999.
- [2] Berkan J.: Elektroerozyjne jednoczesne wycinanie części tnących wykrojników. Program Priorytetowy „Nowe Technologie”, Politechnika Warszawska 2000.
- [3] Manitiu C, Dimitriu N, Costachescu M.: Use of the Aluminum Electrodes at EDM of Steel, Especially for Serial Production. Proc. of ISEM – 7, Birmingham 1983.
- [4] Saito N, Iwata S, Arai S, Takawashi T, Yatomi T.: New Developed Punching Die Making Method for Thin Plate under One Time Operation, by Means of Tapered Wire EDM. Proc. of ISEM - 7, Birmingham 1983.

## NEW TECHNOLOGIES IN ELECTRO-DISCHARGE SINKING AND CUTTING

### Summary

The present paper investigates two technologies to be applied for electro-discharge sinking and cutting. The first one incorporates medial electrodes into EDM sinking, the latter - a simultaneous EDM cutting used for producing blanking tool parts.

Key words: electro-discharge machining, sinking, medial electrode, simultaneous cutting



## MODERNIZACJA PROCESU OBRÓBKI ELEKTROCHEMICZNEJ ŁOPATEK SILNIKÓW PRZEPLYWOWYCH W WSK – RZESZÓW

Maria Chuchro<sup>1</sup>, Adam Ruszaj<sup>1</sup>, Maria Zybura-Skrabalak<sup>1</sup>,  
Jan Czekaj<sup>1</sup>, Mikołaj Krehlik<sup>1</sup>,  
Szczepan Białek<sup>2</sup>, Władysław Kniewski<sup>2</sup>, Antoni Malec<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instytut Obróbki Skrawaniem,  
Pracownia Obróbki Elektrochemicznej,  
ul. Wrocławska 37a, 30-011 Kraków

<sup>2</sup>Wytwórnia Sprzętu Komunikacyjnego PZL „Rzeszów” S.A.,  
ul. Hetmańska 120 35-078 Rzeszów

Przeprowadzono analizę źródeł niedokładności procesu obróbki elektrochemicznej oraz badania w celu identyfikacji źródeł niedokładności obrabiarek do obróbki łopatek silników przepływowych w WSK Rzeszów. Badania wykazały, że istotną przyczyną niedokładności obróbki jest niewystarczająca stabilizacja podstawowych właściwości fizykochemicznych elektrolitu oraz jego ciśnienia i temperatury. Wykorzystując wyniki badań przeprowadzono modernizację układu obiegu elektrolitu do obróbki łopatek stalowych oraz układu obiegu elektrolitu do obróbki łopatek tytanowych.

*Słowa kluczowe:* obróbka elektrochemiczna, obróbka łopatek silników przepływowych

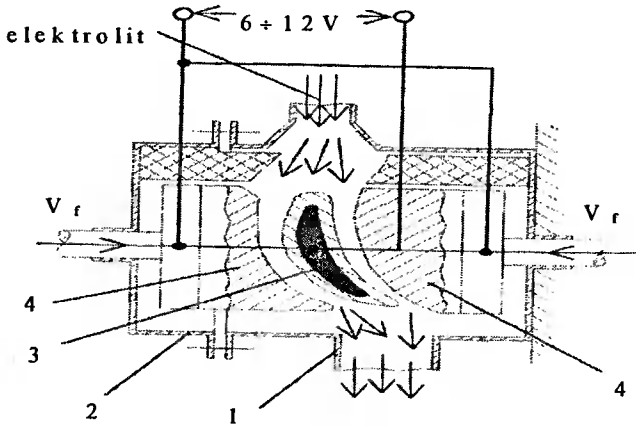
### 1. WSTĘP

Ciągły rozwój techniki powoduje, że w przemyśle stosowane są materiały o coraz lepszych właściwościach mechanicznych. Większość tych materiałów jest trudno obrabialna metodami konwencjonalnymi. Dlatego do ich racjonalnego kształtowania z powodzeniem stosowane są metody erozyjne, a wśród nich obróbka elektrochemiczna (ECM). Cechą charakterystyczną tej odmiany obróbki jest brak kontaktu mechanicznego pomiędzy przedmiotem obrabianym a elektrodą roboczą - narzędziem (rys. 1). W trakcie procesu elektroda robocza - katoda przesuwa się z założoną prędkością w kierunku przedmiotu obrabianego - anody. Do szczeliny pomiędzy elektrodą roboczą i przedmiotem obrabianym podawany jest pod ciśnieniem elektrolit - najczęściej wodny roztwór soli (np. NaCl, NaNO<sub>3</sub>). W wyniku obróbki następuje odwzorowanie kształtu elektrody roboczej w materiale obrabianym.

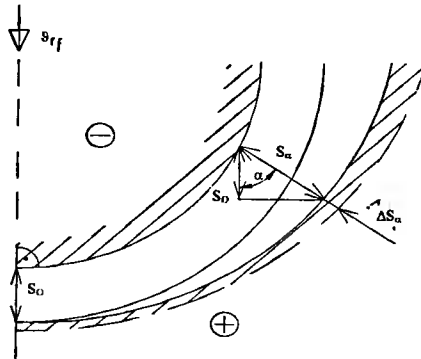
W procesie obróbki elektrochemicznej pomiędzy elektrodą roboczą (katodą) a przedmiotem obrabianym (anodą) występuje szczelina wypełniona elektrolitem. Aby uzyskać odpowiednie wymiary powierzchni obrabianej wymiary elektrody zaprojektowanej jako negatyw przedmiotu obrabianego należy zmniejszyć lub zwiększyć (zawsze



w głąb materiału) o grubość tej szczeliny. Zabieg ten nazywany jest korekcją elektrody roboczej (rys. 2).



Rys. 1. Schemat drążenia łopatek turbin silników przepływowych; 1 - korpus kasety, 2 - pokrywa kasety, 3 - łopatka, 4 - elektrody robocze



Rys. 2. Geometria przestrzeni międzyelektrodowej w stanie ustalonym; „-” - katoda, „+” - anoda,  $v_f$  - prędkość posuwu elektrody,  $\alpha$  - kąt zarysu,  $\Delta s_\alpha$  - zmiana grubości szczeliny wynikająca z fluktuacji parametrów procesu,  $s_0$  - grubość szczeliny czołowej

Grubość szczeliny dla przypadku drążenia powierzchni kształtowych w stanie ustalonym można obliczyć z zależności:

$$S = \frac{\eta k_v \kappa (U - E)}{v_f \cos \alpha} \quad (1)$$

Zgodnie z równaniem (1) grubość szczeliny międzyelektrodowej zależy od prędkości przesuwu elektrody  $v_f$ , napięcia roboczego  $U$ , rozkładu w obszarze obróbki lokalnych wartości obrabialności elektrochemicznej  $k_v$ , przewodności właściwej elektrolitu  $\kappa$ , spadku potencjału w warstwach przyelektrodowych  $E$ , oraz kąta zarysu powierzchni obrabianej  $\alpha$ . Ze względu na to że przepływ elektrolitu w szczelinie jest wielofazowy,

niestacjonarny, turbulentny i trójwymiarowy teoretyczne obliczenia przewodności elektrolitu  $\kappa$  oraz współczynnika obrabialności  $k_v$  i grubości szczeliny obarczone są stosunkowo dużym błędem. Tym samym w oparciu o model matematyczny procesu można tylko wstępnie skorygować kształt i wymiary elektrody roboczej oraz dobrać parametry obróbki. Ostateczną korekcję elektrody oraz dobór parametrów procesu należy przeprowadzić w oparciu o charakterystyki doświadczalne.

## 2. ŹRÓDŁA NIEDOKŁADNOŚCI OBRÓBK

Dokładność obróbki elektrochemicznej zależy od zmian grubości szczeliny międzyelektrodowej wynikającej ze zmian warunków procesu roztwarzania [1, 3, 4]. Zmiany grubości szczeliny można oszacować, wprowadzając pojęcie podatności szczeliny na zmianę warunków roztwarzania dla różnych wartości wielkości wejściowej procesu  $x$  [2]:

$$K_x = \frac{\delta S}{\delta x} \quad (2)$$

gdzie:

$K_x$  - podatność szczeliny na zmianę wielkości wejściowej „ $x$ ”.

W przypadku obróbki łopatek obydwie powierzchnie kształtowane są jednocześnie. Zatem podwajany jest wpływ zmiany jakiegokolwiek wielkości wejściowej procesu, np. na grubość łopatki.

Uwzględniając powyższą uwagę na podstawie zależności (2) można zapisać:

a) dla napięcia międzyelektrodowego:

$$K_U = 2 \frac{\eta k_v \kappa}{v_f \cos \alpha} \quad (3)$$

b) dla prędkości przesuwu:

$$K_{v_f} = \frac{-2\eta k_v \kappa (U - E)}{v_f^2 \cos \alpha} \quad (4)$$

c) dla przewodności właściwej elektrolitu:

$$K_\kappa = \frac{2\eta k_v (U - E)}{v_f \cos \alpha} \quad (5)$$

d) dla obrabialności materiału:

$$K_{\eta k_v} = \frac{2\kappa (U - E)}{v_f \cos \alpha} \quad (6)$$

W najmniej korzystnym przypadku sumaryczna zmiana lokalnej grubości szczeliny a tym samym i dokładność obróbki przy zmianie parametrów i wskaźników procesu „ $X$ ” o wartość  $\Delta X$  będzie wynosić:

$$\Delta S = K_U \Delta U + K_{v_f} \Delta v_f + K_\kappa \Delta \kappa + K_{\eta k_v} \Delta \eta k_v \quad (7)$$

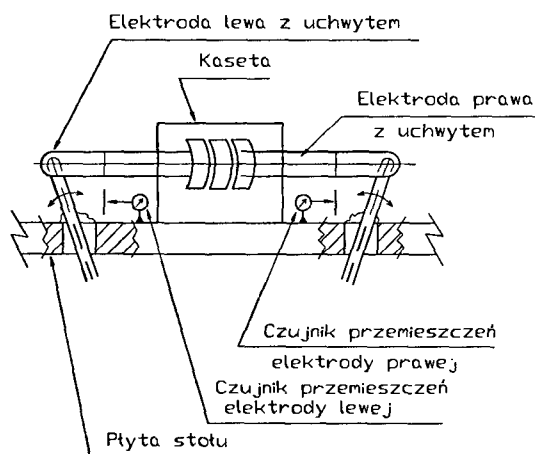
Zapewnienie zadowalającej dokładności obróbki łopatek turbin jest zagadnieniem trudniejszym niż w przypadku drażenia matryc. Wynika to z faktu, że zasadniczy wymiar łopatki (jej grubość) powstaje w wyniku dwustronnego drażenia. Tym samym podwaja się wpływ każdego zakłócenia na dokładność wymiarową. Jednym ze sposobów zwiększenia dokładności jest obróbka z małymi grubościami szczeliny między-elektrodowej. Podstawowym ograniczeniem jest tutaj natężenie prądu, które wynika z wymiarów obrabianych łopatek i nie może być dowolnie zwiększane. W warunkach produkcyjnych WSK Rzeszów pozostaje więc drugi sposób, czyli stabilizacja wszystkich wielkości wejściowych wpływających na warunki roztwarzania: napięcia między-elektrodowego, prędkości przesuwu elektrod, właściwości fizycznych elektrolitu (przewodność, pH, temperatura, skład chemiczny), ciśnienia i wydatku elektrolitu oraz jednorodności składu chemicznego i struktury metalograficznej materiału obrabianego.

### 3. IDENTYFIKACJA ŹRÓDEŁ NIEDOKŁADNOŚCI OBRABIAREK WSK – RZESZÓW DO OBRÓBKI ŁOPATEK SILNIKÓW PRZEPLÝWOWYCH

#### 3.1. BADANIA CZĘŚCI MECHANICZNEJ OBRABIARKI

W celu identyfikacji źródeł niedokładności obrabiarek WSK – Rzeszów do obróbki łopatek silników przepływowych przeprowadzono stosowne badania. Analizę błędów drażenia łopatek dokonano na podstawie badań zespołów dotychczas stosowanej do drażenia obrabiarki kasetowej ECL 20, przede wszystkim badania jej części mechanicznej oraz układu obiegu elektrolitu [5].

Badania części mechanicznej przeprowadzono przy pomocy specjalnego systemu DIAGNO opracowanego w IOS. Schemat układu pomiarowego do badań obrabiarki do elektrochemicznej obróbki łopatek przedstawiono na rys. 3.



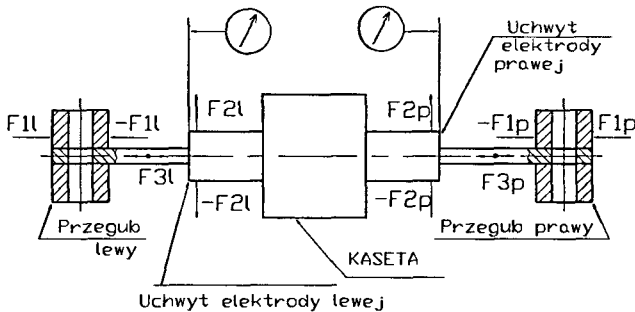
Rys. 3. Schemat układu pomiarowego do badań stanowiska elektrochemicznej obróbki łopatek

Podczas pomiarów określano:

- powtarzalność współrzędnej, przy której następuje włączenie posuwu roboczego, oraz współrzędnej zatrzymania elektrody (rys. 3). Przy tych pomiarach na stanowisku był podawany elektrolit pod ciśnieniem roboczym,
- przemieszczenia elektrod pod wpływem siły przykładanej w różnych punktach zespołu napędowego. Podczas tych pomiarów zespół napędowy był wyłączony a dopływ elektrolitu odcięty. Na podstawie wyników pomiarów określono luzy występujące w poszczególnych parach kinematycznych. Pomiaru zrealizowano na stanowisku, którego schemat przedstawiono na rys.4. Siłę o wartości 100 N przykładano w punktach wskazanych na rys. 4.

Przeprowadzono również badania obrabiarki podczas drażenia łopatek. W tym przypadku wykonano pomiary:

- współrzędnej, przy której następuje włączenie posuwu roboczego,
- współrzędnej, przy której następuje wyłączenie posuwu roboczego,
- prędkości posuwu roboczego.



Rys. 4. Schemat stanowiska do pomiaru przemieszczeń elektrod pod wpływem sił przykładanych w różnych punktach zespołu napędowego

Pomiary współrzędnych początku i końca obróbki umożliwiły ocenę powtarzalności przemieszczeń w warunkach drażenia. Pomiary prędkości posuwu roboczego elektrod wykonano w celu określenia wpływu wyłączenia lub załączenia innych obrabiarek (szczególnie odcięcia dopływu elektrolitu, które powoduje „uderzenie” ciśnienia w sieci) na stabilność posuwu elektrod.

### 3.2. BADANIA UKŁADU OBIEGU ELEKTROLITU

Układ obiegu elektrolitu jest tym zespołem, który decyduje o utrzymaniu na założonym poziomie właściwości fizykochemicznych elektrolitu. Dlatego przeprowadzono pomiary podstawowych parametrów (ciśnienie, temperatura, właściwa przewodność elektryczna) elektrolitu stosowanego w WSK Rzeszów.

Na oddziale elektrochemicznej obróbki łopatek w WSK Rzeszów pracują dwa układy obiegu elektrolitu:

- do obróbki łopatek stalowych, w którym wykorzystany jest wodny roztwór azotanu sodu ( $\text{NaNO}_3$ ).
- do obróbki łopatek tytanowych, w którym wykorzystany jest wodny roztwór chlorku sodu ( $\text{NaCl}$ ).

Informacje dotyczące pracy tych układów zbierano w czasie jednej zmiany. Pomiary (ciśnienie, temperatura, właściwa przewodność elektryczna, pH elektrolitu) wykonywano co godzinę. Przykładowe wyniki pomiarów zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Wyniki pomiarów temperatury elektrolitu 14 % wodnego roztworu NaCl o gęstości  $1,10 \text{ g/cm}^3$  i  $\text{pH} = 6$  przy elektrochemicznej obróbce łopatek tytanowych

Dzień	Zbiornik I (pracuje I obrabiarka)				Zbiornik II (pracuje I obrabiarka)			
	Temp. elektrolitu		Temp. na hali		Temp. elektrolitu		Temp. na hali	
	Te	$\Delta\text{Te}$	Tp	$\Delta\text{Tp}$	Te	$\Delta\text{Te}$	Tp	$\Delta\text{Tp}$
1	26,7÷33,8	7,1	23÷26,5	3,5	31,6÷32,6	1,0	24,5÷26,5	2
2	27,4÷31,7	4,3	23÷25,5	2,5	32÷32,3	0,3	23÷25,5	2,5
3	31,8÷34,2	2,4	24÷25,5	1,5	32÷32,4	0,4	24÷25,5	1,5
4	32,4÷34,4	2,0	22	0	29,7÷32,2	2,5	22	0
5	30,6÷31,8	1,2	18,5÷20	1,5	31,6÷32,3	0,7	18,5÷20	1,5

Te - temperatura elektrolitu, °C

$\Delta\text{Te}$  - różnica pomiędzy najwyższą i najniższą temperaturą elektrolitu w ciągu dnia, °C

Tp - temperatura powietrza na w hali produkcyjnej, °C

$\Delta\text{Tp}$  - różnica pomiędzy najwyższą i najniższą temperaturą powietrza w hali produkcyjnej w ciągu dnia, °C

Pomiary zmian temperatury elektrolitu NaCl przy obróbce łopatek tytanowych dla zbiornika I i II pokazują, iż maksymalna zmiana temperatury w obu zbiornikach jest zróżnicowana od 7,1 °C w zbiorniku I do 2,5 °C w zbiorniku II. Różnice te prawdopodobnie wynikają z faktu, iż w zbiorniku I był stary - zanieczyszczony elektrolit, zaś w zbiorniku II świeży - czysty.

Przeprowadzone badania wykazały, że istotną przyczyną niedokładności obróbki jest niewystarczająca stabilizacja podstawowych właściwości fizykochemicznych elektrolitu oraz jego ciśnienia i temperatury.

Wykorzystując wyniki tych pomiarów przeprowadzono modernizację układu obiegu elektrolitu do obróbki łopatek tytanowych. Obejmowała ona:

- zwiększenie objętości elektrolitu w istniejących zbiornikach do ok.  $6,5 \text{ m}^3$  poprzez dostawienie dodatkowego zbiornika,
- zainstalowanie w zbiornikach zespołu kontroli i stabilizacji temperatury elektrolitu, z którego sygnały podawane są do układu sterowania dopływem wody chłodzącej,
- utrzymanie minimalnego (do 30 %) stężenia zanieczyszczeń elektrolitu poprzez wprowadzenie odstojnika elektrolitu i częstą (raz na dobę lub po osiągnięciu granicznego stężenia) wymianę i sedymentację zużytego elektrolitu.

Analogiczne pomiary przeprowadzono dla układu obiegu elektrolitu stosowanego, przy obróbce łopatek stalowych.

Modernizacja układu obiegu elektrolitu do obróbki łopatek stalowych obejmowała zainstalowanie wymienników ciepła, które zapewniają stabilizację temperatury elektrolitu w zbiorniku w zakresie  $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  oraz wyposażenie układu na wejściu elektrolitu do

każdej obrabiarki elektrochemicznej w: miernik wydatku elektrolitu, czujnik temperatury (zakres  $5 \div 100$  °C) i filtry siatkowe z oczkiem o boku ok. 0,1 mm. Ponadto układ został wyposażony w przenośne urządzenia do pomiaru stężenia jonów wodorowych pH oraz właściwej przewodności elektrycznej.

Wykorzystując wyniki badań części mechanicznej (kasety) opracowano i wykonano nowe obrabiarki. Jedna z nich została wykonana jako obrabiarka kasetowa, druga jako komorowa. Zostały one podłączone do zmodernizowanego układu obiegu elektrolitu [6].

#### 4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania części obrabiarkowej oraz układów obiegu elektrolitu dotychczas stosowanych w WSK Rzeszów obrabiarek do obróbki łopatek maszyn wirnikowych były podstawą unowocześnienia istniejących układów obiegu elektrolitu oraz do zaprojektowania i wykonania nowych obrabiarek. Punktem wyjścia do zmodernizowania układów obiegu elektrolitu były: identyfikacja źródeł niedokładności obróbki ECM łopatek, analiza bilansu cieplnego układów obiegu elektrolitu, analiza właściwości fizykochemicznych stosowanych elektrolitów.

W układzie obiegu elektrolitu do obróbki łopatek tytanowych w celu lepszej stabilizacji właściwości elektrolitu zwiększono objętość zbiornika do ok.  $6,5 \text{ m}^3$ , co zapobiega dużym wahaniom temperatury elektrolitu. W celu zapewnienia minimalnego stałego stężenia zanieczyszczeń elektrolitu układ został wyposażony w odstojniki elektrolitu. Jest to podwójny zbiornik o pojemności ok.  $40 \text{ m}^3$ . Jeden ze zbiorników stosowany jest jako odstojnik, a drugi - magazyn czystego elektrolitu, który rozprowadzany jest do zbiorników roboczych. Zagęszczony zanieczyszczeniami elektrolit z odstojnika kierowany jest do oczyszczania przy pomocy prasy filtracyjnej.

Układ obiegu elektrolitu do obróbki łopatek stalowych wyposażono w wymienniki ciepła, które zapewniają stabilizację temperatury elektrolitu w zbiorniku  $\pm 2$  °C oraz miernik wydatku elektrolitu w zakresie  $20 \div 200$  l/min, czujnik temperatury (zakres  $5 \div 100$  °C), filtry siatkowe.

Dzięki temu istotnie zwiększono dokładność obróbki łopatek oraz zmniejszono liczbę braków.

#### LITERATURA

- [1] Chuchro M., Ruszaj A., Zybura-Skrabalak M.: Badania procesów kształtowania materiałów obróbką elektrochemiczną i elektrochemiczno-ścierną. PIOS, seria Referaty, Nr 62, 1999, (Posiedzenie Sekcji KBM PAN – Kraków 24-25.03.1999).
- [2] Dąbrowski L., Kozak J., Perończyk J.: Dokładność i mikrogeometria powierzchni obrobionych elektrochemicznie (ECM). Mat. IV Międzynarodowej Konf. „Postęp w teorii i technice obróbki materiałów”, Ref. IV/5, Kraków 1973.
- [3] Ruszaj A.: Badania w celu podniesienia dokładności kształtowania elementów na obrabiarkach elektrochemicznych. Mat. Konf. „Maszyny i urządzenia technologiczne - podstawy projektowania, budowy i eksploatacji”, Miedzeszyn 1993.

- [4] Ruszaj A.: Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi. Wyd. IOS, Kraków 1999.
- [5] Ruszaj A. i in.: Opracowanie technologii elektrochemicznej drażenia precyzyjnych elementów, w tym elementów silników lotniczych. Sprawozdanie z Projektu Celowego KBN, Nr 7 T07D 018 96 C/2881, Kraków 1998.
- [6] Ruszaj A. i in.: Urządzenia do precyzyjnego elektrochemicznego drażenia łopatek silników lotniczych. Mat. VI Konferencji EM'2000 (Electromachining), Bydgoszcz-Wenecja 2000.

## MODERNIZATION OF ELECTROCHEMICAL MACHINING OF TURBINE BLADES IN WSK RZESZÓW

### Summary

The present research identified the inaccuracy sources of electrochemical machining and machine tools applied for WSK Rzeszów turbine blades as insufficient stability of physical and chemical properties and pressure and temperature of the electrolyte. Drawing on the results obtained, electrolyte system was modernised both for steel and for titanium turbine blades.

Key words: electrochemical machining, turbine blade machining

### PODZIĘKOWANIE

Autorzy dziękują Komitetowi Badań Naukowych za dofinansowanie projektu celowego nr 7T07D 018 96 C/2881, Dyrekcjom WSK Rzeszów i IOS Kraków za pomoc i stworzenie dobrych warunków do realizacji projektu, oraz pozostałym kolegom, którzy uczestniczyli w jego realizacji.

## HYBRYDOWA OBRÓBKA PRZETŁOCZNO-ŚCIERNA

Lucjan Dąbrowski, Mieczysław Marciniak

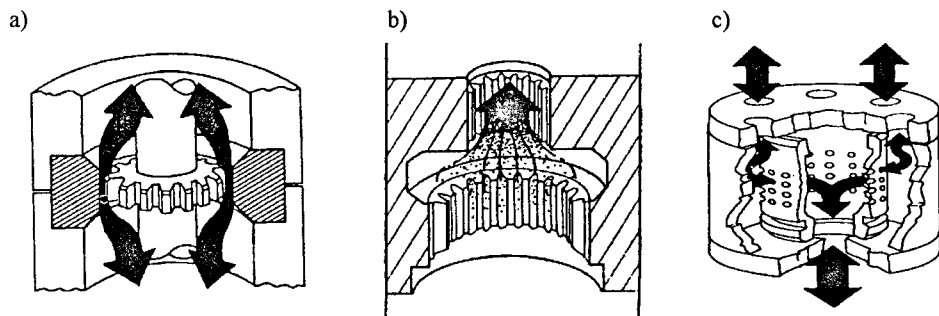
Wydział Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej,  
Zakład Obróbek Wykańczających i Erozyjnych,  
al. Niepodległości 222, 00-663 Warszawa

W referacie opisano wstępne rezultaty badań niekonwencjonalnej obróbki przetłoczno-ścierniej (AFM) wspomaganą roztwarzaniem elektrochemicznym (ECM). Obróbkę przetłoczno-ścierną realizuje się przez przetłaczanie pasty ścierniej względem trudnodostępnych powierzchni bądź krawędzi obrabianych. Zastosowanie tej obróbki wspomaganą elektrochemicznie (ECAFM) intensyfikuje proces obróbki przez wspomaganie mikroskrwania roztwarzaniem elektrochemicznym. Przedstawiono wyniki badań wskazujące na większą sprawność tego procesu przy wygładzaniu powierzchni i zaokrąglaniu krawędzi.

*Słowa kluczowe:* obróbka przetłoczno-ścierna, obróbka elektrochemiczna, wygładzanie powierzchni, zaokrąglanie krawędzi

### 1. WSTĘP

Obróbka przetłoczno-ścierna (AFM – Abrasive - Flow Machining) jest unikalnym sposobem wykańczania powierzchni, który jest stosowany w technologii mechanicznej już od roku 1968 [4]. Zasadę AFM w jej dotychczasowym rozwiązaniu konstrukcyjno-technologicznym objaśnia rys. 1.



Rys. 1. Schematy obróbki przetłoczno-ścierniej w zastosowaniu do: a) koła zębatego, b) uzębienia wewnętrznego, c) tulei z otworami

Przeznaczone do obróbki powierzchnie koła zębatego (rys. 1a) i uzębienia wewnętrznego (rys. 1b) są omywane przez przetłaczaną pastę ścierną, produkowaną na bazie lepkoplastycznego spoiwa polimerowego. Podczas cyklu obróbkowego (części



z rys. 1c) pasta jest wielokrotnie przetłaczana dwukierunkowo przez otwory w celu usunięcia zadziorów, zaokrąglenia krawędzi i wygładzenia ich powierzchni. Układy obróbkowe - po odpowiednich modyfikacjach - znajdują zastosowanie w przemyśle maszynowym, lotniczym i kosmicznym. Współczesny szeroki zakres zastosowania AFM wynika z możliwości spełniania wysokich wymagań jakościowych stawianych odpowiedzialnym częściom maszyn, np.:

- polepszenie właściwości opływowych powierzchni elementów sprężarek, turbin, kolektorów wydechowych, dysz i dyfuzorów po wstępnej obróbce frezowaniem, EDM, ECM lub odlewanych precyzyjnie,
- usuwanie zadziorów, zaokrąglenie i polerowanie krawędzi otworów dla poprawienia wytrzymałości zmęczeniowej łopatek, dysków, piast i wałów,
- sterowane usuwanie termicznych uszkodzeń warstwy po obróbce laserowej lub EDM,
- obróbka gładkościowa dysz rozpylaczy, korpusów wtryskiwaczy i części łożysk,
- usuwanie nagaru z części remontowanych, oczyszczanie powierzchni i poprawa ich refleksyjności.

Odlewy otrzymane metodą traconego wosku uzyskują po AFM powierzchnię o jednolitym stopniu wypolerowania, nawet w niedostępnych obszarach. Chropowatość powierzchni odlewanych łopatek jest zmniejszana metodą AFM z  $R_a = 1,75 \mu\text{m}$  do  $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ . Setki otworów w komorach spalania, których tolerancje nie przekraczają  $0,01 \text{ mm}$  są wypolerowane AFM w granicach tolerancji.

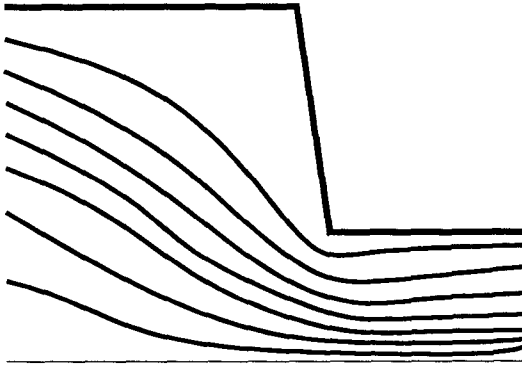
Skutki efektywnego polerowania są widoczne przy obróbce wykańczającej powierzchni po EDM, na których wyjściowa chropowatość  $R_a = 2 \mu\text{m}$  zmniejsza się do  $R_a = 0,2 \mu\text{m}$  przy grubości usuniętej warstwy wynoszącej  $25 \mu\text{m}$ .

Podobne rezultaty uzyskuje się przy wygładzaniu węglkowych form składanych i stempli wykrojników, których tolerancje wymiarowe są poniżej  $0,013 \text{ mm}$ . Obróbka pastą diamentową kwadratowych form węglkowych do prasowania płytek na ostrza skrawające zmniejsza chropowatość powierzchni z  $R_a = 1 \mu\text{m}$  do  $R_a = 0,1 \mu\text{m}$ . Nawet na powierzchniach odlewanych łopatek pomp o średnicach od  $250$  do  $610 \text{ mm}$  stosowanych w budownictwie, obróbka AFM zmniejsza chropowatość z  $R_a = 3 \mu\text{m}$  do  $R_a = 0,3 \mu\text{m}$ .

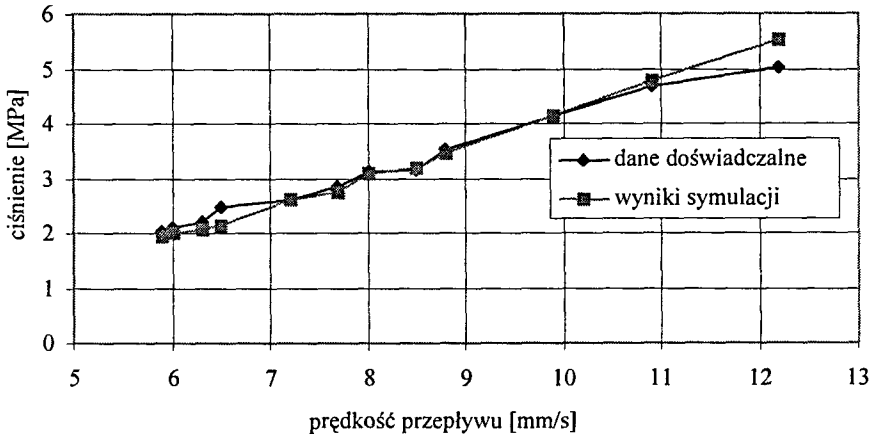
Powyższe przykłady świadczą o wysokiej efektywności jakościowej procesu AFM. Jednakże współczesne procesy technologiczne muszą również spełniać kryteria ekonomiczności, do których należy czasochłonność wytwarzania. Jednym ze środków umożliwiających skrócenie czasu operacji realizowanych AFM jest wspomaganie obróbki ścierniej procesem roztwarzania elektrochemicznego.

## 2. HYBRYDOWA OBRÓBKA PRZETŁOCZNO-ŚCIERNA (ECAFM)

Parametrami, które mają znaczny wpływ na rezultaty konwencjonalnej AFM są: ciśnienie w komorze roboczej (rys. 1), prędkość przepływu pasty ścierniej względem powierzchni obrabianej i jej temperatura. Z potwierdzonych doświadczalnie [3] badań symulacyjnych opływu krawędzi przez ciecz nieniutonowską (rys. 2) wynika, że istnieje liniowa zależność ciśnienia w komorze roboczej i prędkości przepływu pasty ścierniej (rys. 3).

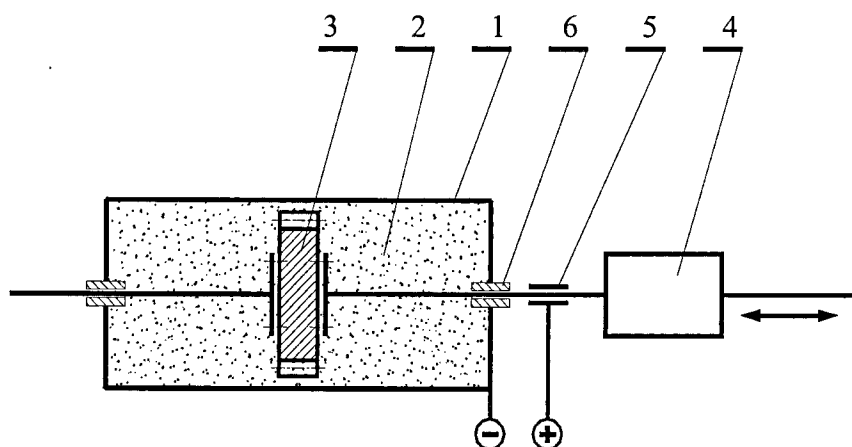


Rys. 2. Symulacja komputerowa linii przepływu medium w czasie obróbki przetłocznej (ciśnienie robocze: 2.9 MPa, średnica wyglądzanego otworu: 29 mm) [3]



Rys. 3. Zależność teoretyczna i eksperymentalna szybkości przepływu medium od zastosowanego ciśnienia roboczego (średnica otworu obrabianego: 29 mm) [3]

Dane z rys. 3 wskazują, że przy wzroście ciśnienia o 100 %, prędkość przepływu wzrasta o 60 %. Większa prędkość przepływu medium ściernego intensyfikuje AFM w ograniczonym zakresie, gdyż ciśnienie, wywołujące ten wzrost prędkości, powoduje wzrost temperatury i zmianę konsystencji pasty ścierniej. Ponadto podwyższone ciśnienie w komorze roboczej skutkuje przyspieszonym jej zużyciem, a także zwiększeniem energochłonności procesu. Powyższe mankamenty AFM eliminowane są przez wspomaganie procesu ściernego roztwarzaniem anodowym. Obróbka hybrydowa AFM + ECM = ECAFM (rys. 4) umożliwi osiągnięcie założonych celów technicznych przy niskich ciśnieniach medium ściernego w komorze roboczej [2].

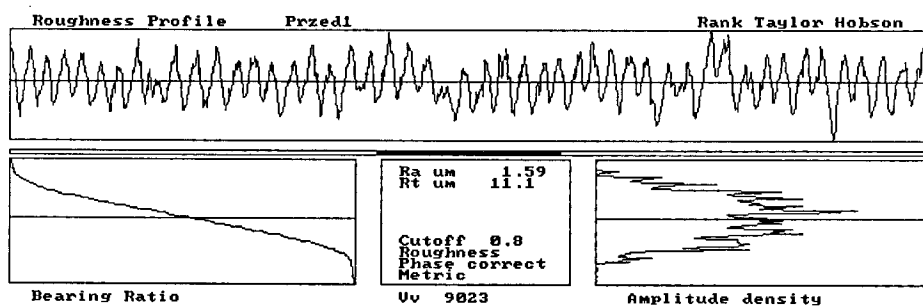


Rys. 4. Zasada obróbki przetłocznej ze wspomaganie elektrochemicznym: 1 - cylinder z doprowadzonym ujemnym biegunem źródła prądu stałego, 2 - medium ściernie, 3 - część obrabiana, 4 - układ napędowy, 5 - doprowadzenie dodatniego bieguna, 6 - prowadnice izolacyjne

Wykorzystany jest tu efekt progresywnego usuwania nadmiaru wskutek wzajemnie korzystnego oddziaływania mikroskrawania na depasywację powierzchni obrabianej oraz roztwarzania anodowego na mechaniczną dekohezję materiału [1].

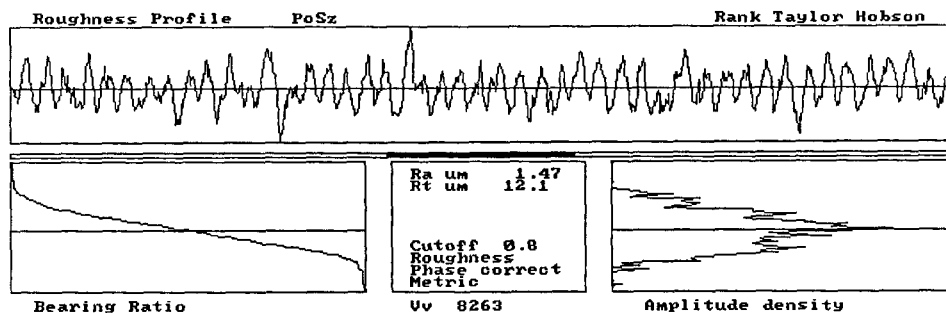
### 3. BADANIA

Badaniom poddano próbki cylindryczne ze stali NW1 obrobione wstępnie toczeniem wykańczającym, uzyskując ostre krawędzie czół i chropowatość powierzchni cylindrycznej  $Ra \approx 1.6 \mu\text{m}$  (rys. 5).

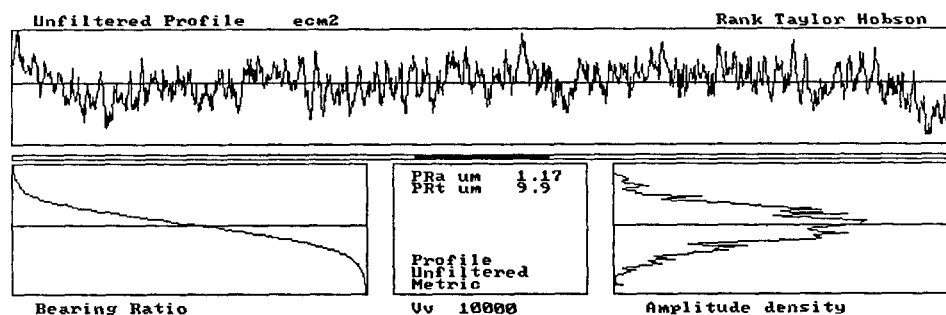


Rys. 5. Typowy profilogram powierzchni cylindrycznej próbki przed obróbką AFM lub ECAFM

W celu porównania skutków obróbki AFM i ECAFM przygotowano płynne medium ściernie na bazie roztworu NaCl zawierającego ziarno ściernie  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nr 600. Podczas obróbki AFM przemieszczano próbkę w cylindrze (rys. 4) w czasie 30 min z częstotliwością  $f = 1,3 \text{ Hz}$ . Uzyskano nieznaczne wygładzenie powierzchni do  $Ra < 1,5 \mu\text{m}$  (rys. 6) i zaokrąglenie krawędzi do  $r_a > 0,1 \text{ mm}$ .



Rys. 6. Typowy profilogram powierzchni cylindrycznej próbki po obróbce AFM



Rys. 7. Typowy profilogram powierzchni cylindrycznej próbki po obróbce ECAFM

Podczas badań skutków ECAFM zastosowano zasilanie układu (rys. 4) prądem stałym o napięciu  $U = 18 \text{ V}$  i gęstości prądu  $j < 5 \text{ A/cm}^2$ . Częstotliwość ruchów próbką stosowano jak poprzednio. Czas obróbki skrócono w tym przypadku do 5 min, uzyskując wygładzenie powierzchni do  $R_a < 1,2 \text{ }\mu\text{m}$  (rys. 7) oraz zaokrąglenie krawędzi  $r_a > 0,15 \text{ mm}$ .

Mimo stosunkowo korzystnego rezultatu wygładzania powierzchni podczas obróbki ECAFM nie uzyskano zadawalającego wyglądu powierzchni, tj. charakterystycznego dla AFM połysku. Jest to skutek zbyt małej objętości komory roboczej stanowiska badawczego, a tym samym za małej objętości medium ściernego, które w krótkim czasie osiągało wysoką temperaturę. Zagadnienie właściwości medium ściernego o cechach elektrolitu jest przedmiotem dalszych badań.

## LITERATURA

- [1] Budzyński A.F.: Badania teoretyczne i doświadczalne procesu elektrochemicznego honowania (ECH). Wyd. Uczeln. ATR, seria Rozprawy 6, Bydgoszcz 1982.
- [2] Dąbrowski L., Marciniak M.: Sposób obróbki elektrochemiczno-ścierniej i urządzenie do obróbki elektrochemiczno-ścierniej. Zgłoszenie patentowe nr P 336 709, 1999.

- [3] Rajeshwar G., Kozak J., Rajurkar K. P.: Modelling and Computer Simulation of Media Flow in Abrasive Flow Machining Process. PED-Vol. 68-2, Manufacturing Science and Engineering, Chicago, USA 1994.
- [4] Stackhouse J.: Abrasive – flow Machining Deburrs Difficult Channels. Tooling and Production Magazine. Woburn, USA 1990.

## ABRASIVE - FLOW MACHINING WITH ELECTROCHEMICAL MACHINING

### Summary

The present paper presents non-conventional abrasive-flow machining (ECAFM), a standard AFM accompanied by the electrochemical machining (ECM). AFM is a metal finishing process across surfaces and through holes that are otherwise impossible to finish effectively. ECAFM is intensified by electrochemical micro-cutting. The investigations indicated an upgraded efficiency of rough surface smoothing and edge rounding.

Key words: abrasive-flow machining, electrochemical machining, surface smoothing, edge rounding

## PRODUKTY EROZJI W PROCESIE ELEKTROCHEMICZNEGO OSTRZENIA ŚCIERNIC ZE SPOIWEM METALOWYM

Andrzej Gołąbczak

Wydział Mechaniczny Politechniki Łódzkiej,  
Katedra Technologii Maszyn,  
ul. Stefanowskiego 1/15, 90-537 Łódź

W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące przydatności roztworów elektrolitów o małym stężeniu związków chemicznych w procesie elektrochemicznego ostrzenia ściernic ze spoiwem metalowym metodą ECD - AC. Zaprezentowano przebieg reakcji elektrochemicznych zachodzących w procesie anodowego roztwarzania składników ściernicy oraz zidentyfikowano produkty erozji elektrochemicznej powstające w tym procesie.

*Słowa kluczowe:* ściernice supertwarde, ostrzenie elektrochemiczne, ECD - AC, reakcje elektrochemiczne, produkty erozji

### 1. WSTĘP

Ściernice ze ścierniw supertwardych spojonych spoiwem metalowym, zwane dalej ściernicami supertwardymi, charakteryzują się bardzo atrakcyjnymi właściwościami użytkowymi. Barię ograniczającą zakres przemysłowego zastosowania tej nowoczesnej grupy narzędzi ściernych jest trudność kształtowania ich makro- i mikrogeometrii czynnej powierzchni ściernicy (CPS) w procesie obciążania [3]. Problem ten występuje zarówno u wytwórców ściernic, jak ich użytkowników. Jednym z efektywnych sposobów kształtowania CPS ściernic supertwardych jest opracowana w Politechnice Łódzkiej metoda elektrochemiczna z udziałem prądu przemiennego (ECD - AC) [3]. Głównymi zaletami metody ECD - AC są m.in.: bezkontaktowe doprowadzenie napięcia do ostrzonej ściernicy, niższy koszt zasilacza prądowego oraz możliwość zastosowania roztworów elektrolitu o małym stężeniu związków chemicznych, charakteryzujących się małą uciążliwością dla otoczenia.

Dobór roztworu elektrolitu, spełniającego wymagania metody ECD - AC, poprzedziły eksperymentalne badania elektrochemicznych procesów roztwarzania metali wchodzących w skład spoiwa ściernicy i odpadów szlifowania zalepiających CPS. Stosując metody chronowoltamperometrii cyklicznej i chronopotencjometryczną [2, 3, 5] ustalono charakterystyki roztwarzania tych metali, a na ich podstawie dokonano wyboru elektrolitu. Dla warunków prowadzonych badań nad ostrzeniem ściernic diamentowych, zalepionych odpadami szlifowania węglików spiekanych (typu S20S) stosowano 5% roztwór mieszaniny związków chemicznych: NaCl, KNO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

W prezentowanym artykule skupiono uwagę na ustaleniu przebiegu reakcji elektrochemicznych, zachodzących w procesie roztwarzania metali, wchodzących w skład spoiwa ściernicy i odpadów szlifowania zalepiających CPS, w dobranym elektrolicie oraz identyfikacji powstających produktów erozji elektrochemicznej. Poznanie przebiegu tych reakcji oraz identyfikacja powstających w ich wyniku produktów erozji ma bowiem istotne znaczenie dla oceny prawidłowości przebiegu procesu ECD - AC i trwałości elektrolitu, sposobu jego regeneracji oraz możliwości utylizacji odpadów ostrzenia. Przebieg reakcji elektrochemicznych ustalono na podstawie pomiarów chronopotencjometrycznych roztwarzania próbek metali w elektrolizerze (potencjostat/galwanostat Autolab) oraz obserwacji procesu ich roztwarzania. Identyfikację produktów reakcji elektrochemicznych dokonano na dyfraktometrze TuR - M62 metodą rentgenograficznej analizy fazowej [1]. Analizie rentgenograficznej poddano zarówno produkty powstające na roztwarzanych próbkach metali, jak i osady z elektrolitu.

## 2. PRZEBIEG REAKCJI ELEKTROCHEMICZNYCH I IDENTYFIKACJA PRODUKTÓW EROZJI ELEKTROCHEMICZNEJ

Analiza przebiegu reakcji elektrochemicznych dotyczyła wszystkich metali wchodzących w skład spoiwa ściernicy i odpadów szlifowania zalepiających CPS. Wykresy chronopotencjometryczne roztwarzania tych metali w dobranym roztworze elektrolitu przedstawiono na rys. 1. Obrazują one przebieg zmian potencjałów elektrody  $E(t)$  w czasie roztwarzania, odpowiadającym rzeczywistemu okresowi ostrzenia ściernic metodą ECD - AC (około 15 min.). Analiza wykresów chronopotencjometrycznych, poczynione obserwacje procesu roztwarzania próbek metali oraz pomiary rentgenograficzne produktów erozji elektrochemicznej umożliwiły ustalenie przebiegu reakcji elektrochemicznych.

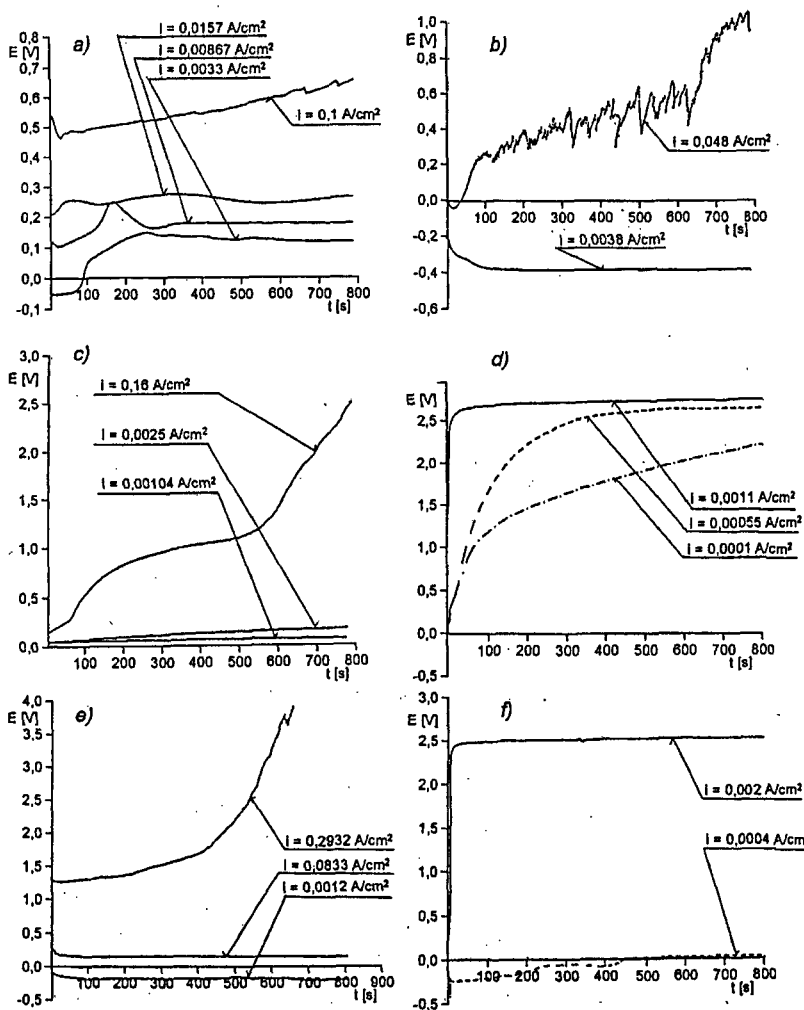
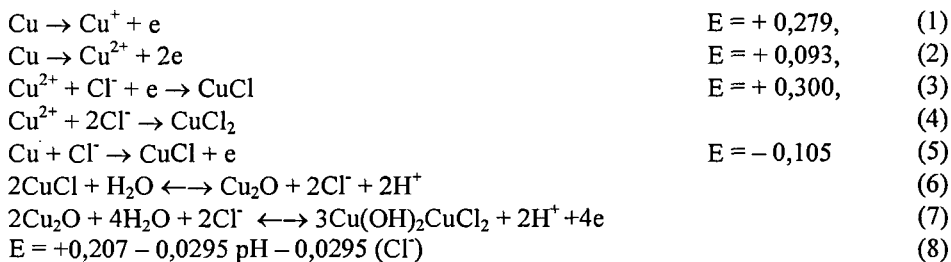
### 2.1. ROZTWARZANIE SKŁADNIKÓW SPOIWA ŚCIERNICY

Badania rentgenograficzne metalowego spoiwa ściernicy o charakterystyce: S3012 175x6x3x32 D125 M100 ujawniały obecność następujących metali: miedzi, cyny, srebra. Do prób roztwarzania przygotowano próbki chemicznie czystych metali.

#### Roztwarzanie miedzi

Analiza zmian potencjału elektrody (próbki) - rys. 1a, wskazuje, że przy najmniejszej gęstości prądu ( $0,003 \text{ A/cm}^2$ ) zachodzą reakcje roztwarzania miedzi do jej jonów  $\text{Cu}^+$  i  $\text{Cu}^{2+}$ , które ze składnikami roztworu tworzą produkty reakcji. Obserwacja otoczenia elektrody wykazała powstawanie niebieskiego osadu – prawdopodobnie uwodnionego  $\text{CuCl}_2$  lub zasadowego węgla miedzi (II). Po zakończeniu procesu roztwarzania na powierzchni elektrody widoczny był także osad koloru białego ( $\text{CuCl}$ ). Znaczna część powstających produktów zsuwała się z powierzchni elektrody, opadając na dno elektrolizera. Produkty te po całkowitej sedymentacji zmieniały barwę na brunatno-brązową. Identyfikacja rentgenograficzna powstałych produktów (rys. 2a, b) wykazała, że na powierzchni elektrody powstawały głównie związki  $\text{CuCl}$  i  $3\text{Cu}(\text{OH})_2\text{CuCl}_2$ , natomiast w osadzie z roztworu elektrolitu (po sedymentacji i wysuszeniu) związki:  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuO}$  oraz  $\text{Cu}_7\text{Cl}_4(\text{OH})_{10}\text{H}_2\text{O}$ . Uwzględniając wyniki analizy

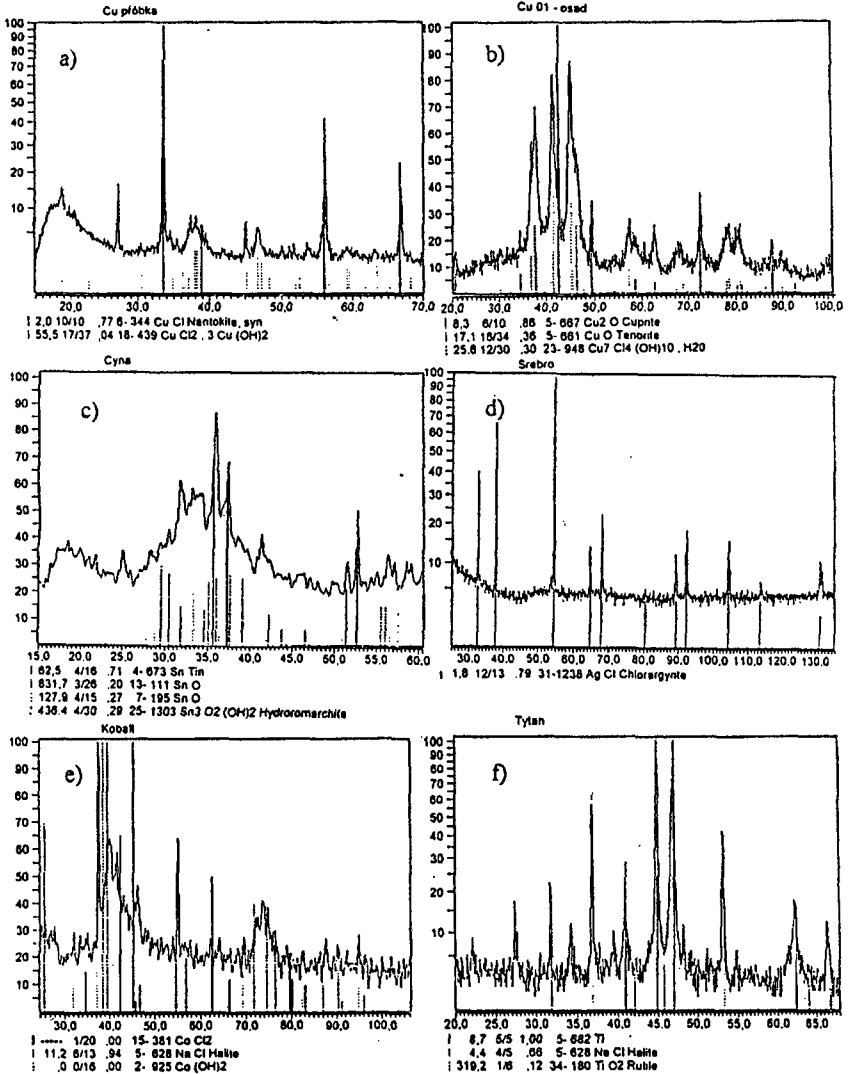
procesu anodowego roztrawiania miedzi można zaproponować następujące reakcje elektrochemiczne:



Rys. 1. Wykresy chronopotencjometryczne roztrawiania składników ściernicy: a) miedzi, b) cyny, c) srebra, d) tytanu, e) kobaltu, f) wolframu



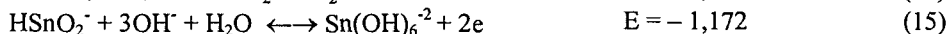
Z przedstawionych reakcji i pomiarów rentgenograficznych wynika, że po stosunkowo krótkim czasie (około 5h) obecności produktów reakcji (osadu) w elektrolicie, następuje ich przekształcenie głównie w tlenki miedzi oraz złożony związek  $\text{Cu}_7\text{Cl}_4(\text{OH})_{10}\text{H}_2\text{O}$ . Ten kierunek przemian reakcji jest korzystny z punktu widzenia trwałości elektrolitu oraz możliwości jego regeneracji. Zidentyfikowana w produktach reakcji niewielka ilość związku  $\text{Cu}_7\text{Cl}_4(\text{OH})_{10}\text{H}_2\text{O}$  może wskazywać na nieznaczne obniżenie w elektrolicie stężenia jonów  $\text{Cl}^-$  i  $\text{OH}^-$ .



Rys. 2. Dyfraktogramy produktów erozji składników ściernicy: a) miedzi - próbki, b) miedzi - osadu z elektrolitu, c) cyny, d) srebra, e) kobaltu, f) tytanu

## Roztwarzanie cyny

Analiza przebiegu zmian potencjału  $E(t)$  (rys. 1b) pozwala stwierdzić, że już przy najniższej gęstości prądu roztwarzania ( $i = 0,0038 \text{ A/cm}^2$ ) zachodzą reakcje powstawania jonów  $\text{Sn}^{+2}$  i  $\text{Sn}^{+4}$ . Przy tej gęstości prądu wartości potencjałów odpowiadają w przybliżeniu potencjałom standardowym (dla  $\text{Sn}^{+2}$   $E = -0,23\text{V}$  i  $\text{Sn}^{+4}$   $E = 0,382\text{V}$ ). Podczas tych reakcji na powierzchni elektrody powstaje biały, gąbczasty osad. Zwiększenie gęstości prądu roztwarzania (do  $i = 0,048 \text{ A/cm}^2$ ) powoduje wzrost potencjału elektrody, a po polaryzacji trwającej około 600 sek. obserwuje się prawie jej całkowite roztworzenie na granicy zanurzenia w roztworze elektrolitu. Na powierzchni elektrody powstaje biały porowaty osad, utworzony przez tlenki i wodorotlenki cyny, których obecność potwierdzono analizą rentgenograficzną (rys. 2c). Uwzględniając powyższe wyniki można zaproponować następujące reakcje:



Z przedstawionych reakcji wynika, że produktami procesu roztwarzania cyny są stwierdzone w pomiarach rentgenograficznych tlenki cyny i wodorotlenek cyny  $\text{Sn}(\text{OH})_2$ . Przedstawione reakcje anodowego roztwarzania cyny wskazują na możliwość obniżania się stężenia jonów  $\text{OH}^-$  w elektrolicie.

## Roztwarzanie srebra

Charakterystyki zmian potencjału  $E(t)$  (rys. 1e) wskazują, że dla małych gęstości prądu ( $i = 0,001 - 0,0025 \text{ A/cm}^2$ ) potencjały elektrody są stałe, a ich wartości odpowiadają reakcji elektrodowej srebra w obecności jonów  $\text{Cl}^-$  i  $\text{OH}^-$ . W tym przypadku na powierzchni elektrody stwierdzono powstawanie szarego, dobrze przylegającego osadu chlorku srebra (elektroda chlorosrebrna). Podwyższenie gęstości prądu do  $0,16 \text{ A/cm}^2$  powodowało wzrost potencjału do około  $0,55\text{V}$ , odpowiadającego anodowemu roztwarzaniu srebra. Równocześnie nie stwierdzono obecności jonów srebra w elektrolicie. Przy podwyższonych gęstościach prądu zaobserwowano tworzenie się białego osadu dyfundującego w głąb roztworu. Mogą go tworzyć związki  $\text{AgCl}$  lub  $\text{Ag}_2\text{O}_3$ . Ich obecność potwierdziła analiza rentgenograficzna produktów roztwarzania na powierzchni elektrody oraz osadu w elektrolicie (rys. 2d). Podstawowym składnikiem osadu z elektrolitu jest  $\text{AgCl}$  oraz niewielka ilość  $\text{Ag}_2\text{O}$ . Dla analizowanego procesu anodowego roztwarzania srebra można zaproponować następujące reakcje elektrochemiczne:



Uzyskane wyniki pomiarów rentgenograficznych oraz przebieg reakcji elektrochemicznych wskazują, że proces anodowego roztwarzania srebra może prowadzić do obniżenia się stężenia jonów  $\text{Cl}^-$  w elektrolicie, ponieważ głównym produktem reakcji jest  $\text{AgCl}$ .

## 2.2. ROZTWARZANIE WĘGLIKÓW SPIEKANYCH ZALEPIAJĄCYCH CPS

Próby roztwarzania obejmowały próbki metali tworzących strukturę szlifowanych węglików spiekanych, tj.:  $\text{TiC} - \text{Co}$  i  $\text{WC} - \text{Co}$ , w których kobalt spełnia rolę metalowego spoiwa. Wyniki badań nad roztwarzaniem tego typu związków, publikowane przez H. Scholla [4] wskazują, że w pierwszej kolejności roztwarzaniu ulega metal wiążący węgliki ( $\text{TiC}$  i  $\text{WC}$ ), tj. kobalt. Następstwem reakcji utleniania - redukcji kobaltu jest odsłonięcie ziaren węglików  $\text{TiC}$  i  $\text{WC}$ , co sprzyja ich roztwarzaniu. Produktami roztwarzania węglików są odpowiednio: dwutlenek tytanu w przypadku  $\text{TiC}$  i kwas wolframowy w przypadku  $\text{WC}$ .

### Roztwarzanie kobaltu

Charakterystyki zmian potencjału elektrody kobaltu  $E(t)$  (rys. 1e) wskazują, że przy małej gęstości prądu jego potencjał roztwarzania jest ujemny. Na powierzchni próbki obserwowany jest różowy osad, który przemieszcza się w głąb elektrolitu, co wskazuje na możliwość powstawania wodorotlenku kobaltu. Zwiększenie gęstości prądu do wartości  $i = 0,293 \text{ A/cm}^2$  powoduje roztwarzanie kobaltu do jonów  $\text{Co}^{+3}$ . Przy tej gęstości prądu obserwowano szybkie zrywanie produktów roztwarzania z powierzchni próbki, a po polaryzacji trwającej około 500 sek. gwałtowny wzrost potencjału oraz całkowite roztwarzanie próbki na granicy jej zanurzenia w elektrolicie. Przebieg procesu roztwarzania wskazuje, że produktami reakcji elektrochemicznych mogą być: chlorek kobaltu, trudno rozpuszczalny wodorotlenek kobaltu oraz węglan kobaltu. Pomiar rentgenograficzne produktów roztwarzania (rys. 2e) potwierdziły obecność dwóch pierwszych związków, tj.  $\text{CoCl}_2$  i  $\text{Co(OH)}_2$ . Uwzględniając wyniki analizy procesu roztwarzania kobaltu można zaproponować następujące reakcje:

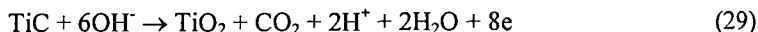


Analiza przedstawionych reakcji wskazuje na możliwość zmniejszania się stężenia jonów  $\text{OH}^-$  i  $\text{Cl}^-$  w elektrolicie.

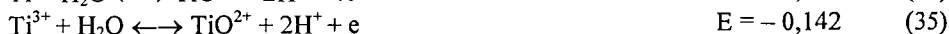
### Roztwarzanie węgliku tytanu

Charakterystyki zmiany potencjału  $E(t)$  (rys. 1d) pozwalają stwierdzić, że przy małej gęstości prądu na powierzchni elektrody powstaje warstwa tlenkowa. Powierzchnia próbki pokrywa się bowiem nalotem o białym zabarwieniu. Obecność tlenku tytanu

potwierdziły także badania rentgenograficzne (rys. 2f). Uwzględniając wyniki badań [4] dotyczące roztwarzania tego związku można zaproponować reakcję jego rozpadu:



Proces roztwarzania tytanu prowadzący do powstania jego tlenków może przebiegać wg następujących reakcji:



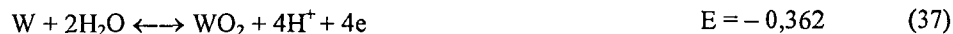
Powstające w wyniku reakcji tlenki tytanu wskazują na jego pasywację. Ponieważ jony tego metalu powstają przy ujemnych wartościach potencjału, można oczekiwać ich obecności w elektrolicie.

### Roztwarzanie węgla wolframu

Charakterystyki zmiany potencjału  $E(t)$  (rys. 1f) wskazują, że dla małych gęstości prądu występuje ujemny potencjał elektrody. Jego wartość wynosząca 0,25V odpowiada reakcji jonizacji wolframu. Wzrost gęstości prądu powoduje pasywację powierzchni próbki, podobnie jak w przypadku tytanu. Proces roztwarzania węgla wolframu powoduje rozpad tego związku do kwasu wolframowego i dwutlenku węgla [4]. Przebieg reakcji chemicznej tego rozpadu opisuje równanie:



W procesie roztwarzania próbki wolframu stwierdzono powstawanie na powierzchni elektrody ciemnego nalotu (warstwy tlenkowej) oraz stosunkowo wysoki potencjał anodowy (około 2,5 V), występujący już przy niewielkiej gęstości prądu. Wynika zatem, że wolfram w tym procesie ulega pasywacji. Możliwe są następujące reakcje wolframu w badanym elektrolicie:



Z przedstawionych reakcji wynika, że produktami roztwarzania węgla wolframu będą tlenki wolframu oraz wydzielający się dwutlenek węgla.

## 3. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania umożliwiły ustalenie przebiegu reakcji elektrochemicznych roztwarzania składników ściernicy w dobranym elektrolicie, identyfikację powstających produktów reakcji oraz ich wpływ na stabilność właściwości elektrochemicznych roztworu elektrolitu i jego regenerację, a także związaną z tym procesem uciążliwość dla środowiska naturalnego.

Badania wykazały, że anodowemu roztwarzaniu ulegają wszystkie metale wchodzące w skład spoiwa ściernicy (Ag, Cu, Sn) oraz kobalt, który jest metalem wiążącym dla węglików spiekanych (TiC – Co i WC – Co) zalepiających CPS. W następstwie roztwarzania kobaltu węgliki TiC i WC ulegają rozpadowi głównie do CO<sub>2</sub> i tlenków metali składowych, pasywnych względem roztworu. Ich pasywność nie wpływa jednak na utrudnienie procesu ostrzenia ściernicy, bowiem roztwarzanie metali spoiwa ściernicy (Ag, Cu, Sn) oraz kobaltu powoduje ich zrywanie z CPS.

Podstawowymi produktami reakcji elektrochemicznych w procesie roztwarzania są: chlorki, tlenki oraz węglany roztwarzanych metali. Wymienione związki chemiczne występują w elektrolicie głównie w postaci osadów, dających się łatwo odfiltrować, co jest bardzo korzystne przy regeneracji roztworu i utylizacji odpadów z procesu ostrzenia ściernic. Wykazano, że w przypadku anodowego roztwarzania metali w elektrolicie może występować obniżenie stężenia jonów Cl<sup>-</sup> i OH<sup>-</sup>. Ten ujemny efekt można eliminować przez uzupełnianie elektrolitu odpowiednimi związkami, kontrolując przy tym stężenie jonów i pH elektrolitu.

## LITERATURA

- [1] Bojarski Z., Łagiewka E.: Rentgenowska analiza strukturalna. PWN, Warszawa 1998.
- [2] Galus A.: Teoretyczne podstawy elektrolizy chemicznej. WNT, Warszawa 1987.
- [3] Gołąbczak A.: Elektrochemiczne ostrzenie ściernic z zastosowaniem prądu przemiennego. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej 762, Łódź 1996.
- [4] Hofman B., Kupis J., Scholl H.: Anodnoje rostvorenije spečiennych karbidov tipa (TiC, M), (M – Co, Ni ili Fe). Elektrochimija 30 (1994) 3.
- [5] Koryta J., Dvorák J., Boháčkova V.: Elektrochemia. PWN, Warszawa 1980.

## EROSION PRODUCTS IN THE PROCESS OF ELECTROCHEMICAL DRESSING OF GRINDING WHEELS WITH METAL BOND

### Summary

The present research investigated the applicability of low-concentration chemical compound electrolyte solutions in the metal bond electrochemical dressing of grinding wheels with the ECD - AC method. There were defined erosion products and a course of electrochemical reactions of the grinding wheel anodic digestion.

Key words: super hard grinding wheel, electrochemical dressing, ECD-AD, electrochemical reaction, erosion products

## ANALYSIS OF STRESSES IN ABRASIVE WATERJET MACHINING (AWJM)

Ashraf I. Hassan, Jan Kosmol, Jerzy Bursa

Department of Machine Technology,  
Technical University of Silesia,  
Konarskiego St. 18a, 44-101 Gliwice, Poland

Despite a large number of abrasive waterjet machining (AWJM) models developed, there still has been some confusion about the nature of how workpiece surfaces erode. It is believed that analysis of stresses generated at the AWJ cutting interface could provide a deeper insight into the erosion behaviour. The present paper presents a stress analysis of AWJM using a non-linear dynamic finite element (FE) code in order to explain the process. The main objective is to develop an erosion mechanism which would describe the abrasive-material interaction adequately. The new model considers both AWJ dynamic loading conditions and non-linear material behaviour. The results show that the workpiece material fails due to highly localised plastic deformation caused by compressive stresses, especially at the AWJ cutting interface. Also AWJM causes residual stresses to remain in the workpiece material after machining.

*Key words:* abrasive waterjet, finite element analysis, stresses, erosion mechanism

### 1. INTRODUCTION

Abrasive waterjet machining (AWJM) has been substantially studied by several researchers all over the world over the past two decades. The literature has been dominated by rate-independent analyses of AWJ impact. In some cases the Hertzian theory of impact was applied, however it is not suitable for modelling such high-speed non-linear dynamic process. In his original analysis of the equation of motion of the abrasive particle impacting the workpiece surface, Finnie [5] employed a rigid plastic constitutive model for the workpiece material. The plastic flow stress was assumed to be constant and is reached immediately upon impact. Variations of the flow stress with strain rate, strain and strain hardening were neglected and, therefore, elastic strains and residual stresses could not be predicted. This idealisation may be one of the important reasons for the non-consistency between experimental and theoretical results. On the other hand, the abrasive particle was assumed to be a rigid body. Bitter, for the first time, introduced in his study on erosion by solid particle impact at large angles the energy needed to either remove a unit volume of material from the workpiece surface for the deformation wear mode [1] or to scratch a unit volume from the workpiece surface for the cutting wear mode [2] in order to represent the elastic-plastic behaviour of the workpiece material. The flow stress was also considered constant and rate - independ-

ent. Based on both Finnie's and Bitter's models, Hashish [9, 10, 12] developed an extensive modelling study of abrasive waterjet machining. Although the importance of the effect of the strain rate was pointed out, no such consideration, accounted for by the previous two researchers, was made in formulating the AWJM prediction equations. This resulted in deviations of the predicted values from the experimental ones and could not be used in predicting precise machining such as AWJ milling. In a subsequent study, Hashish [11] concluded that one should not expect a single material property to be sufficient over the entire range of practical AWJM parameters. In the new model, the use of the theoretical fracture strength ( $E/14$ ) as a material constant for deformation wear mode resulted in a reasonable correlation with experimental results while the use of the yield strength as a measure of hardness was used for the cutting wear mode. In a recent review of erosion by solid particle impact, Finnie [6] confirmed that the concept of constant plastic flow stress, employed in previous studies, is not reasonable in view of the large strains which occur during AWJ impact. He concluded that this aspect of erosion needs further investigation. In a more recent experimental model, Tazibt et al. [27] related the flow stress of the workpiece material at impact to the waterjet pressure by a constant determined experimentally. However there were significant deviations between measured and predicted results. Paul et al. [24] built an improved model based on Finnie's and Hashish's models. In the authors' opinion, it is the idealization of neglecting the variations of the flow stress with the strain rate, strain and strain hardening that simplified the precise modelling of the AWJM and led to deviations from experimental results. Despite the previous AWJ models developed, there still has been some confusion about the nature by which workpiece surfaces erode. Analysis of impact stresses generated step by step at the AWJ cutting interface could provide deeper insight to explain such an erosion behaviour. There is also a great difficulty in modelling the process due to the effects of many conflicting parameters. In abrasive waterjet machining, due to the abrasive particle impact on the workpiece surface at a high supersonic speed, most of the plastic deformation occurs in only several microseconds leading to a high strain rate dynamic loading.

The finite element method has been successfully applied in modelling of many conventional and non-conventional machining processes. Some of these models are presented in Table 1. FEM has been also successfully applied in modelling of different low-speed metal forming processes, as shown in Table 2.

Table 1. FE models for metal cutting

FEM code	Analysis type	Material model	Elements	Boundary conditions	Failure criterion	FE results	Expl. work	Authors
	2D non-linear static (only one step)	rigid-plastic Von Mises	130 four-nodded quadrilaterals		chip leaves at a nodal point	forces, chip shape, stress, strain	forces, chip shape	Iwata et al. [17]
	Non-linear dynamic (updated Lagrangian)	elastic visco-plastic Von Mises	240 four-nodded quadrilateral	prescribed displacements	distance between tool tip and point	forces, stress, temperature	forces, residual stresses	Shih et al. [25]
ABAQUS	2D non-linear static (total Lagrangian)	elastic-perfectly plastic	208 four-nodded quadrilateral	prescribed displacement (0.9 $\mu$ s time step)	small distance from the tip	Stresses and strains	cutting forces	Komvo-poulous [19]
	Non-linear static (updated Lagrangian)	elastic visco-plastic Von Mises	4-noded quadrilateral	prescribed displacements	distance between tool tip and nodal point	stress, forces	residual stresses by X-ray	Shih and Yang [26]
DEFORM-2D	Non-linear dynamic	rigid plastic			a critical damage value	discontinuous chip curl	-	Certi et al. [3]
	3D Linear static (updated Lagrangian)	elastic-plastic Von Mises	8-nodded solid elements		a critical value of strain energy density	stresses, strains, cutting forces	cutting forces	Lin and Yang [20]



Table 2. FE models for low-speed metal forming processes

Manufacturing process	FEM code	Analysis type	Material model	Elements	Boundary conditions	FE results	Expl. work	Authors
Cold extrusion		2D non-linear dynamic (updated Lagrangian)	rigid plastic Levy-Mises	352 four-noded axi-symmetric elements		deformation/strains/tresses		Osen [23]
Spike forging processes	DEFORM-3D	3D Non-linear dynamic	rigid visco-plastic	8 node solid element	Impact area: 2040 mm <sup>2</sup> / 0.25 m/s	deformation	Measuring the final height	Wu et al. [29]
Multiblow hammer forging		3D Non-linear dynamic, explicit time integration	elastic-plastic Johnson-Cook yield surface	2000-6000 eight noded iso-parametric / contact searching scheme	Impact load: up to 8000 KN / 3 m/s	deformation	deformation	Yang and Yoo [30]
Cold Radial Forging	ANSYS	3D Non-linear dynamic	elastic-plastic Von Mises	8 node solid element (300 solid elements/ 2418 contact elements)		deformation, stresses, strains		Jang and Liou [18]

Table 3. FE models for AWJM

FEM code	Analysis type	Material model	Elements	Boundary conditions	Failure criterion	FE results	Expl. work	Authors
ANSYS	linear dynamic	abrasive particle: linear elastic		calculated inertia force by a system of springs / Coulomb friction		stresses and strains	Comparing failed particle to FEM	Hlavac & Sochor [16]
ALGOR	Non-linear static	2D elastic-plastic	4 noded quadrilaterals	concentrated forces		deformation/ stresses		Hassan & Kosmol [14,15]
ANSYS	Non-linear static	Non-linear plastic with cracking and crushing	1863 solid concrete elements	Compressive pressure load		stress / crack propagation	Stress distribution and crack initiation	Mohan and Kovacevic [22]
ANSYS	Linear static	linear elastic	1863 elements / 1 contact element between the w.p. and the indenter	concentrated static load : up to 44.5 N		strains /Max strain: 1e-4, Max Deformation: 8 e-4 mm	static strains between an indenter and the surface by Moire/ comparing to FEM	Guo et al. [7]
ANSYS	Linear static	linear elastic	solid	pressure load		same as above	same as above	Guo and Ramulu [8]

There have been only few preliminary attempts at analysing AWJM using the powerful tool of the finite element method (Table 3). A 2D-plane strain simple FE model was developed by Hlavac and Sochor [16]. The model was linear dynamic and impact forces were assumed and input into the FE code. Only a qualitative comparison between the FE results and the shape of the failed abrasive grains was provided. A non-linear material model was developed by Hassan and Kosmol [14, 15]. The model predicted the plastic deformation occurring at the initial stages of impact. Deformations and stresses were computed and related to the erosion phenomena. The static assumption oversimplified AWJ impact. A 3D non-linear FE model was recently provided by Mohan and Kovacevic [22]. The model considers the plastic deformation and failure of the workpiece material. As the model is non-linear static, it did not consider the dynamic behaviour of the high speed AWJ impact. Pressure loading was assumed and input into the FEM code. Finally, the FE results were not verified with consistent AWJ results. Another recent simple model was developed by both Guo et al. [7] and Guo and Ramulu [8]. This model was far limiting in representing the actual AWJ process as it was a static model representing a high speed impact process. Workpiece material non-linearity was not considered. The maximum linear strain did not exceed 0.0001 in a process whose strains may exceed unity, especially at the cutting interface where the impact deformation is the highest. Due to the above shortcomings of the previous models, a more comprehensive non-linear dynamic FE model is required to fully understand the mechanism of cutting in AWJ. The objective of this paper is to develop an erosion mechanism which would adequately describe the abrasive-material interaction through stresses generated in the workpiece material under the action of AWJ. The new model considers both AWJ dynamic loading conditions and non-linear material behaviour. In the present model, the dynamic progress of the abrasive-workpiece interaction will be tracked at small time increments.

## 2. FINITE ELEMENT MODEL

In the present study, the following assumptions are relevant: the hydrostatic loading plays a secondary role in the cutting process, the abrasive particle velocity is recalculated at the beginning of each time step, the time step is chosen as  $0.01 \mu\text{s}$  and particles' disintegration in the mixing chamber is neglected. Due to the symmetry of both geometry and loading, we only need to model and analyse a quarter model. The workpiece is modelled by a three dimensional finite element model and is divided into 20 noded higher order non-linear solid elements. A total number of 250 elements were used to model the workpiece with the size of each element of  $0.1 \text{ mm} * 0.1 \text{ mm} * 0.1 \text{ mm}$ . The number of nodal points is 1566. The overall workpiece dimensions are  $0.5 \text{ mm} * 1 \text{ mm} * 0.5 \text{ mm}$ . The workpiece material is carbon steel, Young's modulus is  $207 \cdot 10^3 \text{ MPa}$ , Poisson's ratio is 0.3, density is  $7850 \text{ kg/m}^3$ , yield stress is  $207 \text{ MPa}$  and strain hardening modulus  $34.5 \cdot 10^3 \text{ MPa}$ . The constitutive model used for the workpiece is chosen as Von Mises elastoplastic isotropic hardening with linear strain hardening. Non-linear dynamic analysis considers the effects of mass and damping. The mass and damping matrices are defined as in linear dynamic analysis, where the damping coefficient is applied to the linear stiffness matrix of the element assemblage. In many metal forming processes, the plastic strains completely dominate the elastic strains so it is convenient to use rigid plastic models, whereas in AWJM, only the cutting interface goes plastic

while the rest of the workpiece remains elastic. Any yielding criterion assumes that the effects of strain rate are neglected. For a strain hardening material, the size and shape of the yield locus depend on the complete history of plastic deformation [4]. On the other hand, the abrasive particle is modelled using 16 twenty noded solid elements. Linear elastic model is chosen for the abrasive particle material. The dimensions of each element are  $0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ . The abrasive particle material is garnet, with Young's modulus of  $248 \times 10^3 \text{ MPa}$ , Poisson's ratio of 0.27 and density of  $4325 \text{ kg/m}^3$ . An abrasive particle of mesh number 60, mesh size  $400 \text{ }\mu\text{m}$ , and velocity of  $400 \text{ m/s}$  is modelled with a stand-off distance of  $0.1 \text{ mm}$  from the workpiece surface. It is allowed to move freely downwards, perpendicular to the workpiece surface. Modelling of abrasive-workpiece interaction is carried out using 3D contact elements which are added between the abrasive particle and the workpiece to allow for complete interaction including transfer of momentum. The model was then analysed on a Pentium II PC workstation and the deformations and stresses within the workpiece material were obtained using ALGOR Accupak/VE non-linear dynamic stress analysis and event simulation Version 12 WIN. The analysis formulation used is Updated Lagrangian Formulation. For complete description of the model, the reader is referred to another paper by the authors [13].

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

Hashish [12] found that the value of the dynamic flow stress for steel is equal to  $E/14$ . This value considers the small size effect as the impact of the abrasive particle is very localised and is similar to the value observed in typical erosion experiments. The impact of the abrasive particle on the workpiece surface causes peak loads which cause extremely high stresses to build up causing local plastic deformation at the point of impact. Consequently, for a short instance, intensive stresses, that frequently produce a local site of damage, develop in the workpiece material. In ductile materials, as in the present case, where the primary failure mechanism is plastic flow, the damage appears in the form of a conical crater around the impact site with the apex exactly in the center. As a result, high residual compressive stresses are induced in the surface near layer. These stresses provide a beneficial effect in improving the fatigue strength and reducing stress concentration in components such as shafts, gears and spindles [28]. Figure 1 shows the results of the maximum principal stresses acting at the cutting interface. It must be noted that these results are averaged across each element; i.e. smoothed. It is apparent that the impact region is subject to high plastic compressive stresses, which exceed the rupture strength of the workpiece material causing local plastic deformation. At the beginning of AWJ impact, the maximum compressive stress lies away from the centre of the impact site, Fig. 1 (a). Shortly, the abrasive particle penetrates into the workpiece material and the compressive stress region is concentrated and the position of the maximum compressive stress shifts inwards to the centre of the impact site. The stress wave induced in the workpiece material, as a result of the initial impact, is clearly seen. At later stages, Fig. 1 (b) and (c), stress waves have propagated into the workpiece. The distribution of the minimum principal stresses are shown in Fig. 2. The impact interface is severely plastically stressed in compression. These stresses are the cause of AWJ kerf generation. The maximum of these compressive stresses lies, as in the case of maximum principal stresses, away from the centre of the impact site. Shortly,

as the abrasive particle penetrates into the workpiece material, the position of maximum compressive stress shifts towards the centre of the impact site. To the contrary of the maximum principal stresses, they occupy a larger area surrounding the centre of the impact site. The region in the vicinity of the centre of the impact site has large compressive stress that exceeds the compressive strength of the workpiece material. As can be seen from Fig. 3 (a and b), high flow stresses are increasingly set up in the centre of the impact site. Plastic flow begins, Fig. 3 (c), at a stage when the yield criterion is first satisfied in the most critically stressed part; i.e. at AWJ impact site. A further increase in impact loads causes spreading of the plastic zone which is separated from the elastic material by an elastic-plastic boundary [4].

It must be noted that the abrasive particle loads the workpiece surface with three loads: impact load, acting at the stagnation area and having the same direction as the jet, shear load, which is applied in a direction tangent to the kerf and the whole kerf surface is affected by the shear and normal load, which is applied in a direction normal to the kerf surface. Referring to Fig. 4, shear stresses rapidly develop as a result of abrasive particle impact. These stresses may reach values that exceed the shear strength of the workpiece material under similar erosion, shortly after a small period from impact leading to a ductile fracture. This suggests that the failure mechanism associated with AWJ impact is a combination of both brittle fracture due to high compressive stresses and ductile fracture due to high shear stresses. Residual shear stress is present around the AWJ kerf and it decreases as we get away from the kerf inner edge.

#### 4. PROPOSED MECHANISM OF MATERIAL REMOVAL

An erosion mechanism could be proposed with the aid of Fig. 3 as follows: at the moment of impact, the maximum flow stress is developed not at the centre of the impact site but at some distance away and surrounded by a ring of lower flow stresses. As a result, pressure waves are generated below the impact site that extend to a depth equal to one quarter of the abrasive length with a maximum stress of 735 MPa (Fig. 3 a). Shortly after the first impact, the stress ring spreads to the centre of the impact site with the maximum stress exactly in the centre (Fig. 3 b). The ring is decreased in diameter and the pressure waves are becoming more concentrated in the centre. As the flow stresses generated both on the surface of the workpiece material and below the impact site, the maximum of which is 11,000 MPa, exceed the rupture strength of the workpiece material under such high strain rate erosion, circumferential deformation is produced in a ring around the centre of the impact site, extending to a depth of one half of the length of the abrasive particle. As a result, a micro AWJ kerf is generated (Fig. 3 c), and it is widened as the abrasive particle penetrating into the workpiece material. At this stage, plastic deformation becomes very localised at the centre of the impact site. Afterwards, plastic pressure waves are quickly spreading below this severely plastically deformed impact site far beyond the previous depth. As a result of this softening effect, plastic deformation continues at the impact site. Metallographic examination and x-ray diffraction studies have shown that plastic deformation, in the form of both slip and mechanical twinning, could occur in a layer about 30 to 300  $\mu\text{m}$  below the surface during the initial stages of damage. This layer remains fairly constant in thickness throughout the subsequent stages of material removal [21].

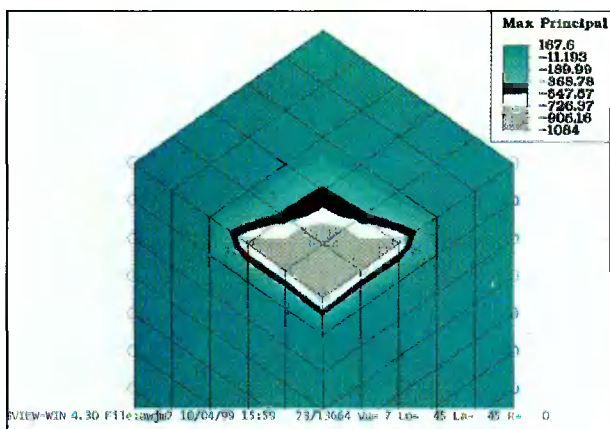
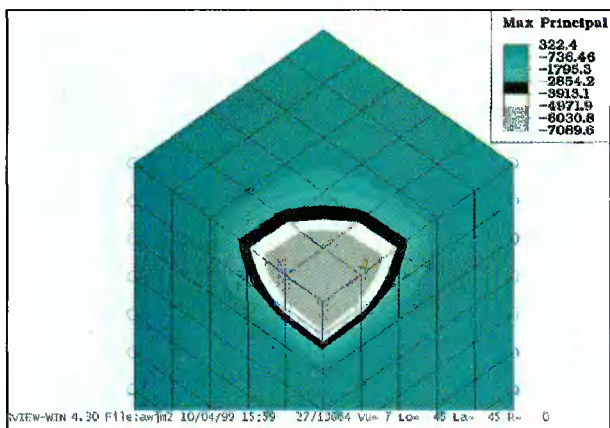
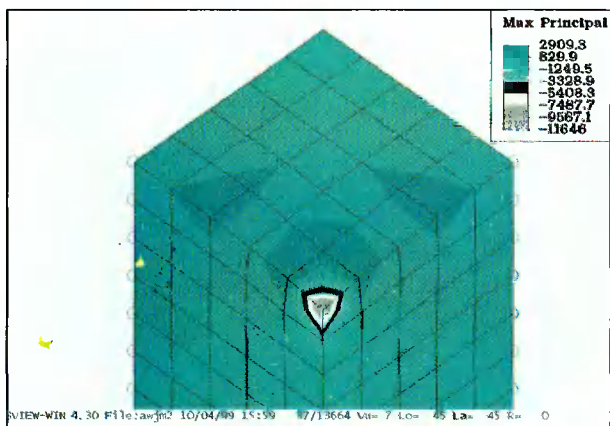
(a)  $t = 0.23 \mu\text{s}$ (b)  $t = 0.27 \mu\text{s}$ (c)  $t = 0.37 \mu\text{s}$ 

Fig. 1. Development of maximum principal stresses as a result of AWJ impact  
 Rys. 1. Rozwój maksymalnych naprężeń głównych jako rezultatu oddziaływania AWJ

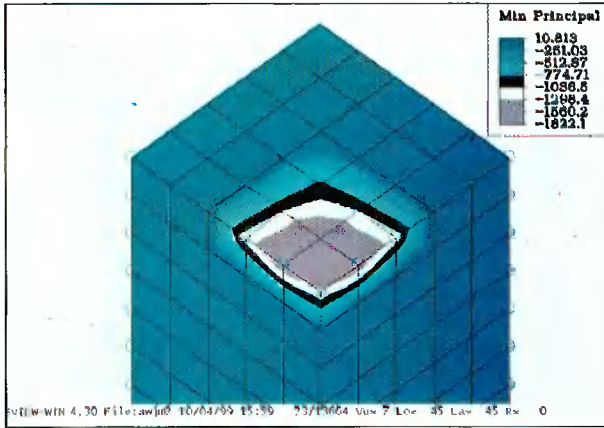
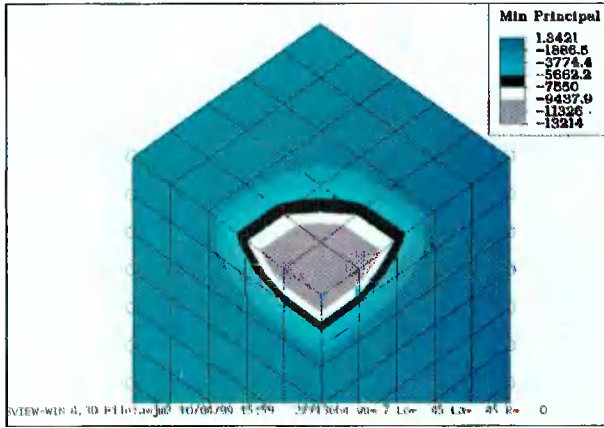
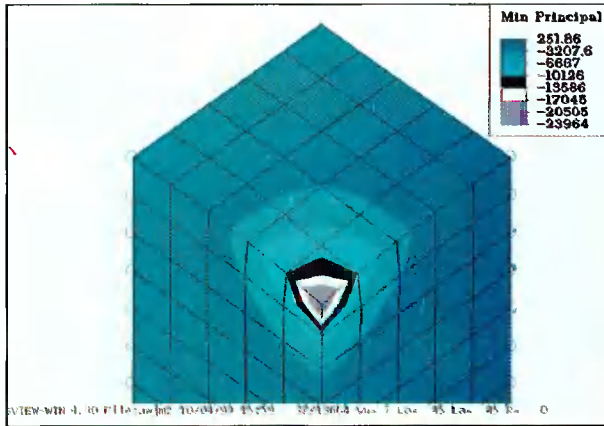
(a)  $t = 0.23 \mu\text{s}$ (b)  $t = 0.27 \mu\text{s}$ (c)  $t = 0.37 \mu\text{s}$ 

Fig. 2. Development of minimum principal stresses as a result of AWJ impact  
 Rys.2. Rozwój minimalnych naprężeń głównych jako rezultatu oddziaływania AWJ

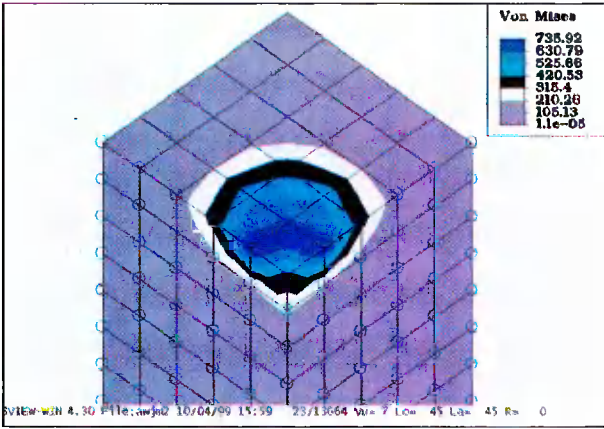
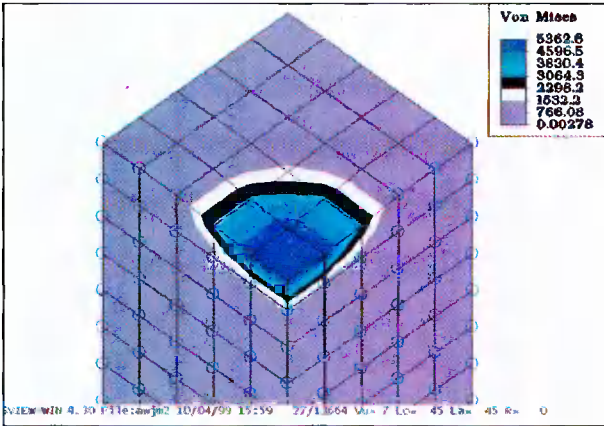
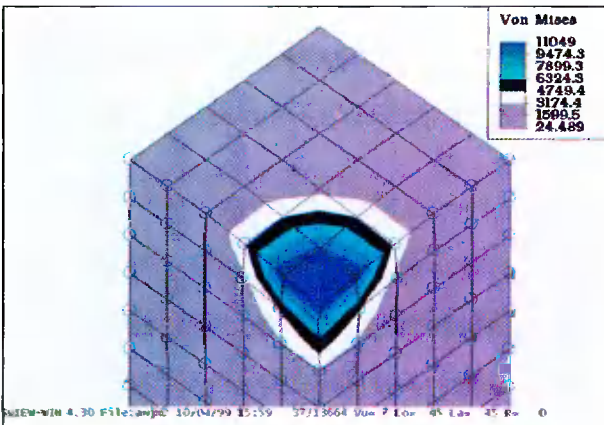
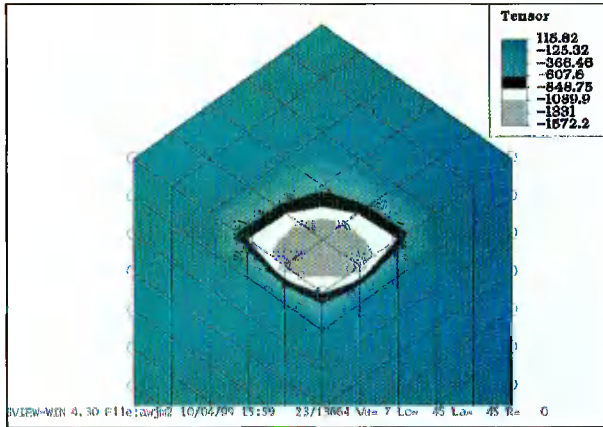
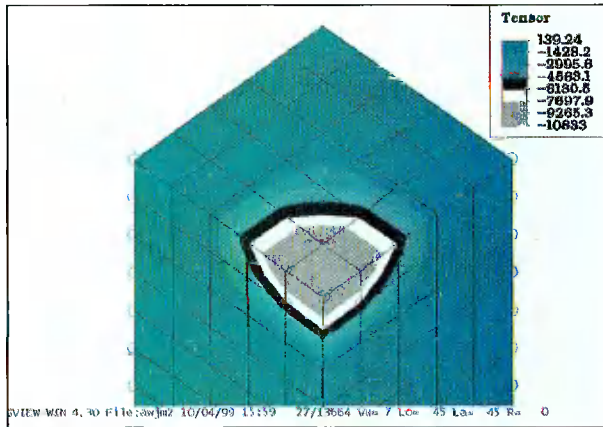
(a)  $t = 0.23 \mu\text{s}$ (b)  $t = 0.27 \mu\text{s}$ (c)  $t = 0.37 \mu\text{s}$ 

Fig. 3. Development of Von Mises stresses as a result of AWJ impact  
 Rys. 3. Rozwój naprężeń von Mises'a jako rezultatu oddziaływania AWJ

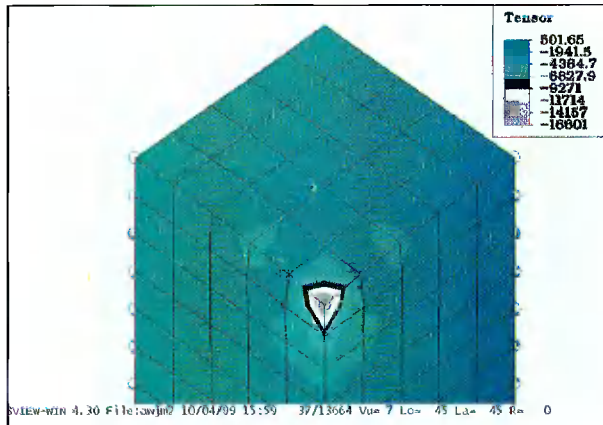




(a)  $t = 0.23 \mu\text{s}$



(b)  $t = 0.27 \mu\text{s}$



(c)  $t = 0.37 \mu\text{s}$

Fig. 4. Development of shear stresses as a result of AWJ impact (Stress tensor: SZZ direction)  
 Rys. 4. Rozwój naprężeń stycznych jako rezultatu oddziaływania AWJ (tensor naprężeń: kierunek SZZ)

## 5. CONCLUSIONS

In the present paper, stresses generated while cutting with abrasive waterjet (AWJ) are analysed in order to provide deeper insight into the behaviour of such an erosion process. The results could be summarised as follows:

1. The impact of the abrasive particle on the workpiece surface causes extremely high stresses, which exceed the rupture strength of the workpiece material under high strain rate erosion loading, to build up causing local plastic deformation at the centre of the impact site. This initiates the generation of a micro AWJ kerf.
2. Shear stresses rapidly develop as a result of abrasive particle impact. These stresses may reach values that exceed the shear strength of the workpiece material under similar erosion, leading to a ductile fracture.
3. An erosion mechanism is proposed as follows: pressure waves are generated below the impact site that extend to a subsurface layer. The generated stress ring spreads to the centre of the AWJ impact site with the maximum stress exactly in the centre. The pressure waves are becoming more concentrated in the centre. As the flow stresses exceed the rupture strength of the workpiece material under such high strain rate erosion, circumferential deformation is produced in a ring around the centre of the impact site. As a result, a micro AWJ kerf is generated and it is widened as the abrasive particle penetrates into the workpiece material.
4. AWJM causes residual stresses to remain in the workpiece material after machining and, as a result, the workpiece strength could be decreased.

## REFERENCES

- [1] Bitter J.G.A.: A study of Erosion Phenomena. Wear, Part I, Vol. 6, 1963.
- [2] Bitter J.G.A.: A study of Erosion Phenomena. Wear, Part II, Vol. 6, 1963.
- [3] Ceretti E., Taupin E., Altan T.: Simulation of Metal Flow and Fracture Applications in Orthogonal Cutting, Blanking and Cold Extrusion. Annals of the CIRP, Vol. 46, No. 1, 1997.
- [4] Chakrabarty J.: Theory of Plasticity. McGraw-Hill Book Company, First Edition, 1987.
- [5] Finnie I.: Erosion of Surfaces by Solid Particles, Wear, Vol. 3, 1960.
- [6] Finnie I.: Some Reflections on the Past and Future of Erosion. Wear, Vol. 186-187, 1995.
- [7] Guo Z., Ramulu M., Jenkins M G.: Modelling the Waterjet Contact/Impact on Target Material, Proceedings of the 10<sup>th</sup> American Waterjet Conference, paper 3, Houston, Texas 1999.
- [8] Guo Z., Ramulu M.: Simulation of Displacement Fields Associated with Abrasive Waterjet Drilled Hole, Proceedings of the 10<sup>th</sup> American Waterjet Conference, paper 19, Houston, Texas 1999.
- [9] Hashish M.: A Model for Abrasive-Waterjet (AWJ) Machining Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 111, 1989.

- [10] Hashish M.: A Modelling Study of Metal Cutting with Abrasive Waterjets. Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 106, No. 1, 1984.
- [11] Hashish M.: Material Properties in Abrasive Waterjet Machining. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 117, 1995.
- [12] Hashish M.: Visualisation of the Abrasive Waterjet Cutting Process. Experimental Mechanics, 1988.
- [13] Hassan A.I., Kosmol J.: A Finite Element Model for Abrasive Waterjet Machining (AWJM). Proceedings of the Conference "XXXVIV Symposium "Modelowanie w mechanice", Gliwice, Poland 2000.
- [14] Hassan A.I., Kosmol J.: A New Model for Abrasive Waterjet Machining (AWJM). Proc. of the Inter. Conf. on Water Jet Machining, Cracow, Poland 1998.
- [15] Hassan A.I., Kosmol J.: Simulation of Abrasive Waterjet Machining (AWJM). Proc. of: XXXVIII Symposium "Modelowanie w mechanice", Gliwice, Poland 1999.
- [16] Hlavác L.M., Sochor T.: A Contribution to the Physics of a High Velocity Abrasive Particle Interaction with Brittle Non-homogeneous Materials. Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Symposium on Jet Cutting Technology, 1994.
- [17] Iwata K., Osakada K., Terasaka Y. : Process Modelling of Orthogonal Cutting by the Rigid-plastic Finite Element Method. Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 106, 1984.
- [18] Jang D.Y., Liou J.H. : Study of Stress Development in Axi-symmetric Products Processed by Radial Forging Using a 3-D Non-linear Finite Element Method. Journal of Material Processing Technology, Vol. 74, 1998.
- [19] Komvopoulos K., Erpenbeck S.A: Finite Element Modelling of Orthogonal Metal Cutting. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 113, 1991.
- [20] Lin Z.C., Yarng Y.D.: Three-dimensional Cutting Process Analysis with Different Cutting Velocities. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 70, 1997.
- [21] Metal handbook, Vol 11: Failure Analysis, 9<sup>th</sup> edition, 1986.
- [22] Mohan R., Kovacevic D.: Finite Element Modelling of Crack Propagation in PCC Slab Slotted with Abrasive Waterjet, Proceedings of the 10<sup>th</sup> American Waterjet Conference, paper 5, Houston, Texas 1999.
- [23] Osen W.: Possibilities and Limitations of Cold Extrusion Processes Combined with Radial Extrusion, Proceedings of the Second International Conference on Technology of Plasticity, vol.1, Stuttgart, Germany, 1987.
- [24] Paul S., Hoogstrate A.M., van Luttervelt C.A., Kals H.J.J.: Analytical and Experimental Modeling of Abrasive Waterjet Cutting of Ductile Materials. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 73, 1998.
- [25] Shih A.J.M., Chandrasekar S., Yang H.T.Y.: Finite Element Simulation of Metal Cutting Process with Strain-rate and Temperature Effects, Fundamental Issues in Machining, PED-Vol. 43. Papers presented at the Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers, Dallas, Texas 1990.

- [26] Shih A.J.M., Yang H.T.Y.: Experimental and Finite Element Predictions of Residual Stresses Due to Orthogonal Metal Cutting. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 36, 1993.
- [27] Tazibt A., Abriak N., Parsy F.: Interaction of Abrasive Waterjet with Cut Material at High Velocity of Impact- Development of Experimental Correlation. *European Journal of Mechanics and Solids*, Vol. 15, No. 6, 1996.
- [28] Tönshoff H.K., Kroos F., Marzenell C.: High-Pressure Water Peening- a New Mechanical Surface-strengthening Process. *Annals of the CIRP*, Vol. 46/1, 1997.
- [29] Wu W.T., Li G.J., Tang J.P.: Finite Element Analysis of Three-Dimensional Metal Flow in Cold and Hot Forming Processes. *Annals of the CIRP*, Vol. 43, No. 1, 1994.
- [30] Yang D.Y., Yoo Y.H.: Analysis and Design of Multiblow Hammer Forging Processes by the Explicit Dynamic Finite Element Method. *Annals of the CIRP*, Vol. 46, No. 1, 1997.

## ANALIZA STANU NAPRĘŻEŃ W PRZEDMIOCIE OBRABIANYM STRUMIENIEM WODNO-ŚCIERNYM

### Streszczenie

Pomimo opracowanej dotychczas znaczącej liczby modeli obróbki strumieniem wodno-ściernym, w dalszym ciągu występują wątpliwości dotyczące mechanizmu erozji występującej na powierzchni przedmiotu poddanego takiej obróbce. Sądzi się, że analiza naprężeń powstających na powierzchni przedmiotu w obszarze działania strumienia wodno-ściernego pozwoli głębiej wyjaśnić ten mechanizm. Niniejszy artykuł przedstawia wyniki badań metodą elementów skończonych z zastosowaniem nieliniowej analizy naprężeń. Zasadniczym celem badań był dalszy rozwój mechanizmu erozji, który pozwoliłby na dokładniejszy opis wzajemnych oddziaływań materiału ściernego i przedmiotu obrabialnego. Nowy model uwzględnia zarówno dynamiczny charakter strumienia wodno-ściernego oraz nieliniowość materiału przedmiotu (odkształcenia plastyczne). Wyniki badań pokazują jak następuje usuwanie materiału przedmiotu w wyniku silnego, lokalnego odkształcenia, spowodowanego akumulowaniem naprężeń, zwłaszcza w strefie działania strumienia cieczy. Obróbka strumieniem wodno-ściernym powoduje także występowanie naprężeń resztkowych w materiale przedmiotu, co potwierdzają wyniki badań analitycznych.

Słowa kluczowe: obróbka strumieniem wodno-ściernym, analiza elementów skończonych, naprężenia, mechanizm erozji

### ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to express their gratitude to the Polish State Committee for Scientific Research (KBN) for its support of this work.



## WYBRANE ZAGADNIENIA OBRÓBKJI JONOWEJ POWIERZCHNI METALI

Wojciech Kacalak, Ryszard Lewkowicz, Ryszard Ściegienka

Wydział Mechaniczny Politechniki Koszalińskiej,  
Katedra Mechaniki Precyzyjnej,  
ul. Raławicka 15-17, 75-620 Koszalin

W referacie przedstawiono stanowisko obróbkowe oraz opis układu źródła jonów typu Kaufmana dającego prostokątny kształt wiązki jonów. Opisano stosowane próbki, procesy obróbkji jonowej próbek stacjonarnych i obrotowych. Podano parametry i wyniki obróbkji dotyczące zmian chropowatości i topografii powierzchni oraz głębokości efektywnej penetracji jonów.

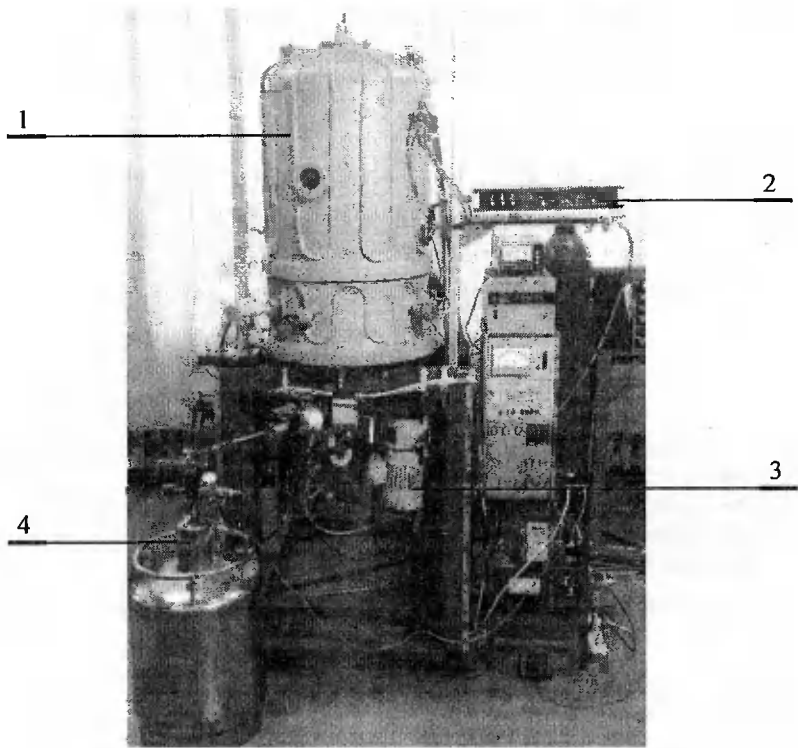
*Słowa kluczowe:* obróbkja jonowa, chropowatość, topografia powierzchni

### 1. WSTĘP

Znane od początku dwudziestego wieku, a stosowane technologicznie od lat siedemdziesiątych [5] wiązki jonów są traktowane nadal jako nowe i rozwojowe. Potrzeby stosowania strumienia jonów będącego unikatowym narzędziem, wynikały z rozwoju inżynierii jądrowej, mikroelektroniki, inżynierii materiałowej i badań kosmicznych. Istotną rolę odegrał również postęp w technice wysokiej próżni i aparaturze próżniowej. W Politechnice Koszalińskiej zbudowano stanowisko badawcze zawierające oryginalne [1] źródło jonów typu Kaufmana. Dysponując źródłem wytwarzającym wiązkę jonów o kształcie zbliżonym do prostokąta i stosunkowo dużej powierzchni przeprowadzono badania, których celem było rozpoznanie możliwości zastosowania tej obróbkji w szczególnych obszarach technologicznych. Obrabiano typowe materiały konstrukcyjne jak: stal, miedź, mosiądz i stop aluminium. Przewidywanym zakresem zastosowania tej obróbkji w procesie wytwarzania precyzyjnych części maszyn mogłoby być uzyskiwanie bardzo gładkich, pozbawionych zanieczyszczeń powierzchni o rozwiniętej topografii, większej chropowatości zapewniającej przyczepność nakładanych na te powierzchnie warstw.

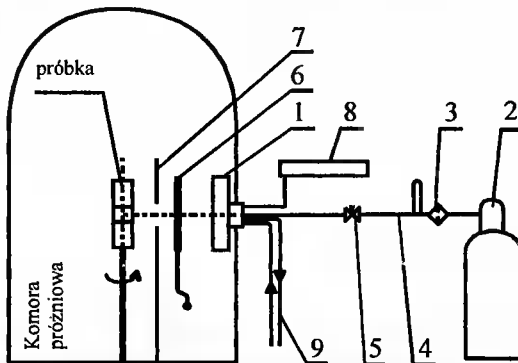
### 2. STANOWISKO BADAWCZE

Stanowisko do obróbkji jonowej jest częścią stanowiska do badania procesu mikro- i nanoobróbkji w próżni i w superniskich temperaturach przedstawionego na rys. 1 [2, 3]. Obróbkę jonową stosowano przed mikroskrawaniem do oczyszczania powierzchni próbek, a ponadto prowadzono badania rozpoznawcze tego procesu.



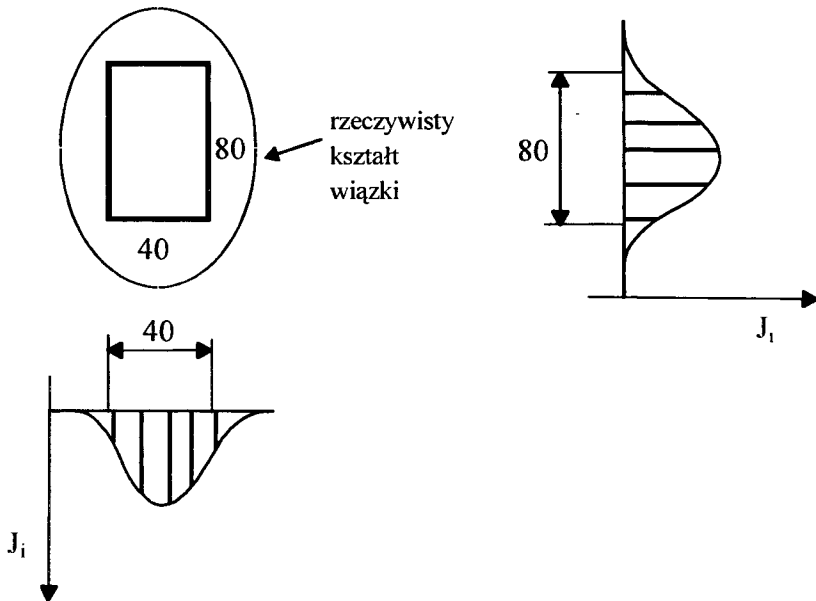
Rys. 1. Stanowisko obróbkowe do badania procesu mikro i nanoobróbki w próżni i supermiskich temperaturach, 1 - układ próżniowy, 2 - układ źródła jonów, 3 - układ mikro i nanoobróbki, 4 - układ supermiskich temperatur

Układ źródła jonów (rys. 2) zawiera źródło jonów typu Kaufmana 1, butlę z czystym argonem 2, wyposażoną w zawór redukcyjny 3 z rotametrem, przewód odprowadzający argon 4, zawór dozujący argon do źródła jonów 5, przesłonę pomiarową 6, osłonę stałą 7, zasilacz wysokoczęstotliwościowy źródła jonów 8 oraz układ chłodzenia wodnego 9.



Rys. 2. Schemat układu źródła jonów

Źródło jonów typu Kaufmana [1] wytwarza szeroką wiązkę jonów argonu o energii do 1,5 keV. Kształt wiązki jonów zbliżony jest do prostokąta o wymiarach 40x80 mm, w którym występują najwyższe natężenia prądu jonowego  $I_j$ . Na rys. 3 przedstawiono kształt wiązki jonów i rozkład natężenia prądu jonowego.



Rys. 3. Pole działania wiązki jonów i rozkład natężenia prądu jonowego

Źródło jonów posiada termokatodę wolframową o średnicy 0,185 mm i długości 80 mm, anodę, układ magnetyczny zbudowany na magnesach ze stopów neodymu, żelaza i boru oraz siatki ekstrakcyjne z blachy molibdenowej. Izolację elementów zapewniają przepusty ceramiczne spełniające rolę elementów montażowych dla innych części. Parametry pracy źródła: energia  $E_j = 520 \div 1500$  eV, gęstość prądu jonowego  $I_j = 0 \div 1$  mA/cm<sup>2</sup>, ciśnienie argonu  $p_a = 2 \div 5 \times 10^{-4}$  hPa. Zasilanie źródła - katody: DC  $U_K = 12$  V,  $I_K = 10$  A; anody: DC  $U_A = 60$  V,  $I_A = 2,5$  A; układu ekstrakcyjnego: DC  $U_E = 1500$  V,  $I_E = 100$  mA.

Zasilacz posiada wszystkie niezbędne elementy połączone wewnętrznie w strukturę jednego zespołu. Ma on także niezależny miernik prądu jonowego z wejściem z przesłony pomiarowej. Oprócz zasilania elektrycznego źródło wymaga chłodzenia wodnego o natężeniu przepływu 3 dm<sup>3</sup>/min oraz gazu roboczego argonu ok. 10 sccm.

Wiązka jonów może służyć do oczyszczania powierzchni, wytwarzania struktur w materiałach elektronicznych przez trawienie, ujawniania struktury krystalograficznej stopów metali i ich połączeń, „pocieniania” cienkich warstw, itp. Ze względu na małą średnią wartość gęstości prądu jonowego nie przekraczającą 1 mA/cm<sup>2</sup> oraz typowo ñyczny charakter rozpylania szybkości usuwania materiału nie są duże i wynoszą od kilku do kilkunastu nm/min [1, 4].



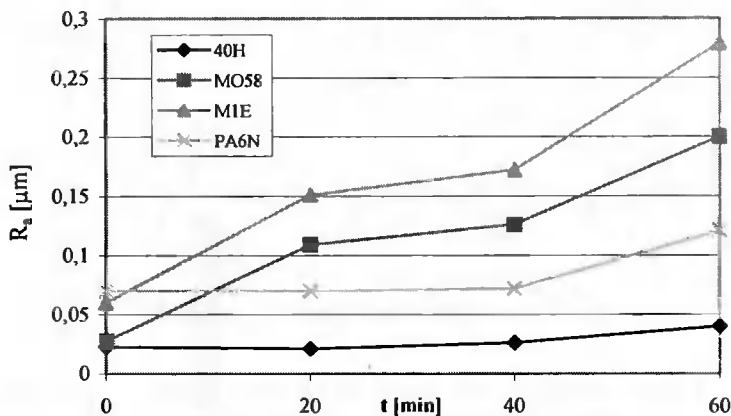
### 3. WARUNKI I ZAKRES BADAŃ

Do badań użyto trzech rodzajów próbek: płaskich i walcowych stacjonarnych oraz walcowych obrotowych. Stacjonarne próbki płaskie o wymiarach 36x10x4 mm mocowano do chwytu po cztery i umieszczano w odległości około 130 mm równolegle do czołowej powierzchni źródła jonów. Strumień jonów kierowano prostopadłe do powierzchni płytek, przy czym jej część przysłaniało osłoną metalową, co chroniło ją przed obróbką. Po obróbce występowały na płytce dwie powierzchnie. Umożliwiało to określenie efektów geometrycznych obróbki jonowej. Stacjonarna mosiężna próbka walcowa o średnicy 40 mm i długości 90 mm mocowana była we wrzecionie mikroobrabiaarki, które znajdowało się w odległości 150 mm od czołowej powierzchni źródła jonów. Do połowy długości próbka była osłonięta opaską chroniącą powierzchnię przed działaniem strumienia jonów. Obrotowe próbki walcowe o wymiarach  $\varnothing 50 \times 6$  mm układano w stos o wysokości 36 mm w kolejności od dołu: stop aluminium, miedź, stal 55, stal 1H18N9T, stal St5. Próbki mocowano na trzpieniu znajdującym się we wrzecionie mikroobrabiaarki, stanowiącej część układu mikro i nanoobróbki.

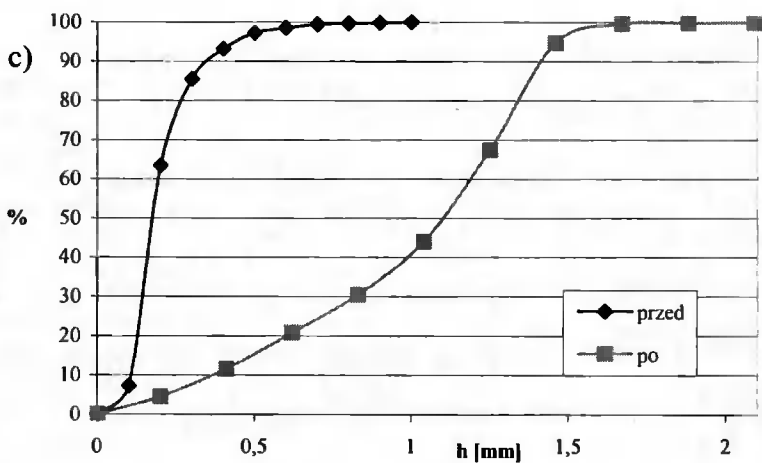
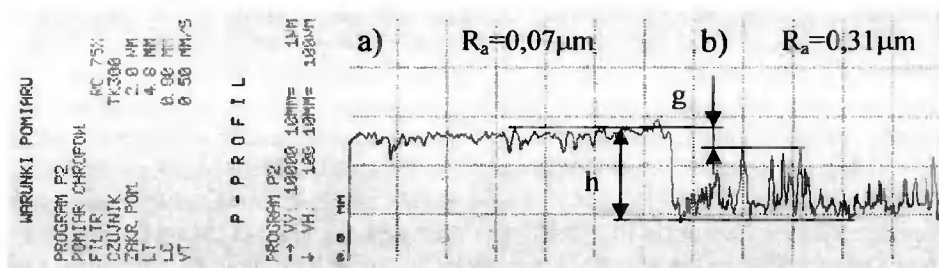
Stosowano jednakowe parametry pracy źródła jonów: ciśnienie powietrza w komorze  $p_p = 3 \div 3,6 \times 10^{-5}$  hPa,  $p_a = 3,3 \div 4 \times 10^{-4}$  hPa,  $I_k = 3,5$  A,  $I_a = 2,5$  A,  $U_a = 40$  V.  $I_E = 20 \div 25$  mA,  $U_E = 1400$  V. Czas obróbki jonowej próbek stacjonarnych płaskich wynosił 20, 40, 60 min zaś próbki stacjonarnej walcowej 60 min. Próbki walcowe obrotowe napędzano z prędkością  $n_j = 100$  obr/min. ( $v_j = 0,26$  m/s) a czas obróbki wynosił 30 min.

### 4. EFEKTY OBRÓBKI JONOWEJ

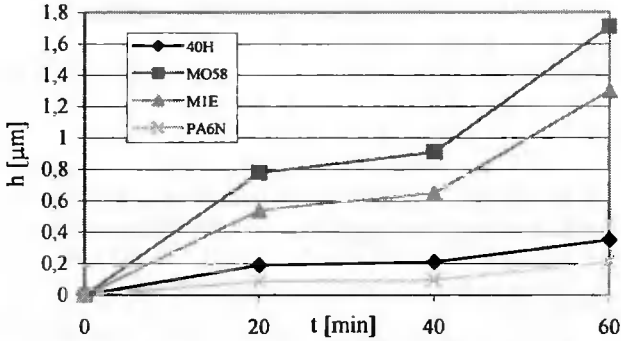
Rysunki 4 i 5 przedstawiają zmiany parametrów chropowatości i topografii powierzchni stacjonarnych płaskich próbek metalowych po obróbce jonowej, a rysunek 6 zmiany głębokości efektywnej penetracji jonów w powierzchnie tych próbek. W wyniku obróbki jonowej prostopadłym strumieniem jonów uzyskano, zgodnie z oczekiwaniami, zwiększenie chropowatości obrabianej powierzchni wraz ze wzrostem czasu trawienia. Związane to jest z ujawnianiem struktury krystalograficznej materiałów [4]. Z rysunku wynika, że najszybsze zwiększanie chropowatości powierzchni następowało dla próbek wykonanych z miedzi M1E i mosiądzu M058, co świadczy, że metale te najłatwiej poddają się rozpylaniu jonowemu. Z rysunku 5c wynika, że nośność powierzchni obrobionej jonowo jest znacznie niższa od nośności powierzchni polerowanej mechanicznie. Liniowy efekt rozpylania jonowego określano poprzez pomiar na profilogramie progu  $h$  występującego pomiędzy powierzchnią nie poddawaną obróbce jonowej a powierzchnią utworzoną w wyniku obróbki jonowej, co pokazano na rys. 5a. Wymiar ten określony między styczną do najwyższej położonych wierzchołków powierzchni początkowej i prostą styczną do najniższej położonych wgłębień powierzchni obrobionej charakteryzuje głębokość efektywnej penetracji jonów. Wymiar  $g$  określa położenie najwyższych wierzchołków powierzchni obrobionej od takich wierzchołków powierzchni początkowej. Jest to rzeczywista głębokość obróbki jonowej w rozumieniu technologii mechanicznej.



Rys. 4. Zmiany chropowatości powierzchni stacjonarnych płaskich próbek metalowych od czasu obróbki jonowej

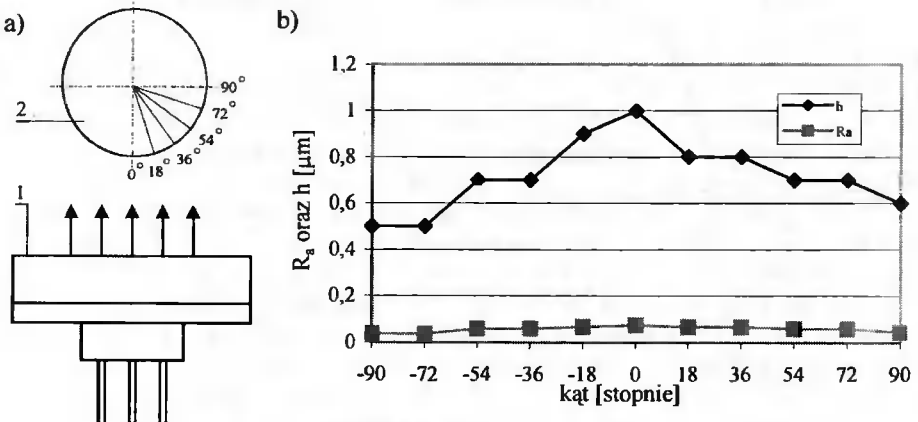


Rys. 5. Zmiany topografii powierzchni stacjonarnej płaskiej próbki miedzianej po obróbce jonowej w czasie 60 min a) profilogram powierzchni wypolerowanej foliową taśmą ścierną, b) profilogram powierzchni po obróbce jonowej, c) krzywe nośności dla obu powierzchni



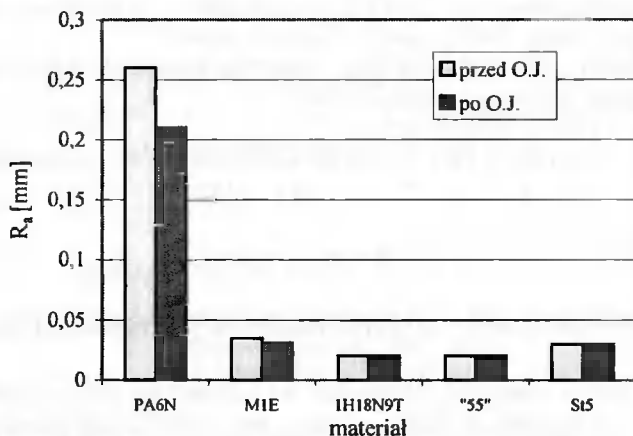
Rys. 6. Zmiany głębokości efektywnej penetracji jonów w powierzchni stacjonarnej płaskich próbek metalowych w funkcji czasu

Rysunek 7 przedstawia schemat układu obróbkowego stacjonarnej próbki walcowej oraz zmiany chropowatości powierzchni i głębokości efektywnej penetracji jonów w powierzchnię stacjonarnej próbki mosiężnej w funkcji kąta środkowego, które zaobserwowano podczas obróbki jonowej w czasie 60 min. Chropowatość po obróbce i głębokość efektywnej penetracji jonów mierzono na tworzących, równomiernie rozdzielonych na połowie obwodu i określonych kątami środkowymi od 0 do 90° i od 0 do -90°. Pozwoliło to określić zmiany uzyskiwanej chropowatości w zależności od kąta padania wiązki jonów na obrabianą powierzchnię. Początkowa chropowatość  $R_{a\text{st}} = 0,044 \mu\text{m}$  wzrasta w przedziale kątów od  $-54 \div +72^\circ$ . Największą wartość  $R_a = 0,074 \mu\text{m}$  osiągnęła ona dla kąta  $0^\circ$ , a zmniejszała się dla kątów leżących poza podanym przedziałem i wyniosła  $R_a = 0,037 \mu\text{m}$ . Maksymalną głębokość efektywnej penetracji jonów uzyskano dla kąta  $0^\circ$ , a więc przy prostopadłym kierunku ich padania na powierzchnię.



Rys. 7. Obróbka stacjonarnej próbki walcowej a) schemat układu obróbkowego, b) zmiany chropowatości oraz głębokości efektywnej penetracji jonów w powierzchnię stacjonarnej próbki mosiężnej w funkcji kąta środkowego stwierdzone podczas obróbki jonowej w czasie 60 min; 1 - źródło jonów, 2 - próbka

Rysunek 8 przedstawia zmiany parametrów chropowatości powierzchni walcowych obrotowych próbek metalowych po obróbce jonowej w czasie 30 min.



Rys. 8. Zmiany chropowatości powierzchni próbek walcowych obrotowych metalowych po obróbce jonowej

Nieznaczne zmniejszenie chropowatości wystąpiło na powierzchniach próbek o dużej chropowatości ze stopu aluminium i próbek gładkich miedzianych. Próbkę stalową gładką stosowaną w badaniach nie uległy wygładzeniu. Topografia powierzchni wszystkich próbek zmieniła się na bezkierunkową.

## 5. WNIOSKI

Analiza efektów obróbki jonowej prowadzonej w stałych parametrach, które uzyskano na powierzchniach próbek metalowych o małej chropowatości początkowej prowadzi do potwierdzenia znanych cech tej obróbki. Można także sformułować następujące wnioski:

1. Metale posiadają zróżnicowaną odporność na działanie wiązki jonów - miedź i mosiądz są podatne, a stale i stopy aluminium odporne.
2. Głębokość efektywnej penetracji jonów zależna jest od rodzaju materiału, czasu obróbki i kąta padania strumienia jonów.
3. Obróbka gładkich powierzchni próbek stacjonarnych prowadzi do zwiększenia parametrów chropowatości zależnego od podatności materiału na działanie jonów.
4. Obróbka gładkich powierzchni próbek obracających się powoduje nieznaczne wygładzenie powierzchni materiałów podatnych na działanie jonów i nie zmienia parametrów chropowatości materiałów odpornych na działanie jonów; próbki chropowate z materiałów odpornych (PA6N) ulegają pewnemu wygładzeniu.
5. Powierzchnie obrabione jonowo posiadają bezkierunkową strukturę z wyraźnie ukształtowanymi wierzchołkami oraz niższą nośność od powierzchni polerowanych mechanicznie.

6. Aktualnie stosowanie obróbki jonowej o nieskoncentrowanym strumieniu do powierzchni mechanicznych jest możliwe w pracach badawczych oraz do obróbki szczególnie odpowiedzialnych elementów. Podstawowe ograniczenie w rozszerzeniu jej stosowania stanowią wysokie koszty procesu. Przewidywać jednak można przyszłe zastosowania obróbki jonowej do powierzchni:
- o określonej mikrotopografii, zapewniających wymagane właściwości optyczne, adhezyjne, stykowe i eksploatacyjne,
  - chemicznie i fizycznie czystych,
- w aspekcie wykorzystania ich w medycynie, mikrobiologii i nanotechnologii.

## LITERATURA

- [1] Instrukcja obsługi. Źródło jonów typu Kaufmana. ITE Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1995.
- [2] Lewkowicz R., Kacalak W., Ściegienka R.: Teoretyczne i doświadczalne podstawy mikro i nanoobróbki ścierniej w próżni i superniskich temperaturach. Materiały Seminarium projektów badawczych finansowanych przez KBN w 1998 roku, Radom 1998.
- [3] Lewkowicz R., Kacalak W., Ściegienka R. i inni: Teoretyczne i doświadczalne podstawy mikro- i nanoobróbki ścierniej w próżni i superniskich temperaturach. Sprawozdanie szczegółowe z realizacji projektu badawczego KBN nr rej. 7TO7D000809, Politechnika Koszalińska, Koszalin 1998 (praca nie publikowana).
- [4] Łasisz S., Czarczyński W.: Procesy czyszczenia blach stalowych wiązką jonów przed nałożeniem powłok ochronnych. Raport ITE Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1990.
- [5] Oczóś K.: Kształtowanie materiałów skoncentrowanymi strumieniami energii. Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1988.

## SELECTED ASPECTS OF METAL SURFACE ION MACHINING

### Summary

The present paper presents the machining stand and the description of Kaufman's ion source system producing the rectangular ion beam. There described the samples applied and ion machining processes of stationary and rotary samples and defined parameters and machining results of roughness and surface topography changes as well as the effective ion penetration depth.

Key words: ion beam machining, roughness, surface topography

## EKOLOGICZNE ASPEKTY PROCESÓW ZGRUBNEGO STYKOWEGO PRZECINANIA NA PRZYKŁADZIE CIĘCIA ANODOWO-MECHANICZNEGO

Stanisław Kowalski, Kazimierz Wieczorowski

Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej,  
Zakład Projektowania Technologii,  
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań

Przedmiotem referatu są czynniki ekologiczne występujące w procesach zgrubnego elektroerozyjnego przecinania anodowo-mechanicznego oraz w stykowych procesach pokrewnych, Wpływają one na konstrukcję urządzeń technologicznych i pomocniczych oraz na bezpieczeństwo obsługi i środowisko pracy. Omówiono problem utylizacji produktów procesu oraz podano wnioski dla praktyki. Wskazano na zagadnienia harmonizacji wymogów z dyrektywami europejskimi oraz normami EN i PN.

*Słowa kluczowe:* obróbka elektroerozyjna, przecinanie, ekologia, bezpieczeństwo

### 1. WSTĘP

W procesach elektroerozyjnego stykowego przecinania materiałów takich, jak przecinanie anodowo-mechaniczne, elektrostykowe, elektrostykowo-ścierne itp., występują zagrożenia dla obsługi oraz otaczającego środowiska. Bliższa analiza roli i znaczenia tych czynników jest istotnym warunkiem wdrażania procesów do praktyki przemysłowej. W literaturze krajowej nie ma zbyt wiele prac poruszających temat ekologicznych aspektów obróbek erozyjnych i elektroerozyjnych [1, 5-8, 14]. Autorzy niniejszą publikacją pragną rozszerzyć informacje w tym zakresie o obróbki anodowo-mechaniczne.

Przedstawiony problem jest tym ważniejszy, że szereg osób wyraża negatywne opinie na zasadzie nieznajomości prezentowanych procesów twierdząc, że stosowane parametry prądowe jak i towarzyszące zjawiska stanowią zagrożenie dla środowiska a także dla obsługujących urządzenia.

W świetle nowych przepisów i norm oraz naszych starań o przyjęcie do Unii Europejskiej niezbędne jest podjęcie problemu harmonizacji regulacji technicznych. Unia Europejska wydaje dyrektywy określające podstawowe wymagania związane z bezpieczeństwem, zdrowiem i ochroną środowiska [3, 4]. Produkty, w tym przypadku obrabiarki lub urządzenia technologiczne, aby mogły być wprowadzone na rynek dowolnego państwa członkowskiego Unii powinny spełniać te wymagania i być oznaczone znakiem „CE”. Jednocześnie przyjęto, że produkt spełnia podstawowe wymagania,

wówczas, gdy wytwarzany jest zgodnie z odpowiednimi normami technicznymi (normy EN) ujednoliconymi przez Wspólnotę Europejską.

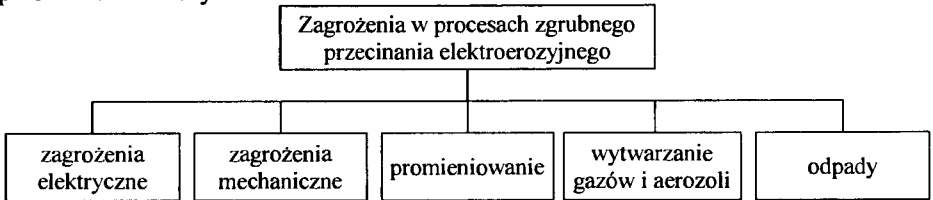
Do dyrektyw dotyczących obróbki elektroerozyjnej można zaliczyć:

- Dyrektywę Rady 73/23/EEC z 1973 r. Sprzęt niskiego napięcia,
  - Dyrektywę Rady 89/336/EEC z 1989 r. Kompatybilność elektromagnetyczna,
  - Dyrektywę Rady 89/392/EEC Maszyny,
- z późniejszymi zmianami.

Z dyrektywami związane są odpowiednie normy, które w Polsce wprowadzane są kompleksowo przez Normalizacyjne Komisje Problemowe. Prace tych Komisji są na różnych etapach zaawansowania.

## 2. CZYNNIKI STANOWIĄCE PODSTAWOWE ZAGROŻENIA

Najważniejsze grupy czynników rozpatrywanych jako podstawowe zagrożenia przedstawiono na rys. 1.



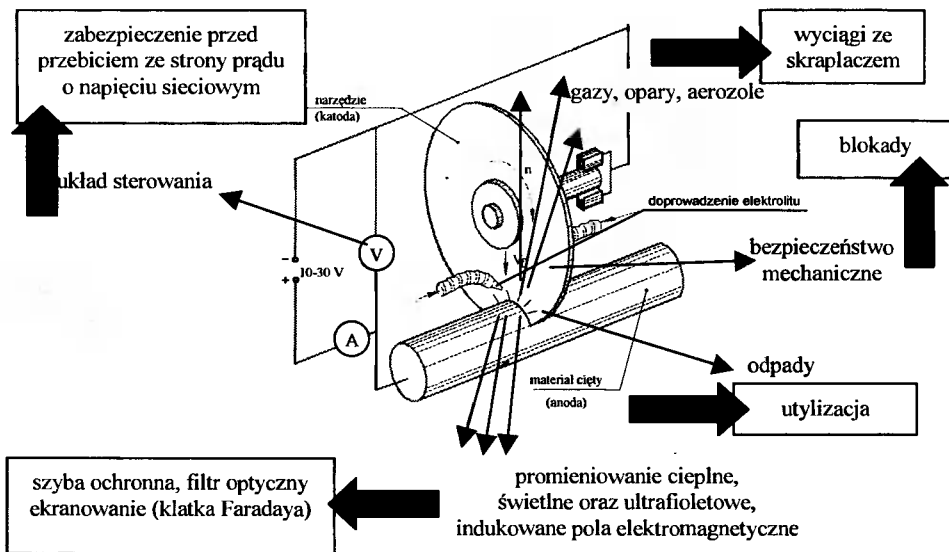
Rys. 1. Ważniejsze grupy oddziaływań na obsługę i otoczenie w procesie elektroerozyjnego przecinania stykowego

Poniżej scharakteryzowano ważniejsze zagrożenia stwarzane przez wspomniane czynniki zaś na rys. 2 zobrazowano je przykładem przecinania anodowo-mechanicznego ze wskazaniem kierunku działań zabezpieczających.

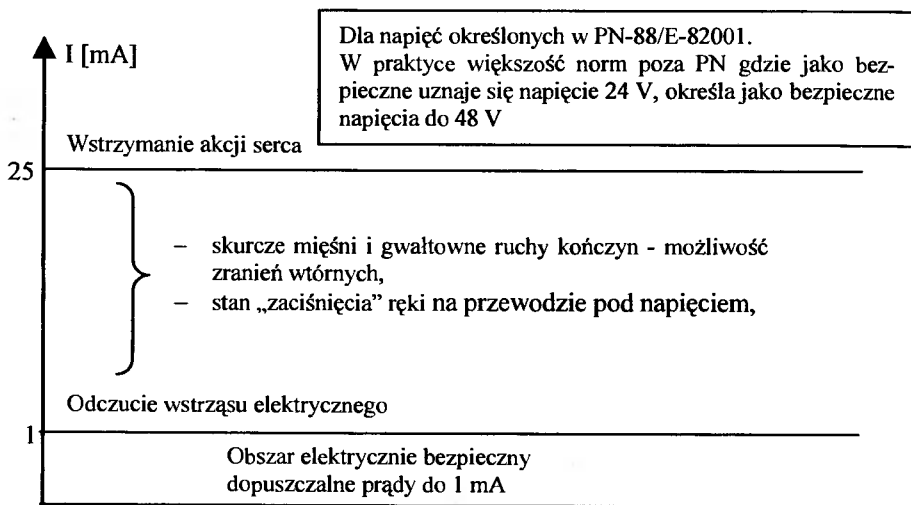
### 2.1. ZAGROŻENIA ELEKTRYCZNE

W obróbce anodowo-mechanicznej, podobnie jak i w obróbkach pokrewnych (elektrostrykowej, elektrostrykowo-ścierniej itp.) istnieje niskie prawdopodobieństwo porażenia prądem elektrycznym. Organizm człowieka reaguje na prąd elektryczny w sposób indywidualny. Na ogół prąd o natężeniu 1 mA jest odczuwany jako wstrząs elektryczny, zaś o natężeniu powyżej 25 mA może spowodować wstrzymanie akcji serca. Reakcje organizmu na prąd pokazano na rys. 3.

Przy napięciach rzędu 10÷40 V uważa się, że prąd elektryczny o natężeniu nawet kilku tysięcy amperów nie stanowi przy dotyku zagrożenia dla obsługi pod warunkiem, że nie spowodujemy zwarcia elementem metalowym (o małej oporności). Taka sytuacja występuje we wszystkich z wyżej wymienionych obróbek. Nie występuje w nich, tzw. napięcie zapłonu. Ponadto granica napięć jest niższa niż stosowana w technikach spawalniczych. Powoduje to, że bezpośrednie zagrożenie przy pracach spawalniczych, z uwagi na ręczną obsługę, jest z zasady znacznie większe [2].



Rys. 2. Źródła oddziaływań na otoczenie czynników procesu przecinania elektroerozyjnego stykowego oraz sposoby ochrony na przykładzie cięcia anodowo-mechanicznego



Rys. 3. Obszar wpływu natężenia prądu na reakcje organizmu

Dyrektywy, o których wspomiano we wstępie określają napięcia znamionowe. Dla prądu przemiennego wynoszą one 50÷1000 V, zaś dla stałego 75÷1500 V. Z tych faktów wynika, że technologie elektroerozyjne stykowe oraz anodowo-mechaniczne są bezpieczne, ponieważ stosowane napięcia nie przekraczają dolnej granicy określonej dyrektywą i wynoszą odpowiednio dla przecinania:



- anodowo-mechanicznego tarczowego do 32 V,
- anodowo-mechanicznego taśmowego do ok. 40 V,
- elektrostrykowego powietrznego lub wodnego do ok. 32 V,
- elektrostrykowo-ściernego do ok. 30 V.

Inaczej przedstawia się problem w przypadku klasycznych obróbek elektroiskrowej i elektro-impulsowej, w których napięcia, tzw. zapłonu w impulsie sięgają tej granicy lub ją przekraczają. Dla prostowników spawalniczych największą dopuszczalną średnią wartość (dla stanu napięcia jałowego) podaje PN-88/E-82001 – NSJ 100V dla współczynnika tętnień  $\geq 10\%$  lub 80V dla współczynnika tętnień  $< 10\%$ . Źródło zasilania (prostownik) powinno być łączone z obrabiarką przewodem zasilającym i przewodem powrotnym o przekrojach dostosowanych do wykorzystywanych prądów maksymalnych (rzędu kilku tysięcy A) zaś samo urządzenie technologiczne (korpus i obudowa) powinno być uziemione.

Ogólne wymagania bezpieczeństwa w konstrukcji przecinarek regulują PN-81/M-55720.08 i PN-81/M-55720.10. Dla potrzeb procesów można skorzystać również z norm spawalniczych [9, 10, 11] oraz normy PN-84/Z-01202.

## 2.2. WYTWARZANIE GAZÓW I AERAZOLI

Źródłem emisji gazów i pyłów jest zasadniczo wyładowanie elektryczne - szczególnie łukowe. Temperatura łuku waha się od 6000 K do ok. 15000 K, zwłaszcza gdy mamy do czynienia z tzw. przewężonym łukiem (plazmowym). Występujące wówczas problemy zbliżone są do rejestrowanych w procesach spawalniczych. Na podkreślenie zasługuje fakt, że większość opisywanych technologii jest realizowana „na mokro”, a więc w obecności medium, którym dla cięcia anodowo-mechanicznego jest wodny roztwór  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  zaś dla obróbki elektrostrykowej środowisko technicznej wody. Jedynie niektóre jej odmiany jako medium wykorzystują sprężone powietrze. W procesach tych dodatkowo pojawia się aerozol tworzący się z płynów pod wpływem wirującego narzędzia, szczególnie z roztworu  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  podczas przecinania anodowo-mechanicznego. Ma on (aerozol) charakterystyczne działanie powodujące kaszel. Z tego powodu realizacja procesu powinna odbywać się zasadniczo w zamkniętej komorze roboczej (odizolowanej bezpośrednio od otoczenia). Pozwala to lokalizować wydzielające się produkty procesu a poprzez wytworzenie podciśnienia usuwać je i następnie skraplać oraz neutralizować. Oczywiście w procesach tych podobnie jak i w spawalniczych wydzielają się azotki, ozon itd. Dla obróbek tych nie ma norm określających zawartość tych związków, jednak posługując się, tzw. pojęciem najwyższego dopuszczalnego stężenia (NSD) stosowanym w procesach spawalniczych można skorzystać z tych uregulowań [12]. Wartości NSD obowiązujące aktualnie w Polsce są następujące:

- tlenki azotu do  $5,0 \text{ mg/m}^3$ ,
- tlenek węgla do  $3,0 \text{ mg/m}^3$ ,
- ozon do  $0,10 \text{ mg/m}^3$ ,
- pyły sumarycznie do  $4 \text{ mg/m}^3$ ,

Według własnych danych w opisywanych procesach przecinania nie są one przekraczane. W literaturze zagranicznej, np. [13], wartości dopuszczalnych stężeń są określone na wyższym poziomie.

Przytoczone wartości NSD determinują jednocześnie intensywność pracy urządzeń wyciągowych.

### 2.3. PROMIENIOWANIE

Procesy przecinania elektroerozyjnego stykowego, szczególnie realizowane jako zgrubna obróbka wydajnościowa ze względu na zjawiska łukowe stwarzają zagrożenia promieniowaniem w widmie widzialnym, ultrafiolecie i podczerwieni. Łuk elektryczny silnie promieniuje w widmie widzialnym fal od 0,4 do 0,75  $\mu\text{m}$ . Natężenie promieniowania zależy od wartości prądu oraz obecności medium obróbkowego. Filtry optyczne stosowane w obrabiarkach powinny odpowiadać wymogom zawartym w PN-81/Z-53202. Norma obejmuje całe widmo promieniowania – a nie tylko widzialne. Do promieniowania odnosi się również rozporządzenie [12] określające maksymalne dopuszczalne ekspozycje (MDE).

Kolejne zagrożenie może stanowić promieniowanie elektromagnetyczne emitowane przez wyładowania w procesach obróbki. Stosowanie typowych (handlowych) źródeł zasilania prądem elektrycznym ułatwia sytuację o tyle, że są one fabrycznie zabezpieczone przed propagacją zakłóceń do sieci. Natomiast wskazane jest ekranowanie stref obróbki z uwagi na szkodliwe oddziaływanie wyładowań jako źródła pola elektromagnetycznego, zarówno na operatora, jak i na urządzenia elektroniczne w otoczeniu. Szczególnie, że mamy tu do czynienia z dużymi prądami impulsowymi zwarcia. Bezpieczeństwo i pomiary regulują normy:

- PN-EN 60204-1 +AC: 1997 IEC 204-1 Bezpieczeństwo maszyn. Wyposażenie elektryczne maszyn. Wymagania ogólne.
- PN-83/Z-08200 Ochrona pracy. Maszyny i urządzenia produkcyjne. Ogólne wymogi bezpieczeństwa.
- PN-84/Z-01202 Ochrona pracy. Elementy sterowania maszyn i urządzeń produkcyjnych. Wymagania ogólne.

Pomocne mogą być również normy europejskie: EN 50082-2, EN 55011, EN 61000-4.

### 2.4. ZAGROŻENIA MECHANICZNE

Zagrożenia tego typu występują w większości obrabiarek i innych urządzeniach technologicznych jako skutek ruchów wirujących (tarcza) lub posuwowych (taśma) narzędzia oraz ruchu obrotowego przedmiotu (o ile jest wykonywany). Problem sprowadza się do stosowania osłon i zabudowy stref zagrożenia oraz blokad otwarcia w trakcie realizacji procesu. Tych przypadków dotyczy norma:

- PN-83/Z-82001 Ochrona pracy. Osłony mechaniczne maszyn i urządzeń. Ogólne wymagania.

Przyczyną zagrożeń mechanicznych mogą być również wszelkiego rodzaju podajniki lub manipulatory - zwłaszcza automatyczne.

### 2.5. ODPADY

Obrabiarka powinna być tak zaprojektowana aby wyeliminować lub ograniczyć do minimum wszelkiego rodzaju wycieki medium (szczególnie roztworu  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). Powinna zapewniać bezpieczne usuwanie szlamu i resztek z procesów obróbki w sposób przyjazny dla środowiska. Procesy elektroerozyjnego stykowego przecinania nie wywołują na szczęście zagrożenia pożarowego, a stosowane w nich media nie powodują przyspieszonej korozji urządzeń ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  to klasyczny pasywator korozji). Cząstki metali lub elektrolitu, nawet w przypadku niekontrolowanego przedostania się do środowiska nie są w stanie dokonać jakichkolwiek poważniejszych szkód. Problemem jest

natomiast zasychanie elektrolitu krzemowego na wszystkich powierzchniach, z którymi się zetknie w postaci charakterystycznego białego osadu. Tendencja do twardnienia i zasychania sprzyja nie rozprzestrzenianiu się ewentualnych zanieczyszczeń. Jest natomiast kłopotliwa z punktu widzenia eksploatacji i obsługi.

### 3. PODSUMOWANIE

Przedstawione uwagi dotyczące ekologicznych aspektów procesów elektroerozyjnego stykowego przecinania materiałów metalicznych (przewodzących prąd) nie wyczerpują bogatej problematyki w tym zakresie. Zastosowane częściowo w zbudowanych obrabiarkach będą obiektem dalszych rozważań, poszukiwań i zainteresowania oraz obserwacji.

Problemy leżące na styku techniki i ekologii nabierają obecnie innego wymiaru. Wymagają badań i wypracowania szczegółowych rozwiązań konstrukcyjnych bezpiecznych dla obsługi i środowiska oraz sposobów oceny tych rozwiązań. Zadanie to musi być podjęte w praktyce o ile sami nie chcemy wyeliminować się z rynku.

Wyzwanie to dotyczy w zasadzie wszystkich technologii erozyjnych oraz elektroerozyjnych.

### LITERATURA

- [1] Chuchro M., Czekał J., Zybura-Skrabalak M.: Wybrane zagadnienia bezpiecznej eksploatacji obrabiarek elektrochemicznych. Mat. V Konf. EM '97 (Electromachining), Bydgoszcz-Golub Dobrzyń, 1997.
- [2] Dobaj E.: Maszyny i urządzenia spawalnicze. WNT, Warszawa 1998, II wyd.
- [3] Dyrektywa europejska 73/23/EEC Sprzęt niskiego napięcia. Tekst polski, wyd. Biuro współpracy, Warszawa 1997.
- [4] Dyrektywa europejska 89/336/EEC Kompatybilność elektromagnetyczna. Tekst polski, wyd. Biuro współpracy, Warszawa 1997.
- [5] Kowalski S., Wieczorowski K.: Czynniki fizykochemiczne w obróbkach erozyjnych oraz elektroerozyjnych i ich wpływ na otoczenie. Mat. XV Międzyn. Konf. „Inżynieria procesowa w ochronie środowiska”, Uniwersytet Opolski, Opole-Jarnołtówek 1998.
- [6] Kowalski S., Wieczorowski K.: Wpływ czynników fizykochemicznych w procesie obróbki erozyjnej i elektroerozyjnej na środowisko i obsługę urządzeń. Mat. Europejskiego Forum Ekologicznego EEF '98, Barlinek 1998.
- [7] Mielnicki W., Woda W., Zachorowski J., Siudyła G.: Problemy bezpieczeństwa pracy i ochrony środowiska w użytkowaniu obrabiarek elektroerozyjnych. Prace IOS, s. Referaty, nr 444, IOS Kraków 1999.
- [8] Oczos K.E.: Kształtowanie materiałów skoncentrowanymi strumieniami energii. Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1988.
- [9] PN-EN 50063. Wymagania bezpieczeństwa dotyczące budowy i instalowania urządzeń do zgrzewania rezystancyjnego oraz procesów pokrewnych.

- [10] PN-EN 60974-1: 1997, PN-IEC 974-1. Wymagania bezpieczeństwa dotyczące urządzeń do spawania łukowego. Spawalnicze źródła energii.
- [11] Pr PN-ISO 5826 Transformatory do zgrzewarek rezystancyjnych. Ogólne wymagania odnoszące się do wszystkich transformatorów.
- [12] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 1 grudnia 1989 r. (Dz.U. z 22 czerwca 1995 r. Nr 69, poz. 351) w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy.
- [13] Smolentsev V.P. (redakcja): Elektrofiziceskije i elektrochimiceskie metody obrabotki materialov, t.1 i 2. Izd. Wyssaja Skola, Moskva 1983.
- [14] Styp-Rekowski M.: Recykulacja technicznych płynów obróbkowych. Materiały VI Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Recykulacja w bułowie maszyn”, Bydgoszcz 1996.

## ECOLOGY OF ROUGH CONTACT CUTTING-OFF BASED ON THE ANODE-MECHANICAL CUTTING

### Summary

The present paper reports on the ecology factor of rough electro-discharge anode-mechanical cutting-off and of other related contact processes affecting a design of technological equipment and peripherals, operation safety and working environment. There discussed the recycling of by-products and suggested some practical guidelines. Finally the paper calls for adjusting the requirements to the EU Directives and EN and PN standards.

Key words: electro-discharge machining, cutting, ecology, safety



## COMPUTER SIMULATION OF ELECTROCHEMICAL SINKING PROCESS

Jerzy Kozak<sup>1,2</sup>, Kamlakar P. Rajurkar<sup>2</sup>, Sławomir Malicki<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Wydział Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej,  
Zakład Obróbek Wykańczających i Erozyjnych,  
al. Niepodległości 222, 00-663 Warszawa,

<sup>2</sup>University of Nebraska, 175 Nebraska Hall,  
Lincoln, NE 68588-0518 USA

<sup>3</sup>Daewoo Auto Polska,  
ul. Jagiellońska 88, 03-215 Warszawa

This paper presents the concept and prototype of a Computer Aided Engineering (CAE) system that can be used to solve different tasks of Electrochemical Machining (ECM), such as: tool-electrode design, selection of optimal machining variant and input machining parameters optimization. There presented the results of computer simulation of electrochemical sinking and examples of CAE-ECM System application.

*Key words:* electrochemical machining (ECM), electrode design, computer simulation

### 1. INTRODUCTION

Electrochemical machining (ECM) is an effective way of manufacturing complex shaped parts. It is used for a variety of materials, including those that are hard to machine by traditional metal cutting. The industrial practice covers various variants of ECM like: electrochemical sinking, ECM with numerically-controlled tool electrode movement, ECM with orbiting tool electrode, pulse ECM, electrochemical smoothing, electro-chemical deburring, all of them are characterized by a high efficiency and lack of wear of tool electrode. Moreover, surface of work piece machined by any of ECM processes is of high quality and remains stress-free; therefore, the application of ECM for production of dies, airfoils and other parts of turbine and high compression engines, medical implants, parts for electronic and military industries, to mention just a few, is well justified [5].

Industrial practices in ECM have revealed some problems impeding its further development and wider acceptance by industrial users, including prediction and control of the local interelectrode gap distribution (and hence, the control of dimensional accuracy), along with the design of tool electrodes for complex work piece shapes and optimization of process, are the major problems encountered by ECM users.

Although a significant amount of research has been done in the electrochemical technology and several books [3, 5] and trade publications are available, it is often difficult to make use of the research results and published data for production processes as

the resources are not consolidated, not easily available to the industrial user and often user-unfriendly and, therefore, the selection of ECM parameters and tool design still relies very much on the input by the human expert based on his personal knowledge and experience. Thus, the tool-electrode design and the process of ECM parameter selection are subjective and do not necessarily lead to a choice of optimum parameters. Very often, in order to achieve a desired output, labour- and time-consuming trial and error method has been used to adjust the shape of tool and set of parameters, however, due to high costs of such approach, research centres and different companies have been trying to develop means to reduce such costs and lead-time to production, including the one which can be applied at the earliest stages of ECM process design is computer simulation.

In ECM, there is no physical contact between electrodes (tool and workpiece). Shape of workpiece after ECM, depends on geometry of tool electrode as well as on a final gap between tool and workpiece.

The final gap ( $S$ ) distribution depends on tool electrode shape, kinematics of tool electrode, electrical and hydrodynamic parameters in interelectrode gap during machining and on a form of basic characteristics of anodic dissolution for a given material-electrolyte arrangement.

As electrochemical dissolution proceeds, the tool electrode-cathode can be fed mechanically towards the workpiece-anode in order to maintain the machining action. Under these conditions, the inter-electrode gap width gradually tends to a steady-state value, and a shape, complementary to that of the cathode-tool, is reproduced approximately on the anode-workpiece.

The main objective of ECM is to achieve the required shape of workpiece within a given tolerance on the shape and dimensions. The tasks relating to this purpose can be reduced directly (or indirectly) to a problem of searching for a boundary of the area within which the machining, i.e. to a value boundary problems (moving boundary problem, free boundary problem or inverse boundary problem). Depending on which the electrode surface is to be determined all tasks can be divided into two groups:

1. Tasks in which for a known shape of the tool electrode and known condition of machining, the evolution of a shape of workpiece surface has to be determined,
2. Tasks in which the tool electrode shape is searched for, which ensures obtaining the required shape of the workpiece.

The first category of the problems is encountered in the analysis of ECM accuracy. The tasks from the second category mainly deal with the tool electrode design and most frequently are encountered in practice.

Industrial practices in ECM have revealed some problems impeding its further development and wider acceptance by industrial users, including prediction and control of the local gap width distribution (and hence, the control of dimensional accuracy), along with the design of tool electrodes for complex workpiece shapes and optimization of process, are the major problems encountered by ECM users.

The optimization and tool - electrode design is carried out using ECM process models and computer simulation. Software for the computer-aided CAE-ECM covers basic manufacturing problems ECM, has been developed by the Warsaw University of Technology [1], and now it is verified by the Research Centre of Non-traditional Manufacturing at UNL.

The paper presents main features of process simulation module of the ECM sinking as well as examples of results of simulation by CAE-ECM System.

## 2. SOFTWARE MATHEMATICAL MODEL

The main task of the electrochemical shaping, regardless of variant, is to calculate thickness distribution of the material removed on the anode-workpiece surface after a time step used in numerical calculations, which is determined by current density distribution in the gap. In particular, a medium of varying electrical conductivity, with complex processes on the electrode surfaces and with shape change of machined surface throughout machining. Since electrolyte properties depend on temperature and gas phase concentration (mainly on concentration of generated during machining hydrogen), whose distributions depend on the velocity and pressure fields as well as on current density, ECM processes have to be described by a set of mass, heat and electric charge transfer equations.

Relations between main factors occurring during ECM are shown in a diagram (Fig. 1). Since properties of electrolyte depend on temperature and gas phase concentration (mainly on the concentration of machining-generating hydrogen), whose distributions depend on the velocity and pressure fields as well as on current density, ECM processes have to be described by a set of mass, heat and electric charge transfer equations. In the CAE-ECM system, also is reported in [2, 4], temperature ( $T$ ) distribution and void gas fraction ( $\beta$ ) are calculated for direction along the path of electrolyte flow as well as in direction normal to flow. Assumptions referred to modelling can be found in [4]. As a result, current density ( $i$ ) distribution can be estimated with a much higher accuracy, which has a tremendous impact on tool design process and work piece shape change estimation. Similarly, a more accurate calculations of ( $T$ ) and ( $\beta$ ) distributions allow to estimate limiting speed of machining above which ECM process becomes unstable which, in turn, leads to critical states with electrical discharges.

As mentioned above determination of these distributions is connected with solution of the system of differential equation with non-linear conditions on moving boundaries. Depending on the mathematical model used i.e. their accuracy, these equations remain partial or ordinary (Fig. 1).

## 3. ECM PROGRAMME

The ECM programme is based on multithread structure which enables a parallel simulation of many processes for different input data. During simulation of the process, each window, presenting graphically the change of the shape, is attended by a separate process responsible for the calculation and data display.

In order to start the simulation, the user shall open windows with processes (maximum 10). The programme requires definitions of physical parameters of the process and the beginning shape of tool-electrode and workpiece-electrode or demanded shape of surface in case of designing workpiece-electrode.

All parameters must be defined separately for each window. The ECM programme enables designing of the beginning shape of both electrodes as a sequence of functions or by giving the points. In case the shape of electrodes is given by points – interpolation of spline functions is applied. The window for given electrodes contains options of saving designed shape of electrode or getting the shape from database.

Applying structures of data connected with designed workpiece-electrode and tool-electrode can be made by choosing the name of function from database and pressing the



button "Put to the process". Button "Put to all" applies shapes of electrodes to all opened windows.

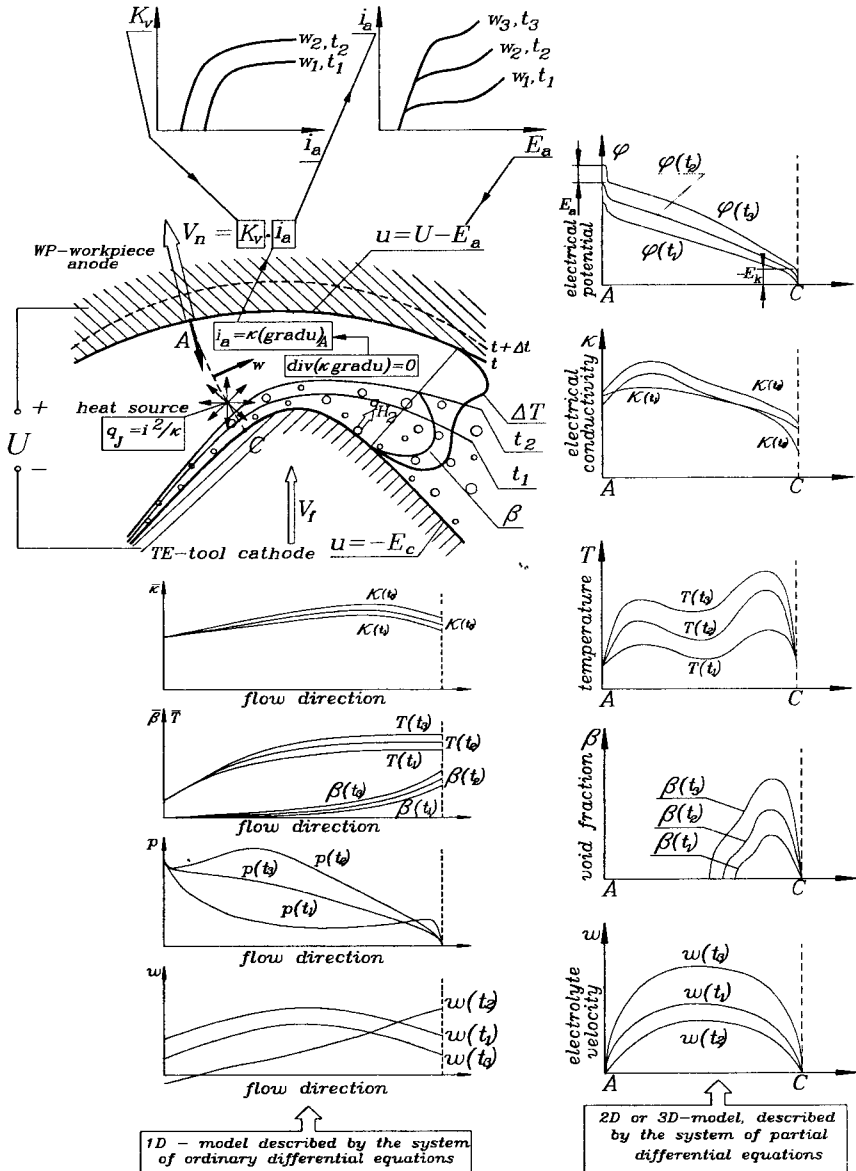


Fig. 1. Schematic diagram of the relationships in unsteady state of ECM process

Beside input data connected with physical parameters of modelling, programme gives the possibility of establishing (also during simulation process) of the speed and preciseness of presented graphics connected with time step. In case of omitting such parameters, programme uses default data. Buttons responsible for graphics presentation (start, pause, next step, previous step, that enable more precise analysis of shape evolu-

tion), are situated on the tool strip in the main window. After completed modelling, the user can get the display of output data from hand menu of the process window.

The programme simulating the electrochemical sinking process is integrated with database, which gives a possibility to save a full set of physical parameters, shapes of electrodes and settings of presentation, see Figures below.

The 'Parameters' window is divided into two columns of input fields. The left column contains parameters such as  $\alpha$ ,  $\Delta h \cdot T$ ,  $B_{gw}$ ,  $C_p$ ,  $R_{ak}$ ,  $d_i$ ,  $d_r$ ,  $d_{Ta}$ ,  $E$ ,  $G_{sw}$ ,  $J_k$ ,  $Kappa$ , and  $K_v$ . The right column contains parameters such as  $\nu$  (Viscosity),  $Mh$ ,  $\alpha_{magn}$ ,  $\gamma_k$ ,  $x_0$ ,  $m$  (magnitudes),  $T_0$ ,  $T_d$ ,  $T_a$ ,  $T_k$ ,  $U$ ,  $V_f$ , and  $w_0$ . Each field has a numerical value and a unit label. On the right side of the window, there are buttons for 'OK', 'Cancel', 'Default', 'W0', and 'Function Kv'.

Fig. 2. Window for physical parameters of the process

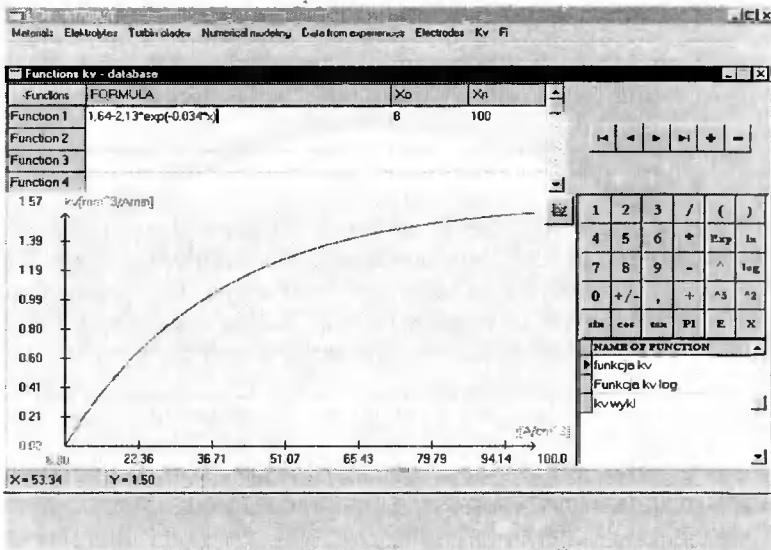


Fig. 3. Window with database of function Kv

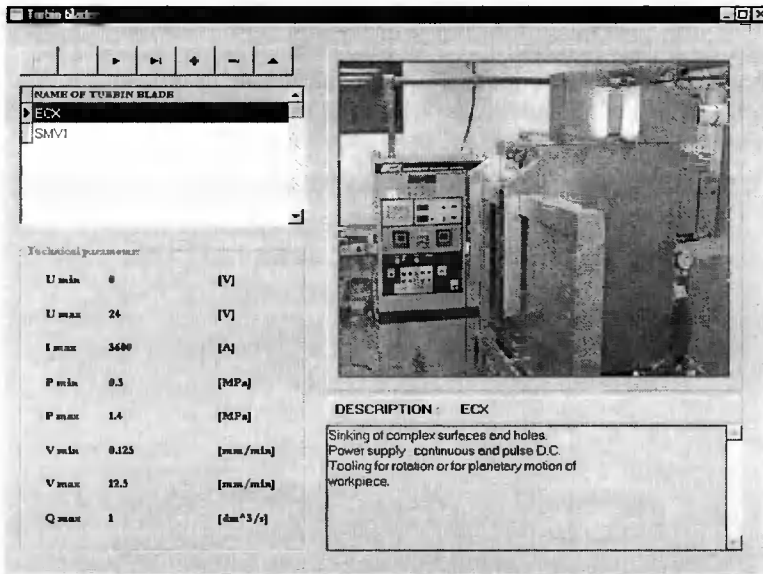


Fig. 4. Database of turbine blades: machine tool window (EC machine tool used by the Centre for Non-traditional Manufacturing and Research at UNL)

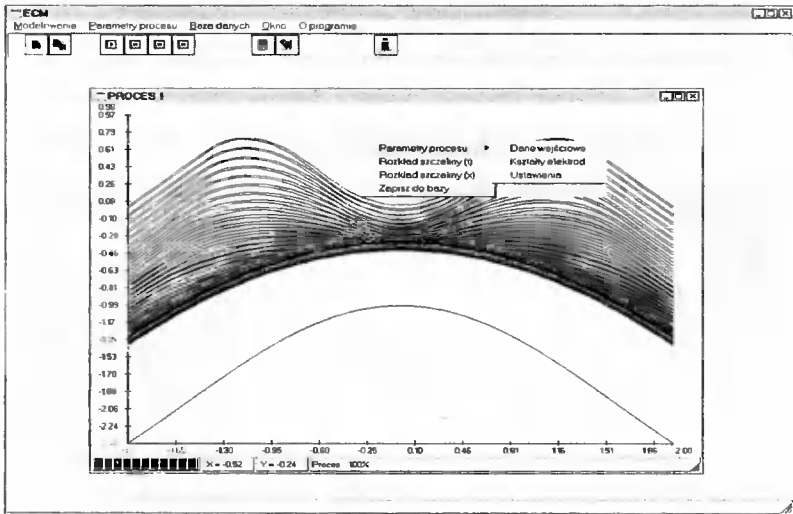


Fig. 5. Evolution of the shape of the workpiece during ECM with vibrating tool electrode

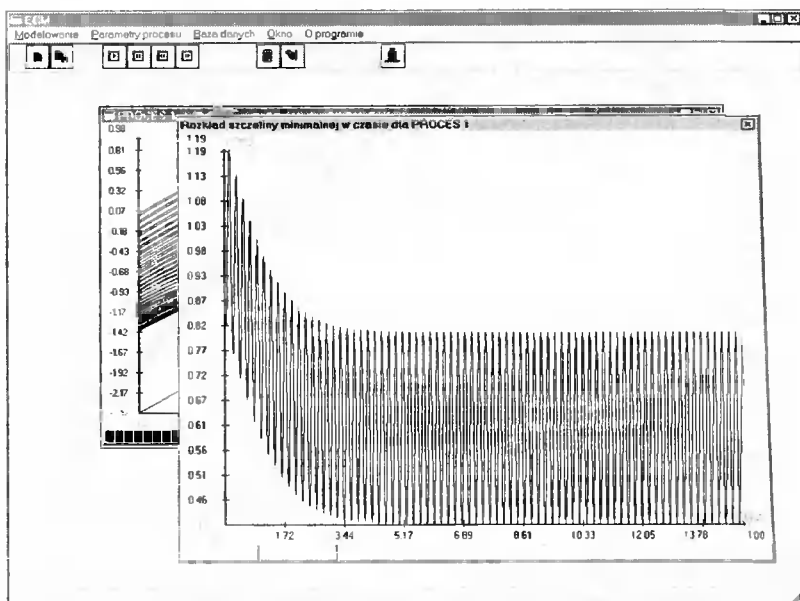


Fig. 6. Output of the change of frontal gap size during ECM with vibrating tool electrode

Button responsible for saving is situated on the tool strip. Saving is also possible by using the hand menu. Database window can be opened with the button situated on the tool strip.

Output data for modelling or workpiece-electrode design can be saved and displayed as charts or tables with distribution of the interelectrode gap, current density, static pressure, void fraction average temperature and temperature across and along the gap. Several windows connected with input and output data are illustrated in Figs. 2-6.

#### 4. SELECTED RESULTS OF ECM SINKING SIMULATION

Examples of simulation of ECM shaping of airfoil are shown in Fig. 7 where the subsequent graphs of profiles illustrate an anode-work piece shape evolution in time [2].

The simulation was carried out at feed rate  $V_f = 0.8$  mm/min,  $U = 13$  V,  $E = 3$  V,  $\kappa = 10$  A/Vm,  $K_V = 2$  mm<sup>3</sup>/A min,  $\eta$  (H<sub>2</sub>) = 0.1,  $\rho_c C_p = 4 \cdot 10^6$  J/K kg. The gap size distribution without electrolyte property changes, i.e. under "ideal" conditions of ECM, is shown in Fig. 8.

In practice, ECM conditions are far from the ideal process of electrochemical shaping. In consequence, the material removal rate is distributed over the anode-workpiece surface in a different way than the distribution in "ideal" process, and the machined part takes on a profile from that found in mathematical modelling and theoretical design.

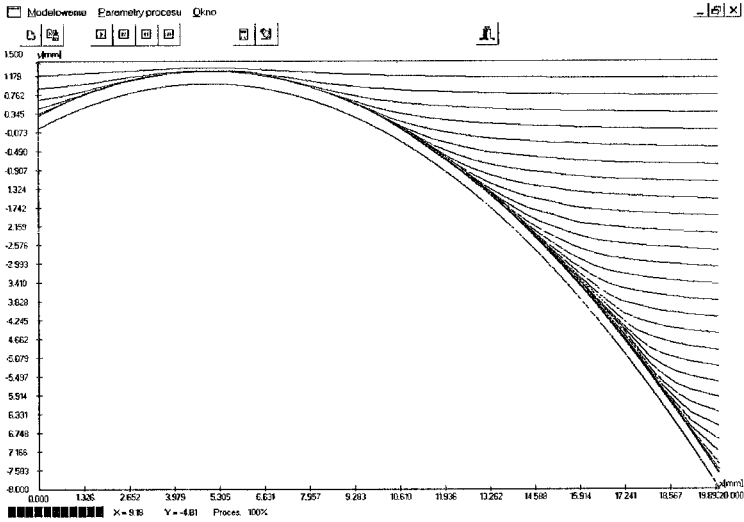


Fig. 7. Simulation of airfoil shaping

This difference can be estimated from variation in the equilibrium gap ( $S_f$ ) along the electrolyte flow direction. A more accurate calculation needed simulation of the total shaping process, including heat and mass transfer, as well as anodic dissolution characteristics. Some results of this simulation with above-mentioned conditions are shown in Fig. 9 and Fig. 10. Figure 9 illustrates the effect of hydrogen and heat generation on the gap size distribution.

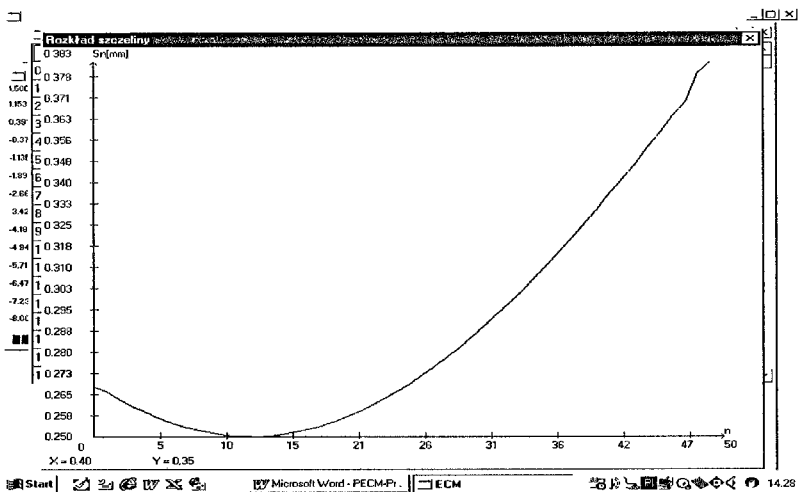


Fig. 8. Distribution the gap size in steady state ECM without the influence of the heat and hydrogen generation (i.e. from the model of ideal ECM process)

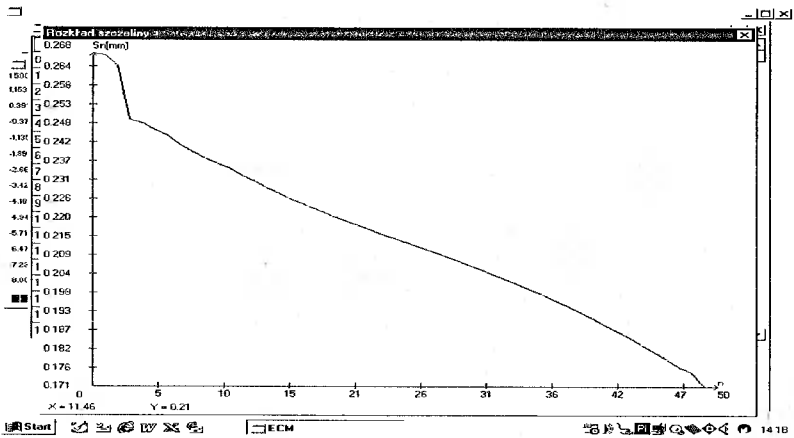


Fig. 9. Plot of distribution of the gap size in steady state of ECM, including property changes in the electrolyte due to heating and gas generation

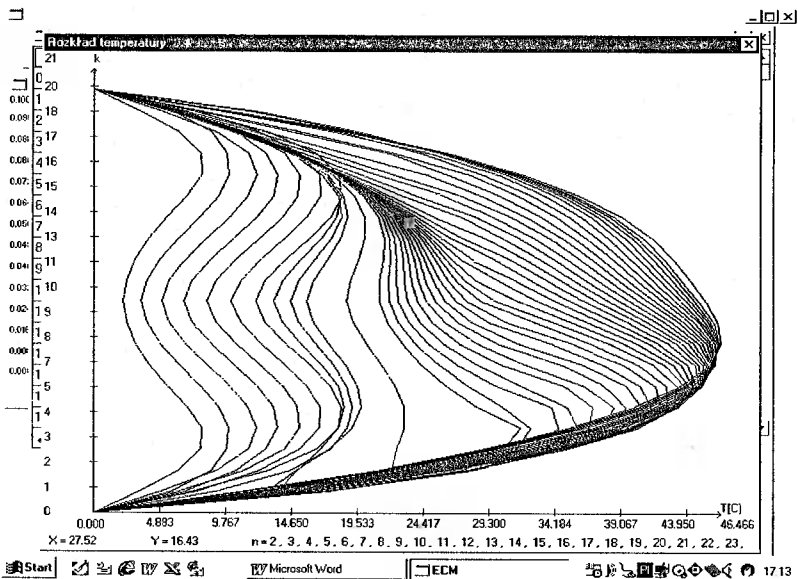


Fig. 10. The steady distribution temperature in the gap size  $S = 0.1$  mm ( $U = 9$  V,  $E = 3$  V, flow rate 6 m/s, electrolyte: 12 %  $\text{NaNO}_3$ )

In the conditions described, the heat and gas evolution diametrically changed the course of the gap distribution.

The minimum practical tool gap size, which may be employed, however, is constrained by the onset of unwanted electrical discharges. These short electrical circuits reduced the surface quality of the workpiece, and led to electro-erosive wear of the tool-electrode, and usually, they prevent the machining progress. Investigations into electrical discharges in an electrolyte reveal that the probability of electrical breakdown gap is

a function of the evolution of gaseous-vapour layers and passivation of the work surface. Intense heating, hydrogen generation sometimes choking phenomena and cavitation within the gap can lead to evaporation and subsequent gas evolution, and it is this gas which is believed to cause the onset of electrical discharge. The issue of heating of electrolyte remains of primary importance for the determination of the limit condition of ECM process. The distribution of mean temperature in the inter-electrode gap along the flow was determined using one-dimensional mathematical model of ECM process [1]. A further specification of temperature distribution was shown in [2, 3, 4]. Due to the heat exchange through electrodes as well as distribution of electrode, the temperature changes along the flow path as well as across the gap size.

The electrolyte temperature distributions across the gap width, at the different distances from the inlet electrolyte in ECM process with small inter-electrode gap size at  $S = 0.1$  mm is presented in Fig. 10. The one or two maximum temperatures that can be observed in proximity of electrodes are very important in ECM input parameter selection. The input parameters chosen should always be those with the maximum temperature of electrolyte never reaching its boiling point. One - dimensional model, in which only average values of  $(T)$  and  $(\beta)$  across the gap can be calculated, may not be accurate enough to properly estimate the maximum temperature. For example, in Fig. 10, the maximum average increment of temperature is  $\Delta T_{av} = 32$  °C, in this time, maximum temperature, as shown in Fig. is  $\Delta T_{max} = 46.47$  °C.

The two maxims that can be observed in Fig. 10 in the proximity of electrodes are very important in ECM input parameter selection. The input parameters chosen should always be those with the maximum temperature of electrolyte never reaching its boiling point. One - dimensional model, in which only average values of  $(T)$ , and  $(\beta)$  across the gap can be calculated, may not be accurate enough to properly estimate the maximum temperature. The application of input parameters from simulation that underestimated electrolyte temperature for actual machining may lead to short-circuit between electrodes and, consequently, damage the tool and workpiece.

Our practice and experimental verification of such calculation show that we can reach very good agreement calculated shapes with experiment by the variation of the cathode-tool surface [4].

The practice of cooperation with industry shows that the described method of ECM modelling in the vicinity of blade edges is an effective instrument of ECM technology accuracy enhancement.

## REFERENCES

- [1] Davydov A.D., Kozak J.: High Rate Electrochemical Shaping. Moscow 1990.
- [2] Kozak J.: Mathematical Models for Computer Simulation of Electrochemical Machining. Processes Journal of Materials Processing Technology, Vol.76, 1-3, 1998.
- [3] Kozak J.: System for Computer-aided Electrochemical Shaping and Finishing Processes. Proc. of 3rd Int. Scientific Coll. CAE Techniques, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszow 1997.
- [4] Kozak J., Dabrowski L., Łubkowski K., Rozenek M., Sławinski R.: CAE-ECM System for Electrochemical Technology of Parts and Tools. Proc. 15th Int. Conf. on Computer-Aided of Production Engineering, Univ. Of Durham, Durham 1999.

- [5] Rajurkar K.P., Zhu D., McGeough J.A., Kozak J., De Silva A.: New Developments in Electro-Chemical Machining. Annals of the CIRP, Vol. 48, 2, 1999.

## SYMULACJA KOMPUTEROWA DRAŻENIA ELEKTROCHEMICZNEGO

### Streszczenie

W referacie przedstawiono program komputerowy dla symulacji procesu kształtowania elektrochemicznego. Omówiono główne jego elementy oraz podano przykładowe wyniki jego zastosowania.

Słowa kluczowe: obróbka elektrochemiczna (ECM), projektowanie elektrody, symulacja komputerowa

### ACKNOWLEDGMENTS

The support of the State Committee for Scientific Research (Poland) and The State of Nebraska (Research Initiative Fund) is gratefully acknowledged.





## ANALIZA ENERGOCHŁONNOŚCI OBRÓBK ELEKTROCHEMICZNEJ CIĄGŁEJ I IMPULSOWEJ

Jerzy Kozak<sup>1,2</sup>, Marek Rozenek<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Nebraska, 175 Nebraska Hall,  
Lincoln, NE 68588-0518 USA

<sup>2</sup>Wydział Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej,  
Instytut Technologii Maszyn,  
al. Niepodległości 222, 00-663 Warszawa

Przedstawiono zagadnienia związane z zużyciem energii elektrycznej w procesie roztwarzania anodowego przy kształtowaniu elektrochemicznym z zastosowaniem prądu stałego i impulsowego. Podano metodykę wyznaczania warunków obróbki ze względu na minimalizację energochłonności oraz omówiono wpływ kształtu impulsu napięcia roboczego na energochłonność właściwą. Omówiono wyniki badań doświadczalnych obróbki impulsowej weryfikujących wyniki uzyskane z symulacji komputerowej.

*Słowa kluczowe:* energochłonność, obróbka elektrochemiczna-ciągła (ECM) i impulsowa (PECM)

### 1. WSTĘP

Jedną z negatywnych cech obróbki elektrochemicznej jest stosunkowo duża energochłonność usuwania materiału drogą roztwarzania anodowego. Wywołane jest przede wszystkim dużymi stratami energii przy przepływie prądu przez elektrolit, prowadzącymi do jego nagrzewania. Inną przyczyną, lecz mniej znaczącą, jest konieczność jonizacji materiału obrabianego przy jego przejściu do elektrolitu - atom po atomie.

Jak wiadomo zużycie energii w danym sposobie kształtowania wyrobu oceniane jest energochłonnością właściwą e zdefiniowaną w obróbce ubytkowej, jako ilość energii niezbędnej do usunięcia jednostki objętości materiału obrabianego. W kształtowaniu przyrostowym (np. w szybkim prototypowaniu - Rapid Prototyping) będzie to ilość energii potrzebnej do wytworzenia jednostki objętości wyrobu.

Wartości energochłonności właściwej w przypadku ECM są rzędu setek  $J/mm^3$  (przykładowo przy  $U = 15V$  i  $k_v = 1,5 mm^3/Amin$  energochłonność wynosi  $e = 600 J/mm^3$ ). Dla porównania energochłonność przy toczeniu wynosi:  $e = 1,7 \div 2,5 J/mm^3$ , szlifowaniu:  $50 \div 150 J/mm^3$ , obróbce laserowej:  $(2,8 \div 4,7) 10^4 J/mm^3$ , obróbce elektroerozyjnej  $200 \div 3500 J/mm^3$ .

Z tych względów obniżenie energochłonności kształtowania elektrochemicznego ma istotne znaczenie techniczno – ekonomiczne, co uwarunkowało podjęcie badań w tym zakresie, a których zasadnicze wyniki przedstawia niniejszy referat.

## 2. ENERGOCHŁONNOŚĆ WŁAŚCIWA OBRÓBK ELEKTRO-CHEMICZNEJ CIĄGŁEJ (ECM)

Zależność na energochłonność właściwą w tym procesie uzyskuje się z ogólnej definicji:

$$e = \frac{dW}{dV} \quad (1)$$

W procesie ECM zużycie energii w czasie  $dt$  wynosi:  $dW = U \cdot I \cdot dt$ , natomiast objętość roztworzonego anodowo materiału równa jest  $dV = k_v \cdot I \cdot dt$ , stąd po podstawieniu do zależności (1) otrzymujemy znany z podstaw ECM wzór:

$$e(\text{ECM}) = \frac{U}{k_v} \quad (2)$$

W przypadku elektrolitów, w których współczynnik obrabialności elektrochemicznej zmienia się nieznacznie, np. w elektrolitach aktywnych jak NaCl, energochłonność jest wprost proporcjonalna do napięcia roboczego. Stąd jej obniżenie, można uzyskać jedynie przez obniżenie napięcia  $U$ . Przy ECM z dosuwem elektrody roboczej ze stałą prędkością  $V_f$ , minimalna wartość napięcia uwarunkowana jest dopuszczalną, najmniejszą grubością szczeliny ustalonej:

$$S_f = \kappa \cdot k_v \cdot \frac{U - E}{V_f} \quad (3)$$

gdzie:

$\kappa$ ,  $E$  - odpowiednio, elektrycznym przewodnictwem właściwym elektrolitu oraz polaryzacją sumaryczną elektrod.

Po wyznaczeniu minimalnej grubości  $S_f$  (stanowi to odrębne zagadnienie, m.in. uwarunkowane wymogami stabilności procesu obróbki) lub jej założeniu, minimalna wartość energochłonności właściwej pojawi się w przypadku zastosowania napięcia roboczego:

$$U = E + \frac{V_f}{\kappa \cdot k_v} \cdot S_f^{\min} \quad (4)$$

Przy zastosowaniu elektrolitów pasywnujących, w których wartość  $k_v$  jest zależna od gęstości prądu  $i$  (rys. 1) zmienia się również i energochłonność procesu. Na rys. 1 przedstawiony jest typowy przebieg funkcji  $k_v = k_v(i)$  dla tego typu elektrolitów, która dla obróbki stali NC10 w elektrolicie 13%  $\text{NaNO}_3$  może być aproksymowana zależnością:

$$k_v = 1,64 - 2,13 \cdot \exp(-0,034 \cdot i) \quad (5)$$

przy czym  $k_v$  wyrażony jest w  $\text{mm}^3/\text{Amin}$ , natomiast  $i$  w  $\text{A}/\text{cm}^2$ .

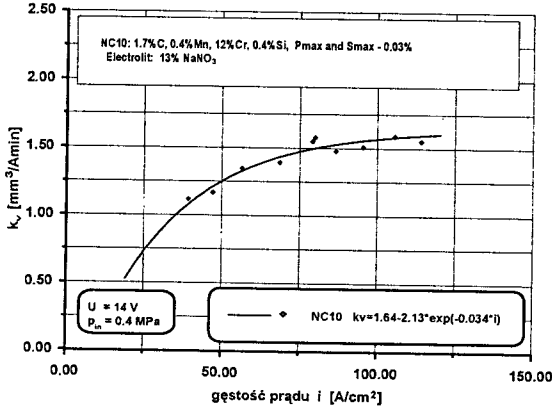
Przeanalizujmy wpływ napięcia roboczego na energochłonność dla tego przypadku, co wymaga wyznaczenia funkcji  $k_v = k_v(U)$ .

Z praktyki zastosowań ECM wiadomo, że profil elektrody roboczej uwarunkowany jest w dużym stopniu, grubością szczeliny ustalonej, stąd przy ewentualnych zmia-

nach warunków obróbki, należy dążyć do utrzymania przyjętej wartości  $S_f$ , gdyż od tego zależy uzyskiwana dokładność obrobionego kształtu.

Z tych względów przy transformacji funkcji  $k_v(i)$ , dla przedstawienia jej w funkcji napięcia roboczego zakłada się stałość w procesie nominalnej grubości szczeliny  $S_f$ , dla której projektowano elektrodę roboczą. Wówczas zmienną  $i$  w funkcji  $k_v$  zastępuje się wyrażeniem:

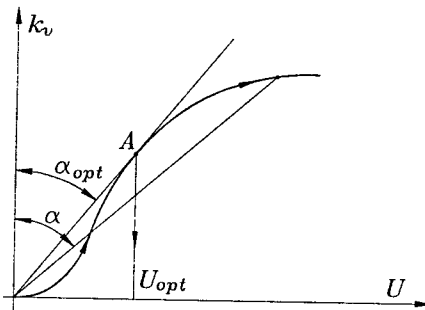
$$i = \kappa \cdot \frac{U - E}{S_f} \tag{6}$$



Rys. 1. Krzywa  $k_v = k_v(i)$  dla stali NC10

Przebieg funkcji  $k_v = k_v(U)$  pokazany jest na rys. 2, z którego wynika prosty sposób wyznaczenia napięcia optymalnego ze względu na minimalizację energochłonności. Uwzględniając, że  $e = U/k_v$  widzimy, że wartość energochłonności właściwej dla danego napięcia równa jest tangensowi kąta  $\alpha$ , zaznaczonego na rys. 2.

Minimalną wartość osiąga w punkcie styczności prostej poprowadzonej z początku układu współrzędnych ( $U, k_v$ ) do krzywej  $k_v = k_v(U)$ , tj w punkcie A na rys. 2., dla którego odcięta przedstawia wartość napięcia optymalnego  $U_{opt}$ .



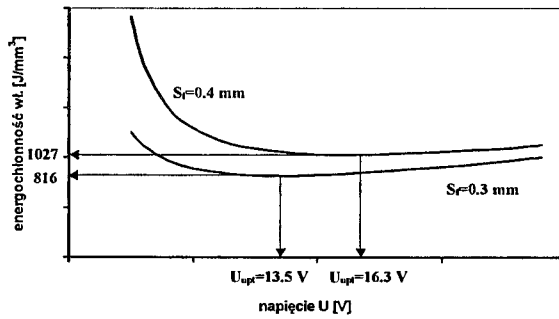
Rys. 2. Interpretacja graficzna energochłonności

W przedziale zmian napięcia  $U < U_{opt}$  a więc na lewo od punktu A, ze wzrostem napięcia energochłonność spada, natomiast po przekroczeniu napięcia optymalnego, tj. na prawo od pkt. A, przy powiększaniu napięcia energochłonność rośnie podobnie jak w przypadku elektrolitów aktywnych.

W przypadku znajomości funkcji aproksymującej  $k_v = k_v(U)$ , wartość  $U_{opt}$  wyznacza się z równania:

$$\frac{d}{dU} \left[ \frac{U}{k_v(U)} \right] = 0 \quad (7)$$

Na rys. 3 pokazane są przebiegi zmian energochłonności właściwej przy współczynniku obrabialności elektrochemicznej opisanej zależnością (6) dla obróbki z ustaloną szczeliną  $S_f = 0,3$  mm (krzywa 1) oraz  $S_f = 0,4$  mm (krzywa 2). Jak widać na wartość minimalnej energochłonności i napięcia optymalnego istotny wpływ wywiera grubość szczeliny  $S_f$ . Przykładowo, zwiększenie szczeliny z 0,3 mm na 0,4 mm wywołało wzrost minimalnej energochłonności z  $816 \text{ J/mm}^3$  na  $1027 \text{ J/mm}^3$ , a optymalnego napięcia z 13,49 V na 16,3 V.



Rys. 3. Zależność energochłonności właściwej od napięcia przy zachowaniu stałej szczeliny ustalonej

Zagadnienie komplikuje się, gdy w czasie obróbki powierzchni o złożonym kształcie w elektrolicie pasywującym wartość współczynnika obrabialności elektrochemicznej zmienia się na powierzchni. Z tych względów przy opracowywaniu oprogramowania dla symulacji komputerowej celowe jest wprowadzenie podprogramu obliczającego zużycie energii w czasie obróbki. Nie następuje to większych trudności, gdyż w czasie symulacji niezbędne są obliczenia rozkładu gęstości na obrabianej powierzchni, stąd łatwo jest wyznaczyć zmianę prądu całkowitego, a więc i energię zużywaną podczas wykonania danego kształtu.

### 3. IMPULSOWA OBRÓBKA ELEKTROCHEMICZNA (PECM)

Zastosowanie obróbki elektrochemicznej impulsowej (PECM) prowadzi nie tylko do podwyższenia dokładności i jakości powierzchni obrabianej, ale pozwala również na zmniejszenie energochłonności obróbki.

W obróbce elektrochemicznej impulsowej w czasie pojedynczego impulsu wyko-

nywana jest praca równa:  $W = \int_0^{t_p} U(t)I(t)dt$ , natomiast objętość usuniętego w tym czasie

materiału wynosi:  $V = \int_0^{t_p} k_v(i)I(t)dt$ , stąd energochłonność właściwa wyrazi się zależnością:

$$e = \frac{\int_0^{t_p} U(t)I(t)dt}{\int_0^{t_p} k_v(i)I(t)dt} \quad (8)$$

gdzie:

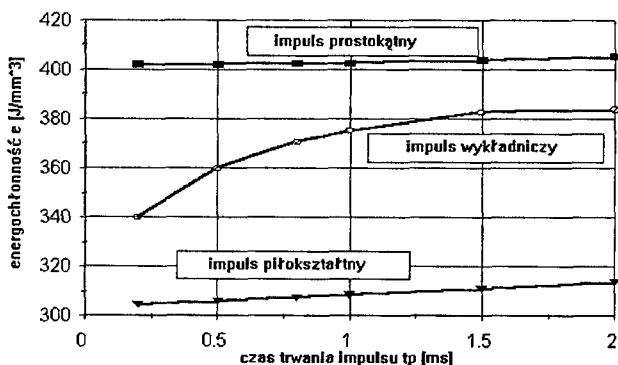
$U(t), I(t)$  - przebiegi napięcia i prądu w czasie impulsu.

Z zależności (8) wynika, że na wartość energochłonności  $e$  wpływają przebiegi napięcia  $U(t)$  i prądu  $I(t)$ , przy czym zmiana  $I(t)$  uwarunkowana jest zarówno kształtem impulsu napięcia, jak i zmianą elektrycznej konduktywności ośrodka w szczelinie międzyelektrodowej. To ostatnie jest wynikiem nagrzewania się elektrolitu oraz wydzielania fazy gazowej w czasie impulsu roboczego.

Z tych względów dla wyznaczenia energochłonności konieczne jest stosowanie obliczeń numerycznych przebiegu procesu PECM, a więc symulacji komputerowej. Stosowane modele matematyczne, które stanowiły podstawę dla opracowanego oprogramowania opisane zostały w pracach [1 - 4].

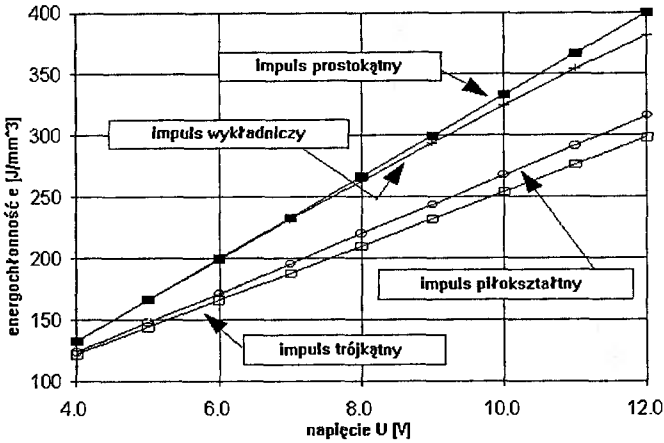
Wybrane wyniki symulacji dotyczące energochłonności przedstawiono na poniższych rysunkach.

Na rys. 4 przedstawiono przebiegi zmian energochłonności  $e(t_p)$  w funkcji czasu impulsu  $t_p$  dla różnych kształtów impulsu napięcia. Jak widać, energochłonność zależy w sposób istotny od kształtu impulsu, przy czym najmniejsze wartości  $e$  osiągane są dla impulsu piłokształtnego i trójkątnego. Wpływ czasu impulsu na energochłonność jest znacznie mniejszy.



Rys. 4. Wpływ czasu trwania impulsu  $t_p$  na energochłonność właściwą  $e$

Wpływ napięcia roboczego na energochłonność dla różnych impulsów przedstawiony jest na rys. 5.

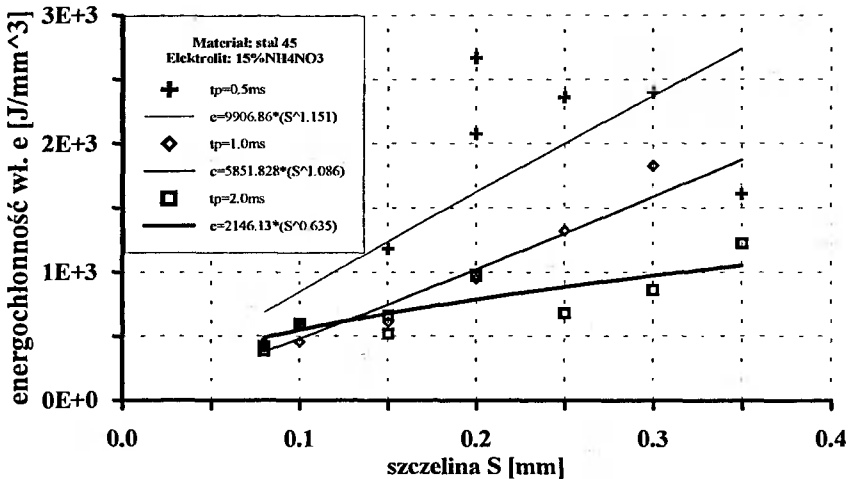


Rys. 5. Wpływ napięcia  $U$  na energochłonność właściwą  $e$

Jak wykazano wyżej energochłonność obróbki elektrochemicznej w istotny sposób zależy od przebiegu krzywej  $k_v$  (i), a więc od występującej gęstości prądu, co uzależnia  $e$  od grubości szczeliny. W przypadku PECM energochłonność zależy również od grubości szczeliny, co potwierdzają przeprowadzone badania doświadczalne.

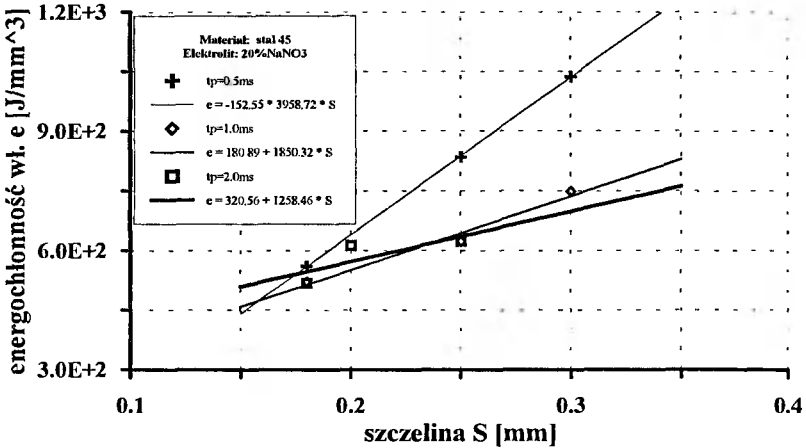
Podczas obróbki stali 45 w 15% wodnym roztworze  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (dla  $t_p = 0,5$  msec) przy szczelinie  $S = 0,08$  mm i napięciu  $U = 11$  V energochłonność wynosiła  $e = 423,8$   $\text{J/mm}^3$ , natomiast przy  $S = 0,15$  mm energochłonność wzrosła do  $862,4$   $\text{J/mm}^3$  (rys. 6).

Zjawisko to spowodowane jest spadkiem  $k_v$  wraz ze zmniejszaniem się gęstości prądu, która przy szczelinie  $S = 0,08$  mm wynosiła  $i = 88,5$   $\text{A/cm}^2$  ( $k_v = 1,54$   $\text{mm}^3/\text{Amin}$ ), a przy  $S = 0,15$  mm była równa  $i = 65,8$   $\text{A/cm}^2$  ( $k_v = 0,78$   $\text{mm}^3/\text{Amin}$ ).



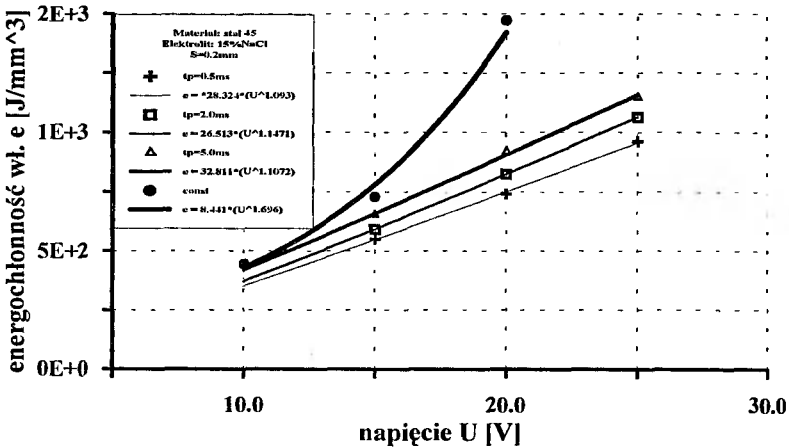
Rys. 6. Zmiany energochłonności właściwej  $e$  funkcji szczeliny  $S$  i czasu impulsu  $t_p$ , podczas obróbki stali 45 w 15% wodnym roztworze  $\text{NH}_4\text{NO}_3$

Na rys. 7 przedstawiono zależność energochłonności właściwej od szczeliny przy obróbce stali 45 w 20% NaCl. Charakter zmian jest podobny do przedstawionego na rys. 6, z tą różnicą, że w tym elektrolicie uzyskuje się zdecydowanie niższe energochłonności (dla wszystkich czasów impulsu).



Rys. 7. Zmiany energochłonności właściwej e funkcji szczeliny S i czasu impulsu  $t_p$  podczas obróbki stali 45 w 20% wodnym roztworze  $\text{NaNO}_3$

Na wykresach 8 i 9 przedstawiono zależność energochłonności właściwej od napięcia dla PECM. Obniżenie się  $k_v$  przy wzroście gęstości prądu i napięcia powoduje dodatkowe podwyższenie energochłonności.

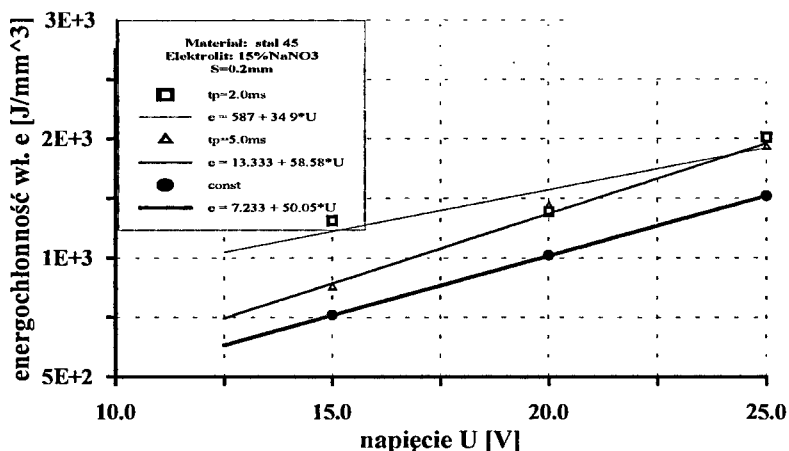


Rys. 8. Zmiany energochłonności właściwej e funkcji napięcia U i czasu  $t_p$  podczas obróbki stali 45 w 15% wodnym roztworze NaCl

W przypadku, gdy  $k_v$  zmienia się niewiele (np.: dla  $t_p = 0,5$  ms wynoszą  $0,06 \text{ mm}^3/\text{Amin}$  przy zmianie napięcia z  $U = 15 \text{ V}$  do  $U = 25 \text{ V}$ ) o wartości energochłonności decydują głównie przebiegi  $U(t)$  i  $i(t)$ .



Z rysunku 8 wynika, że energochłonność właściwa procesu jest mniejsza dla krótszych czasów trwania impulsu.



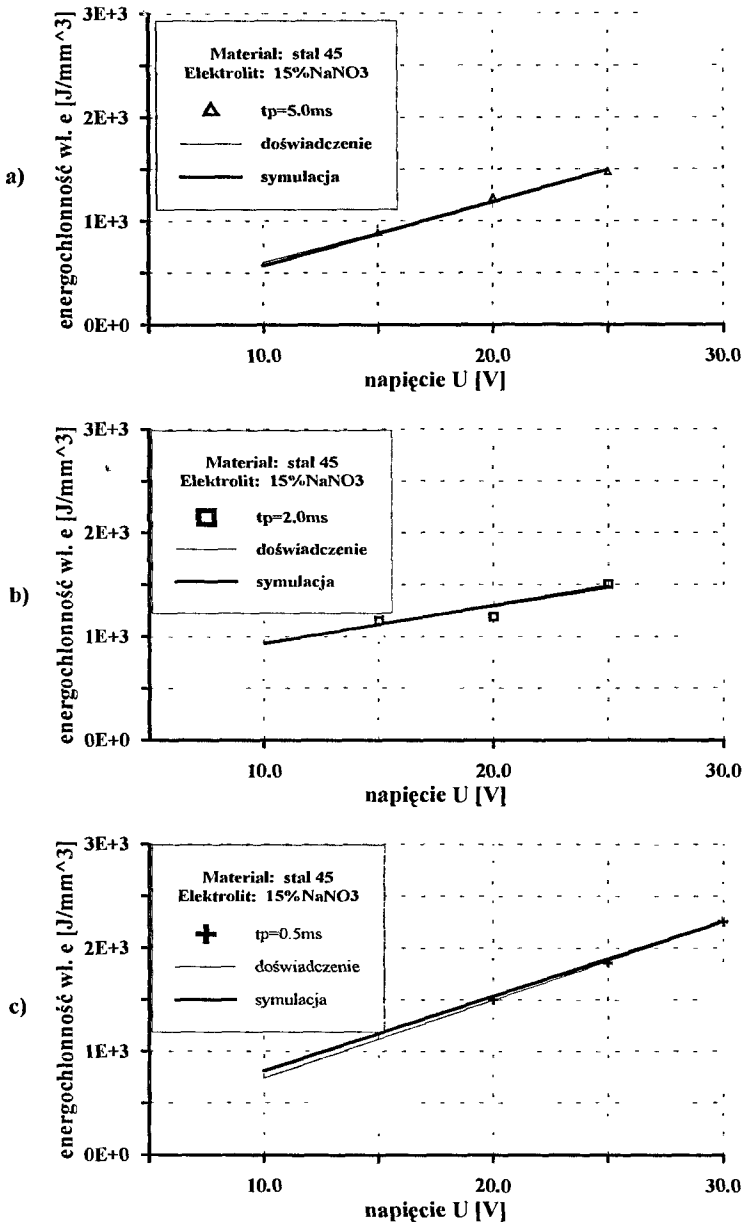
Rys. 9. Zmiany energochłonności właściwej  $e$  funkcji napięcia  $U$  i czasu  $t_p$ , podczas obróbki stali 45 w 15% wodnym roztworze  $\text{NaNO}_3$

W badanym zakresie napięć, podczas obróbki stali 45 w 15%  $\text{NaNO}_3$ , w wyniku mniejszych wartości  $k_v$  dla krótszych czasów impulsu energochłonność właściwa jest większa. Dla czasu impulsu  $t_p = 2$  ms (na skutek znacznego wzrostu  $k_v$  ze wzrostem napięcia, a co za tym idzie i gęstości prądu - rys. 9) wpływ napięcia na energochłonność jest zdecydowanie mniejszy w stosunku do  $t_p = 5$  ms oraz prądu ciągłego. W obróbce impulsowej poprzez zmniejszenie amplitudy napięcia, np. poniżej 10 voltów, można dokonać znacznego obniżenia energochłonności. Powinna być ona zdecydowanie mniejsza niż w przypadku obróbki prądem ciągłym.

Poniżej przedstawiono porównanie wyników uzyskiwanych z symulacji komputerowej w celu wyznaczenia energochłonności właściwej procesu PECM (rys. 10a,b,c) oraz wyników badań doświadczalnych. Dane wejściowe stosowane w symulacji uzyskane były z poprzedzających badań doświadczalnych, w których wyznaczono charakterystyki  $k_v(i)$  w warunkach PECM.

Przeprowadzone porównanie wykazało zadowalającą zgodność wyników z modelowania matematycznego z wynikami doświadczalnymi. Maksymalny błąd zawierał się w granicach  $8 \div 20$  % (w zakresie szczelin stosowanych w PECM) przy wyznaczeniu średniej prędkości roztwarzania oraz do 5 % przy energochłonności właściwej, co przy przyjętych założeniach do modelu matematycznego jest dobrym wynikiem.

Przedstawiona analiza energochłonności ECM i PECM wykazuje, że przez racjonalny wybór parametrów obróbki – wykorzystując symulację komputerową - możliwe jest obniżenie energochłonności technologii elektrochemicznej, co ma istotne znaczenie techniczno-ekonomiczne.



Rys. 10. Porównanie zależności energochłonności właściwej od napięcia dla eksperymentu i symulacji komputerowej przy obróbce stali 45 w 15 % NaNO<sub>3</sub>

## LITERATURA

- [1] Kozak J.: Kształtowanie powierzchni obróbką elektrochemiczną bezstykową (ECM), Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1976.
- [2] Rozenek M.: Obróbka elektrochemiczna krótkimi impulsami prądowymi. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 1994.
- [3] Rozenek M., Dabrowski L., Kozak J., Łubkowski K.: Computer Simulation of Electrochemical Machining with Different Voltage Pulse Shapes. Proceedings of 8<sup>th</sup> International Conference on Computer Aided Production Engineering CAPE-8, Edinburgh, UK 1992.
- [4] Rozenek M., Kozak J., Dabrowski L., Łubkowski K.: Numerical Analysis of Pulse Electrochemical Machining Process. Proceed. of the 4<sup>th</sup> Int. Scientific Colloquium on CAx Techniques'99, Germany 1999.

## ENERGY CONSUMPTION ANALYSIS IN CONTINUOUS AND PULSE ELECTROCHEMICAL MACHINING

## Summary

The present paper investigates the effect of basic electrochemical machining parameters, including pulse duration, pulse shape, voltage and gap width, on the energy consumption. Both theoretical and experimental results have been presented and compared.

Key words: energy consumption, continuous and pulse electrochemical machining

## PROBLEMY KSZTAŁTOWANIA MINIATUROWYCH ELEMENTÓW Z CIENKICH FOLII SPOSOBAMI OBRÓBKI ELEKTROEROZYJNEJ

Leszek Kudła

Wydział Mechatroniki Politechniki Warszawskiej,  
Instytut Inżynierii Precyzyjnej i Biomedycznej,  
ul. Chodkiewicza 8, 02-525 Warszawa

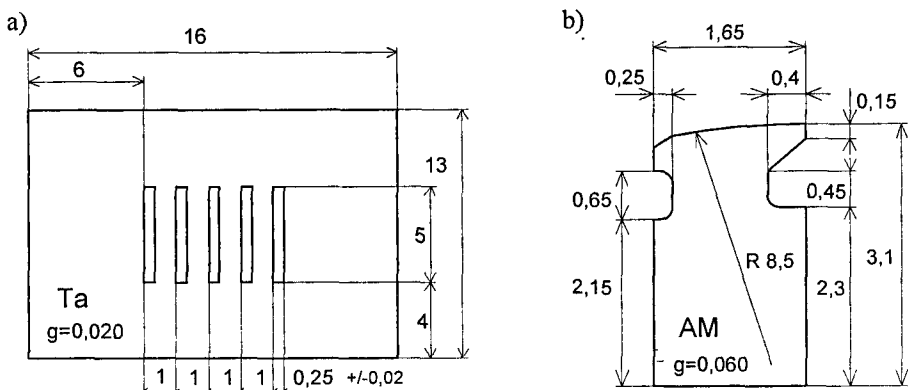
Obróbka elektroerozyjna miniaturowych elementów z cienkich folii powoduje powstanie dużych nierówności na krawędziach. Przyczyną jest niewystarczające odprowadzanie ciepła, które równocześnie może wywoływać zmiany w strukturze materiału. Ograniczenie tych zjawisk jest możliwe nie tylko poprzez zmniejszanie energii pojedynczego impulsu, lecz także w wyniku stosowania dodatkowych okładek z materiału o dobrych właściwościach cieplnych. W opracowaniu przedstawiono rezultaty badań drążenia szczelin w folii tantalowej o grubości 20  $\mu\text{m}$  oraz wycinania rdzeni głowic magnetycznych z folii o grubości 60  $\mu\text{m}$ , wykonanej ze stopu amorficznego.

*Słowa kluczowe:* obróbka elektroerozyjna, miniaturowe elementy, cienkie folie, odprowadzenie ciepła, mikrogeometria powierzchni

### 1. WSTĘP

Miniaturowe płaskie elementy wytwarzane z półfabrykatu w postaci folii o grubości mniejszej niż 100  $\mu\text{m}$  można kształtować różnymi sposobami technologicznymi. W warunkach produkcji seryjnej, zależnie od właściwości materiału folii, najczęściej wykorzystywane są: wykrawanie, trawienie fotochemiczne oraz wycinanie laserowe. W przypadku pojedynczych wyrobów konkurencyjnymi technikami są także inne niekonwencjonalne metody wytwarzania: drążenie oraz wycinanie elektroerozyjne (EDM, WEDM) [5, 6]. Zastosowanie obróbki elektroerozyjnej do wykonania elementu z cienkiej folii, np. metalowej, wymaga rozwiązania kilku problemów. Półfabrykat jest bardzo wiotki i łatwo deformuje się pod wpływem oddziaływań mechanicznych, a ponadto nie zapewnia właściwego odprowadzania ciepła powstającego w wyniku wyładowania. Nawet przy łagodnych parametrach elektrycznych krawędzie folii po obróbce są bardzo postrzępione. Wysokość nierówności jest porównywalna z grubością materiału obrabianego. W niektórych przypadkach istnieje niebezpieczeństwo powstania niekorzystnych zmian w strukturze materiału, spowodowanych przez intensywne zjawiska cieplne. Podobne problemy występują także przy stosowaniu innych sposobów, polegających na oddziaływaniu termicznym, np. przy drążeniu laserowym w cienkiej folii [3]. Na rysunku 1 przedstawiono przykłady konstrukcji miniaturowych płaskich elementów - maski

z wąskimi szczelinami do naparowywania próżniowego cienkich warstw oraz segmentu rdzenia głowicy wizyjnej.



Rys. 1. Miniaturowe płaskie elementy z cienkich folii: a) maska z folii tantalowej o grubości 20  $\mu\text{m}$ , b) półrdzeń głowicy z folii o grubości 60  $\mu\text{m}$  ze stopu amorficznego

## 2. ZJAWISKA OBRÓBKOWE

W plazmowym kanale wyładowania elektrycznego temperatura osiąga wartości rzędu 6000-12000 K [1]. Energię cieplną plazmy przejmuje przedmiot obrabiany, co prowadzi do lokalnego odparowania lub stopienia materiału i tym samym utworzenia krateru. Jego wymiary zależą z jednej strony od gęstości mocy impulsu, z drugiej zaś od właściwości mechanicznych i termicznych materiału obrabianego [4]. Przewodzony w materiale strumień ciepła jest wprost proporcjonalny do gradientu temperatury, współczynnika przewodzenia ciepła oraz pola powierzchni przepływu strumienia [8]. W przypadku cienkich folii decydujący wpływ na wymiary kraterów ma właśnie znikome pole powierzchni przepływu ciepła. Grubość folii jest mniejsza lub porównywalna ze średnicą kanału i w tej sytuacji nie można go traktować jako punktowego źródła ciepła. Podczas wyładowań bocznych strumień plazmy prawdopodobnie opływa obie płaszczyzny materiału dodatkowo intensyfikując proces erozji. Ciepło powstające podczas wyładowania elektrycznego najprościej można ograniczyć, zmniejszając energię pojedynczego impulsu. W układzie generatora RC zależy ona od pojemności C i napięcia zasilania U. Jest to równoznaczne ze zmniejszeniem wydajności drażenia lub wyciągnięcia. Dane literaturowe wskazują, że przy mikroobróbce elektroerozyjnej (Micro-EDM) energia pojedynczych impulsów wynosi zaledwie  $10^{-8}\text{J}$  [2]. Chropowatość powierzchni jest wtedy niewielka ( $R_a = 0,2 \div 0,4 \mu\text{m}$ ), ale uzyskuje się to kosztem znaczącego zmniejszenia wydajności. Innym sposobem, poprawienia mikrogeometrii krawędzi jest zastosowanie okładek technologicznych z dobrego przewodnika ciepła, np. miedzi. Okładki nie tylko zwiększają pole powierzchni przepływu ciepła, lecz również zapewniają ochronę mechaniczną cienkiej folii. Oczywiście ich obecność powiększa czas niezbędny do ukształtowania elementu.

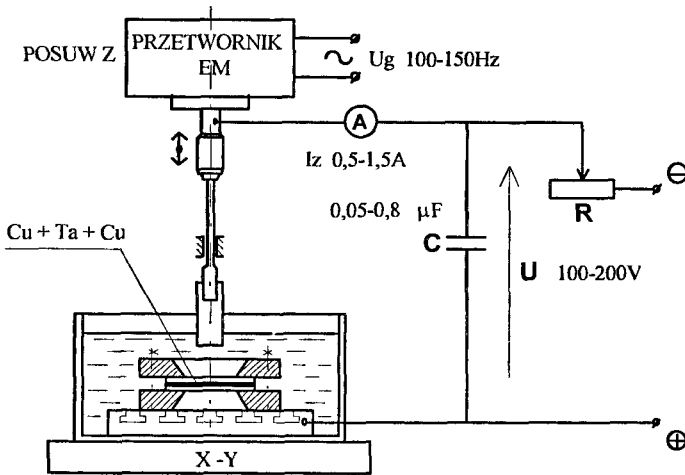
### 3. DRAŻENIE SZCZELIN W FOLII TANTALOWEJ

Tantal jest materiałem trudnotopliwym i odpornym chemicznie. Dlatego folie z Ta doskonale nadają się na osłony w technice próżniowej. Jego właściwości wskazują na możliwość dobrej obrabialności sposobami elektroerozyjnymi – tablica 1.

Tablica 1. Zestawienie niektórych właściwości miedzi, stali i tantalu.

Material	Temperatura topnienia [°C]	Przewodność cieplna [Wcm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Ciepło właściwe [Jcm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Współczynnik rozszerzalności liniowej [K <sup>-1</sup> ]	Twardość Brinella HB	Moduł Younga [GPa]
Cu	1080	4,2	0,385	$25 \times 10^{-6}$	35	110
Stal	1400	0,15	0,484	$16 \times 10^{-6}$	>200	>200
Ta	3000	0,54	0,140	$7 \times 10^{-6}$	130	189

Badania procesu drażenia szczelin wykonywano na drażarce laboratoryjnej z generatorem RC – rys. 2. Ich celem było określenie wpływu wartości napięcia i pojemności na zniekształcenia krawędzi oraz dobór grubości okładek zwiększających pole powierzchni przepływu strumienia ciepła.

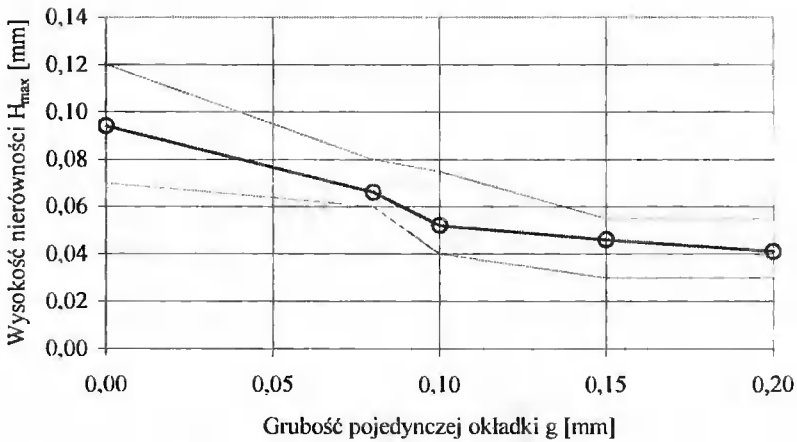


Rys. 2. Schemat układu i parametry elektroerozyjnego drażenia wąskich szczelin w folii Ta

W pierwszej kolejności szczeliny wykonywano bezpośrednio w folii Ta zamocowanej w uchwycie, zmieniając  $C$  i  $U$ . Następnie przeprowadzono próby drażenia w folii pokrytej próżniowo warstwą 5  $\mu$ m Cu oraz folii Ta, umieszczonej w dwustronnych okładkach z taśmy Cu o zmiennej grubości. Elektrody były wykonane z miedzi i miały grubość 0,15 mm. W charakterze dielektryka stosowano mieszaninę nafty z olejem.

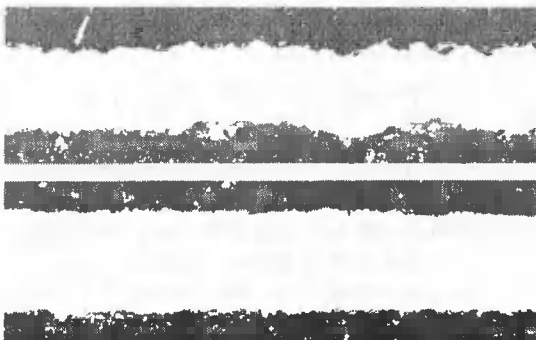
Próby drażenia bezpośredniego wykazały, że nawet nastawienie najmniejszych wartości  $C$  i  $U$  w posiadanym układzie zasilania nie ogranicza wystarczająco nierówno-

ści na krawędziach szczelin. Czas drążenia wydłużał się nieadekwatnie do zmienianych parametrów układu. Naparowanie miedzi wydawało się dobrym rozwiązaniem ze względu na idealne przyleganie warstwy oraz możliwość jej łatwego wytrawienia po drążeniu. Jednak okazało się, że w trakcie wyładowań miedź odpryskuje płatami od folii Ta. Przyczyną jest duża różnica wartości współczynników rozszerzalności liniowej obu materiałów. Zatem zasadnicze eksperymenty technologiczne przeprowadzono dla techniki drążenia w okładkach, stosując taśmy miedziane o różnej grubości. Miały one za zadanie wyznaczenie warunków, przy których nierówności mają wysokość  $H_{\max} < 25 \mu\text{m}$ , zaś czas obróbki nie jest zbyt długi. Rezultaty badań  $H_{\max} = f(g_{\text{Cu}})$  zostały zilustrowane na wykresie przedstawionym na rys. 3.



Rys. 3. Zależność wysokości nierówności na krawędziach szczelin w folii Ta od grubości okładek Cu. Próby drążenia zrealizowano przy pojemności  $0,8 \mu\text{F}$  oraz napięciu  $200 \text{ V}$

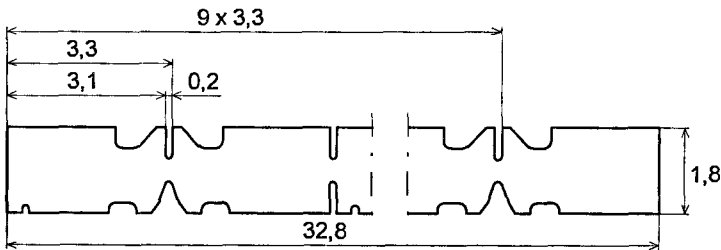
Zastosowanie w tym eksperymencie dużych wartości napięcia i pojemności miało na celu wzmocnienie zjawisk cieplnych i ułatwienie pomiarów nierówności. Ostatecznie maski wykonano w okładkach o grubości  $g = 0,10 \text{ mm}$  przy  $C = 0,2 \mu\text{F}$  oraz  $U = 140 \text{ V}$  uzyskując tym samym zadowalające rezultaty. Na rysunku 4 zestawiono zdjęcia krawędzi szczelin wykonanych bez okładek i z okładkami.



Rys. 4. Porównanie krawędzi szczelin: górna - drążona bez okładek oraz dolna - w okładkach o grubości  $0,20 \text{ mm}$

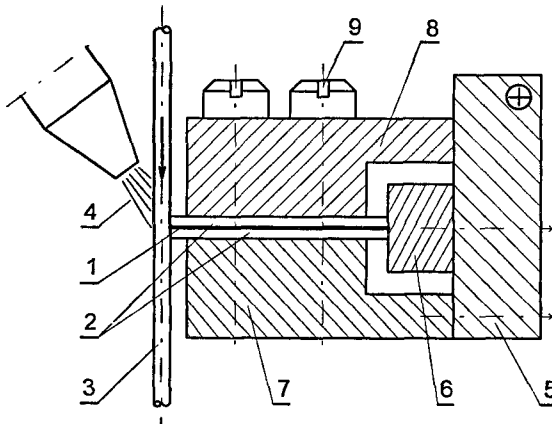
#### 4. WYCINANIE RDZENI Z FOLII ZE STOPU AMORFICZNEGO

W urządzeniach do rejestracji magnetycznej sygnałów wizyjnych stosuje się miniaturowe głowice, w których szerokość i długość szczeliny magnetowodu dla systemu VHS wynoszą  $0,3 \times 59 \mu\text{m}$  [7]. Głowice wizyjne najczęściej wykonuje się z monokryształu ferrytu manganowo-cynkowego. Dobrymi materiałami są również niektóre amorficzne stopy metali. Przykładem takiego materiału jest stop o strukturze składu  $(\text{Co-FeMn})_{80}(\text{SiB})_{20}$ , charakteryzujący się przenikalnością względną  $\mu_e = 300-1000$  (przy 5 MHz) oraz mikrotwardością  $\text{HV}_{\mu 01} = 8000 \text{ MPa}$ . Jest on produkowany w postaci folii o grubościach mniejszych od  $100 \mu\text{m}$ . Do prób wykonania głowic przyjęto folię o grubości  $60 \mu\text{m}$ . Wycinanie elektroerozyjne półrdzeni głowic z takiej folii (rys. 1b), oprócz problemu dużych nierówności na krawędziach, stwarzało niebezpieczeństwo termicznego uszkodzenia struktury materiału, gdyż temperatura rekrytalizacji wytypowanego stopu wynosi  $430 \text{ }^\circ\text{C}$ . Aby je zminimalizować i równocześnie zapewnić racjonalną wydajność do wycinania rdzeni zastosowano specjalną technikę obróbki. Zaprojektowano pasek technologiczny składający się z 10 półrdzeni – rys. 5.



Rys. 5. Konstrukcja paska technologicznego do wycinania rdzeni głowic

W jednej operacji realizowano wycinanie dwu identycznych pasków z folii amorficznej, przedzielonych przekładką izolującą. Utworzony w ten sposób pakiet był mocowany w grubych szczękach z mosiądzu, o profilu powierzchni bocznej wykonanym według tego samego programu. Schemat układu obróbkowego ilustruje rys. 6.

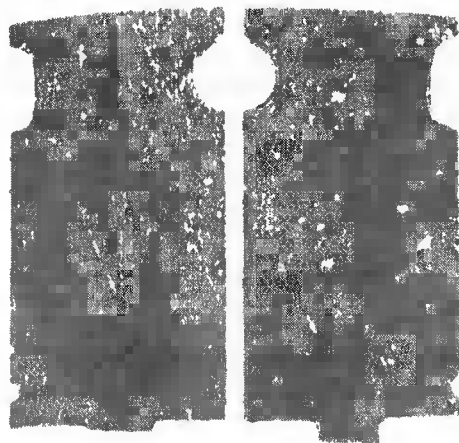


Rys. 6. Układ obróbkowy zastosowany przy wycinaniu: 1 - przekładka izolująca, 2 - folie ze stopu amorficznego, 3 - elektroda drutowa, 4 - natrysk dielektryka, 5 - podstawa uchwytu, 6 - listwa bazowa, 7, 8 - kształtowe szczęki, 9 - wkręty ściskające



Umieszczenie folii w specjalnych szczękach zapewniło bardzo dobre usztywnienie i odprowadzenie ciepła ze strefy wyładowań. Wycinanie przeprowadzono drutem miedzianym o średnicy 0,12 mm przy następujących parametrach elektrycznych:  $C = 0,1 \mu\text{F}$ ;  $U = 150 \text{ V}$ ;  $I_z = 0,8 \text{ A}$ . Jako dielektryk zastosowano wodę dejonizowaną. Chropowatość na obrabianej elektroerozyjnie powierzchni bocznej wynosiła  $R_a = 0,3 \div 0,4 \mu\text{m}$ . Na rysunku 7 przedstawiono wycięte półrdzenie w ustawieniu montażowym głowicy.

Po obróbce i montażu próbne głowice zainstalowano w urządzeniach pomiarowych. Stwierdzono, że ich parametry elektromagnetyczne są bardzo dobre, co oznaczało, że ewentualne zmiany strukturalne nie spowodowały znaczącego pogorszenia właściwości materiału.



Rys. 7. Wycięte półrdzenie ustawione w układzie montażowym

## 5. PODSUMOWANIE

Obróbka elektroerozyjna elementów z cienkich folii, przy energii pojedynczego impulsu rzędu  $10^{-3}$ - $10^{-2} \text{ J}$ , prowadzi do powstawania na obrabianych krawędziach nierówności o wymiarach przewyższających  $100 \mu\text{m}$ . Można je ograniczyć, umieszczając folię w okładkach technologicznych z materiału o dobrych właściwościach cieplnych. Maksymalna wysokość nierówności jest wtedy mniejsza niż  $25 \mu\text{m}$ , zaś parametr  $R_a$  osiąga nawet wartości poniżej  $0,5 \mu\text{m}$ . Okładki mogą być obrabiane łącznie z folią lub odpowiednio ukształtowane wcześniej. Drugi sposób zapewnia lepszą wydajność obróbki oraz skuteczniej chroni materiał obrabiany przed oddziaływaniem ciepła, gdyż grubość okładek nie jest limitowana. Z folii o grubości  $60 \mu\text{m}$ , wykonanej z magnetycznego stopu amorficznego zostały wycięte rdzenie próbnych głowic wizyjnych, które w pełni zachowały dobre parametry elektromagnetyczne materiału wyjściowego.

## LITERATURA

- [1] Albiński K., Bratasz Ł., Miernikiewicz A., Musioł K.: Promieniowanie plazmowego kanału wyładowania elektrycznego. Materiały Konferencji EM'97 (Electromachining), Bydgoszcz - Golub Dobrzyń 1997.
- [2] Allen D.M., Almond H.J.A., Bhogal J.S., Green A.E., Logan P.M., Huang X.X.: Typical Metrology of Micro-Hole Arrays Made in Stainless Steel Foils by Two-Stage Micro-EDM. Annals of the CIRP, Vol.48/1/1999.
- [3] Leicester-Schädel M., Wogersien A., Paschko S., Dauer S., Büttgebach S.: Micro-machining of NiTi Foils Using a Q-switched Nd:YAG-Laser. Proc. of 1<sup>st</sup> Int. Conf. for Prec. Eng. and Nanotechnology EUSPEN, Bremen, Germany 1999.
- [4] Miernikiewicz A.: Plazmowy kanał wyładowania elektrycznego źródłem informacji o procesie obróbki elektroerozyjnej (EDM). Materiały Konferencji EM'97 (Electromachining), Bydgoszcz - Golub Dobrzyń 1997.
- [5] Reynaerts D., Van Brussel H., Meeusen W., Song X.: A Review on Micro-Electro Discharge Machining of Metal and Silicon. Proc. of 1<sup>st</sup> Int. Conf. for Prec. Eng. and Nanotechnology EUSPEN, Bremen, Germany 1999.
- [6] Ruszaj A.: Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi. Prace Instytutu Obróbki Skrawaniem, Kraków 1999.
- [7] Urbański B.: Rejestracja sygnałów wizyjnych. WKiŁ, Warszawa 1982.
- [8] Wiśniewski S., Wiśniewski T.S.: Wymiana ciepła. WNT, Warszawa 1994.

ELECTRO-DISCHARGE MACHINING OF SMALL COMPONENTS  
MADE OF THIN FOILS

## Summary

Thin foil blanks, made of metals and amorphous alloys, have been used for fabrication of various small components. Shaping such components with electro-discharge machining needs special solutions as regular spark-erosion process generates a relatively big amount of heat and, consequently, creates a considerable high roughness on the component edges. The simplest way to avoid this effect is to diminish single pulse energy. Another possibility requires extra cover sheets made of a good heat conductor. A combination of both methods enables good machining results.

Key words: electro-discharge machining, miniature element, thin foil, heat carrying away, micro-geometry of surface



## EROZJA ELEKTRYCZNA SPONTANICZNA I STYMULOWANA

Adam Miernikiewicz

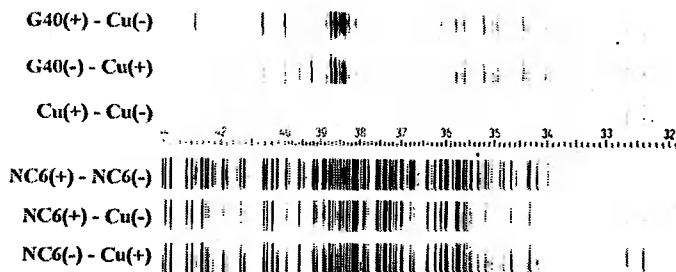
Wydział Mechaniczny Politechniki Krakowskiej,  
Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji,  
al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków

Obróbka elektroerozyjna wgłębna (EDM) jest procesem, w którym do erodowania materiałów wykorzystuje się erozję elektryczną, powodowaną przez wyładowania elektryczne, najczęściej w ciekłym ośrodku dielektrycznym. W tej publikacji przedstawiono nowe cechy wyładowania elektrycznego, w tym skład plazmy erozyjnej w EDM i mechanizm jej generacji oraz wartość i zmienność jej temperatury. Zaproponowano sposób stymulowania generacji plazmy erozyjnej, powodujący pożądany wzrost jej ciśnienia. Wykazano wpływ wzrostu ciśnienia plazmy na efektywność procesu EDM węglików spiekanych.

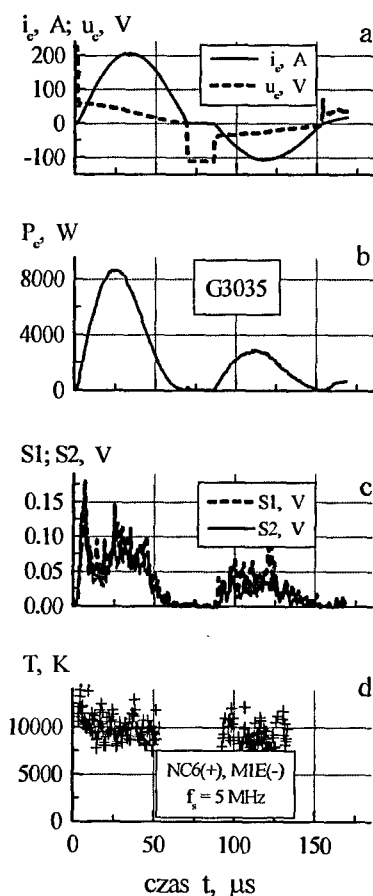
*Słowa kluczowe:* EDM, wyładowanie elektryczne, plazma, temperatura, efektywność

### 1. WSTĘP

Obróbka elektroerozyjna jest obiektem badań od 55 lat i przez niewiele krótszy okres wykorzystywana jest w przemyśle. Ze względu na postać elektrody roboczej rozróżnia się dwie odmiany obróbki elektroerozyjnej: wgłębna EDM (*die sinking EDM*) oraz elektroerozyjne wycinanie drutem (*Wire EDM*). Podczas kilku ostatnich lat przedmiotem badań w ITMiAP Politechniki Krakowskiej był proces wgłębnej EDM. Eksperymenty prowadzono głównie w celu zbadania możliwości pomiaru temperatury plazmy erozyjnej [1]. Przeprowadzono badania spektroskopowe promieniowania plazmowego kanału wyładowania elektrycznego (PKWE), w wyniku których zidentyfikowano zasadnicze składniki plazmy erozyjnej.



Rys. 1. Widmo plazmy erozyjnej w warunkach EDM dla wybranych materiałów elektrod



Rys. 2. Wyładowanie elektryczne z kondensatora:  $C = 31,5 \mu\text{F}$ ,  $U_0 \approx 230 \text{ V}$ : a) przebieg natężenia prądu  $i_e$  oraz spadku napięcia  $u_e$ , b) przebieg zmienności mocy  $P_e$  działającej w PKWE, c) przebieg zmienności natężenia promieniowania PKWE dla linii Fe, d) przebieg zmienności wartości temperatury plazmy EDM

Na rysunku 1 przedstawiono fragment widma plazmy erozyjnej, zarejestrowanego na kliszy fotograficznej z wykorzystaniem spektroskopu Q24. Na elektrody stosowano stal NC6, węglik spiekany G40 oraz miedź elektrolityczną MIE. Widmo plazmy EDM wskazuje na obecność w niej metali obu elektrod. Podczas badań jako ciecz dielektryczną stosowano naftę kosmetyczną. Dokonano pomiaru wartości temperatury plazmy erozyjnej ze szczególnym uwzględnieniem zmienności temperatury w czasie impulsu. [1] Rysunek 2a przedstawia charakterystykę wyładowania elektrycznego z kondensatora w warunkach EDM. Biegunowość elektrod jest typowa dla EDM stali z wykorzystaniem generatora zasobnikowego. Zauważono jednak, iż tylko pierwszy półokres wyładowania przebiega przy nastawionej biegunowości elektrod. Przy przejściu przebiegu natężenia prądu przez zero następuje przerwanie wyładowania, na kondensatorze napięcie osiągnęło wartość około -105 V i po kilkadziesiąt  $\mu\text{s}$  następuje dalszy ciąg wyła-

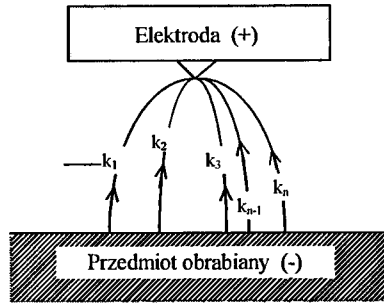
dowania przy zmienionej biegunowości elektrod. Z przedstawionej na rys. 2 charakterystyki wyładowania elektrycznego w warunkach EDM wynika, iż mimo zmiany biegunowości elektrod i znacznej zmiany wartości mocy wyładowania - rys. 2b, wartość temperatury plazmy erozyjnej - rys. 2d ulega niewielkim zmianom. Na podstawie kilkuset pomiarów przeprowadzonych dla takiej pary elektrod [1] obliczono, iż temperatura plazmy EDM przyjmuje wartości w przedziale  $10000 \pm 2500$  K. Wyniki pomiaru natężenia promieniowania emitowanego z PKWE - rys. 2c, wskazują na znaczną fluktuację wartości sygnałów S1 i S2. Efekt ten początkowo tłumaczono przesłaniem plazmy przez produkty erozji. Jednak taka interpretacja nie była satysfakcjonująca. Badano także [9] fluktuację spadku napięcia  $u_c$  na PKWE. Przeprowadzona analiza hipotetycznej wartości gęstości mocy [9, 10], wynikającej z przesłanek hipotez dotyczących powstawania kraterów erozyjnych [4, 5, 8] oraz [14, 15] wykazała, że jednolity kanał plazmowy, zastępowany punktowym lub płaskim źródłem mocy w badaniach symulacyjnych nie może funkcjonować w rzeczywistych warunkach EDM. Powstał zatem problem, który można wyrazić pytaniem: jakie mechanizmy powodują powstawanie krateru erozyjnego i jaki jest mechanizm generacji erozyjnej plazmy metali elektrod? Żeby odpowiedzieć na tak sprecyzowane pytanie przeanalizowano zjawiska wywołane działaniem pola elektrycznego na cieczy izolacyjne i gazy.

## 2. MODEL WYŁADOWANIA ELEKTRYCZNEGO W WARUNKACH EDM

Badania nad przebiciem elektrycznym cieczy izolacyjnych [2] oraz gazów [3, 6, 7] wykazują, że procesy prowadzące do wyładowania elektrycznego w tych ośrodkach przebiegają podobnie. Konfiguracja strimerów przebiciowych w cieczach izolacyjnych [2], a także analiza termicznej emisji elektronów z powierzchni metalu wspomaganej przez przyłożone pole elektryczne przeprowadzona w pracy [11] wskazują, iż w warunkach EDM może być realizowany model wielokanałowego wyładowania elektrycznego. Założono, że elektrony z katody dostają się do przestrzeni międzyelektrodowej, głównie na skutek emisji polowej. Znajdujące się w szczelinie międzyelektrodowej elektrony podlegają działaniu pola elektrycznego. W warunkach EDM, gdzie grubość szczeliny międzyelektrodowej wynosi od kilku  $\mu\text{m}$  do kilkuset  $\mu\text{m}$ , a na powierzchni elektrod ograniczonej warstwą wierzchnią o zróżnicowanych właściwościach znajdują się nierówności, można oczekiwać, iż powstałe pole elektryczne na skutek przyłożonego napięcia biegu luzem będzie raczej niejednorodne i może być przedstawione schematycznie jak na rys. 3.

Przyjmując ogniskujące działanie wierzchołków nierówności anody na przebieg linii sił pola elektrycznego, na co wskazują cytowane pozycje bibliograficzne, skutkami jego działania zostanie objęta pewna powierzchnia katody i znacznie mniejsza anody. Z całej objętej przez pole elektryczne powierzchni katody elektrony mogą być losowo emitowane. Fakt wyemitowania elektronu z metalu katody może zależeć od czynników związanych z właściwościami materiału katody. Jeżeli pole elektryczne wywołujące emisję elektronów z metalu katody - która wg [2, 6, 7] jest dostarczycielem elektronów - wykonuje także pracę nad materiałem katody, to miejscowo, w bardzo ograniczonych obszarach metalu katody musi wzrastać także temperatura atomów, a zatem i kryształów metalu. Na skutek przewodnictwa fononowego i elektronowego możliwy jest wzrost wartości temperatury w mikroobjętościach warstwy przypoверхniowej me-

talu katody,. Lokalna wyższa wartość temperatury w połączeniu z działaniem pola elektrycznego, nawet w bardzo ograniczonym obszarze może znacząco wpłynąć na wzrost gęstości prądu termoemisji. Wzrost natężenia prądu prowadzi niekiedy do dalszego wzrostu temperatury. Zjawisko takie może przebiegać lawinowo.



Rys. 3. Schemat wielokanałowego wyładowania elektrycznego pomiędzy dwiema elektrodami metalowymi w ciekłym ośrodku dielektrycznym

Na skutek transportu elektronów w cieczy dielektrycznej przez pole elektryczne, na drodze przebiegu elektronów mogą zostać wzbudzone cząstki cieczy izolacyjnej lub znajdujących się w niej zanieczyszczeń. Powstają zatem w cieczy izolacyjnej obszary, w których lokalnie wzrasta wartość temperatury cieczy, co może powodować w tych obszarach zmniejszenie jej lepkości i gęstości. W ten sposób może powstawać równolegle wiele kanałów (przez które transportowane są elektrony) zaczynających się w okolicy powierzchni katody - rys. 3. Na skutek małej masy elektronów i zakrzywienia się ich torów wzdłuż linii pola elektrycznego łączą się one w pobliżu ogniskującej (ogniskujących) nierówności na anodzie. Po dotarciu połączonych lawin elektronów do anody, powstaje sytuacja zobrazowana schematycznie na rys. 3. Przyjmując że obserwowana wartość średnicy lawiny elektronów [2] jest rzędu  $1 \mu\text{m}$  - wartości ich średnicy mogą być też submikrometrowe, co potwierdzają rozmiary kraterów satelitów [9, 10, 11] - można w przybliżeniu przyjąć, że każdy taki przewodzący kanał działa na katodę jak punktowe, ciągle źródło ciepła. Założenie takie nie budzi wątpliwości dla stalowej lub miedzianej próbki o średnicy kilkunastu milimetrów, które były używane w przeprowadzonych badaniach.

Każdy z powstałych pomiędzy elektrodami w cieczy dielektrycznej przewodzących kanałów (oznaczony na rys. 3 symbolem  $k_i$ ) jako odbiornik energii posiada swoją charakterystykę. Na podstawie [2, 3, 6, 7] można powiedzieć, iż taki przewodzący kanał posiada pewną długość, średnicę, indukcyjność i przewodność. Traktując przewodzący kanał jako plazmę, można przypisać każdemu kanałowi plazmowemu:

– rezystancję  $R_i = l_i / (A_i \cdot \sigma_i)$  oraz

– indukcyjność  $L_i$ ,

gdzie:  $l_i$  - długość  $i$ -tego kanału,

$A_i$  - pole przekroju poprzecznego  $i$ -tego kanału,

$\sigma_i$  - przewodność elektryczna  $i$ -tego kanału plazmowego.

Zakładając, że napięcie zasilania kanałów jest równe  $u_0$ , to natężenie prądu w każdej gałęzi wyładowania można zapisać jako:

$$i_i = \frac{u_e}{R_i} \cdot \left( 1 - \exp\left(\frac{R_i}{L_i} \cdot t\right) \right) \quad (1)$$

moc działająca w każdym kanale wyniesie:  $P_i = u_e \cdot i_i$ .

Korzystając z prawa Kirchhoffa można napisać:

$$i_e = \sum_1^n i_i \quad \text{lub} \quad P_e = \sum_1^n P_i \quad (2)$$

Wzory (2) wskazują, że poszczególne kanały wyładowania nie mogą być niezależne. W impulsie, w którym natężenie prądu jest określone przez parametry generatora, a moc jest iloczynem chwilowych wartości natężenia prądu i spadku napięcia na plazmowym kanale wyładowania. Sumaryczna wartość mocy dla określonych warunków obróbki jest z góry ograniczona.

Wykorzystując dane literaturowe [2] i wyniki badań własnych [9, 10] dotyczące rozmiarów poprzecznych kanałów wyładowania oraz powstawania krateru na drodze cieplnego działania PKWE na powierzchnię przedmiotu obrabianego, do badań teoretycznych [13] zastosowano wzór opisujący pole temperatury powstałe na skutek działania ciągłego punktowego źródła ciepła o stałej mocy na ciało półnieskończone.

Symulację komputerową efektywności procesów topienia i sublimacji przeprowadzono przy założeniach:

- przyjęto, że na powierzchnię próbki działa  $n$  punktowych ciągłych źródeł ciepła (kanałów) o stałej, zadanej wartości mocy  $P_i$ ,
- przyjęto, że objętość roztopionego lub sublimowanego materiału, przez jedno źródło (kanał), będzie ograniczona powierzchnią czaszy półkuli o promieniu  $r_k$ ,
- przyjęto, że źródło musi wykonać pracę na materiale równą entalpii topienia lub sublimacji,
- dla uwzględnienia ciepła topienia i sublimacji w procesie obliczeń, wprowadzono pewną zmodyfikowaną wartość temperatury topnienia i sublimacji, które oznaczono  $T_M^*$  oraz  $T_V^*$  i obliczano z zależności:

$$T_M^* = T_M + H_M/C_p \quad \text{oraz} \quad T_V^* = T_V + H_S/Cl$$

gdzie:

$T_M$  - wartość temperatury topnienia,

$H_M$  - entalpia topnienia,

$C_p$  - ciepło właściwe,

$T_V$  - wartość temperatury wrzenia,

$H_S$  - wartość energii właściwej sublimacji,

$Cl$  - wartość ciepła właściwego cieczy,

- wydajność objętościową procesów topienia i sublimacji obliczano z poniższej zależności:

$$V_w = \frac{60 V_k}{1,3t} \quad (3)$$



– efektywność energetyczną procesu topienia i sublimacji obliczano z zależności:

$$q_{ve} = \frac{V_k}{W_k} \quad (4)$$

gdzie:

$V_w$  - wydajność procesu,  $\text{mm}^3/\text{min}$ ,

$V_k$  - objętość powstałego na skutek działania pojedynczego kanału węglenia półkulistego ograniczonego izotermą o zmodyfikowanej wartości temperatury topnienia lub wrzenia,  $\text{mm}^3$ ,

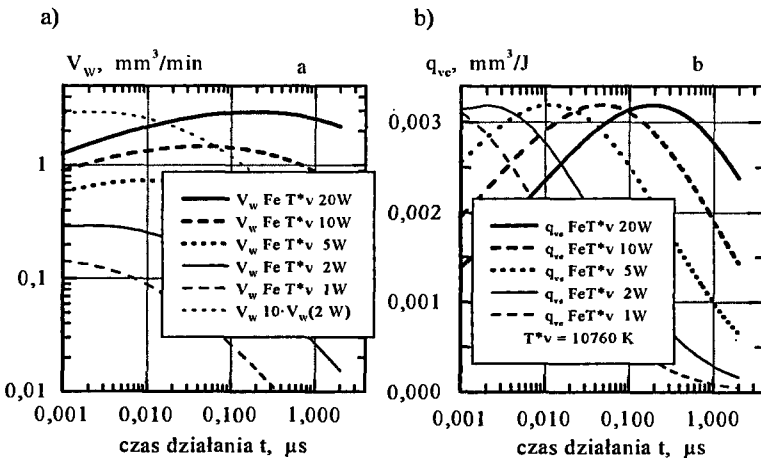
$t$  - czas działania ciągłego punkowego źródła ciepła, s,

$q_{ve}$  - efektywność procesu topienia lub sublimacji,  $\text{mm}^3/\text{J}$ ,

$W_k$  - wartość energii wydzielonej przez źródło w czasie działania  $t$ , J.

### 3. EROZJA ELEKTRYCZNA SPONTANICZNA

Przeprowadzona analiza przebiegu wyładowań elektrycznych w ciekłych ośrodkach dielektrycznych oraz analiza teoretyczna oddziaływania ciągłego punkowego źródła ciepła o zadanej stałej wartości mocy na powierzchnię metalowej elektrody wskazują, że rozwój plazmowego kanału wyładowania elektrycznego może być inicjowany równocześnie z wielu miejsc na katodzie. W zależności od grubości szczeliny międzyelektrodowej, rodzaju materiału katody, właściwości cieczy dielektrycznej i dysponowanej mocy, może spowodować wyładowanie elektryczne niepełne lub pełne. Charakter wyładowania elektrycznego zależy także od warunków hydrodynamicznych w szczelinie międzyelektrodowej.

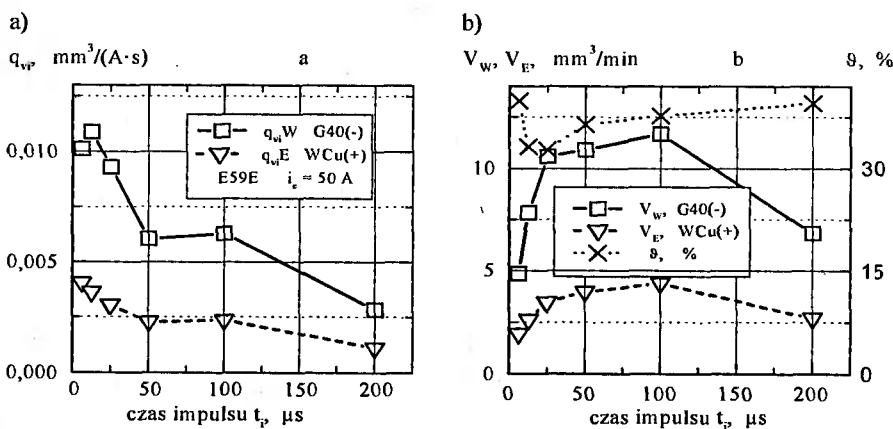


Rys. 4. Wyniki badania oddziaływania ciągłego punkowego źródła ciepła na powierzchnię próbki żelaznej; a) wydajność objętościowa pojedynczych źródeł o wartości mocy 1÷20 W oraz suma działania 10 źródeł o mocy 2 W każde, b) wydajność energetyczna dla pojedynczych źródeł

Analiza teoretyczna wskazuje, iż kanały wyładowania elektrycznego o określonej wartości mocy już w chwili powstawania skazane są na zanikanie. Wynika to z charak-

teru zależności efektywności sublimowania materiału katody przez źródło o określonej wartości mocy od czasu działania, co przedstawiono na rys. 4b. Każdy z przedstawionych na rys. 3 kanałów tworzących strimer wyładowania pozostawia po sobie krater na katodzie i wytwarza pewną objętość plazmy z metalu katody. Przyjmując gęstość stałej katody około  $7800 \text{ kg/m}^3$  oraz gęstość plazmy stalowej [13] o temperaturze  $11600 \text{ K}$ , powstałej ze stali nierdzewnej przy ciśnieniu  $0,28 \cdot 10^6 \text{ Pa}$  równą  $0,1 \text{ kg/m}^3$  zauważamy, że objętość plazmy powstającej ze stali jest większa  $10^4 \div 10^5$  razy od objętości stali. Powstająca plazma może powodować intensywną dekompozycję cieczy dielektrycznej i wzbudzenie lub jonizację cząstek jej składników.

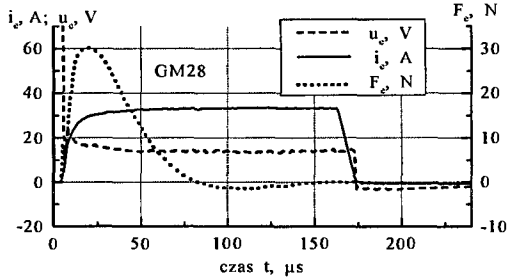
Do powstania kanału plazmowego w szczelinie międzyelektrodowej łączącego obie elektrody niezbędna jest określona objętość plazmy. Aby wypełnić plazmą kanał o średnicy  $10 \mu\text{m}$  i długości  $50 \mu\text{m}$  niezbędna jest objętość plazmy około  $4 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3$ . Dla otrzymania plazmy żelaznej o takiej wartości objętości konieczne jest wysublimowanie stali o objętości około  $10^{-9} \text{ mm}^3$ . Kanał plazmowy łączący obie elektrody umożliwia podtrzymanie wyładowania elektrycznego. Zdaniem autora, wyładowanie niezupełne jest skutkiem wytworzenia przez źródło zbyt małej objętości plazmy dla połączenia elektrod. Powoduje to jedynie zmianę właściwości cieczy w szczelinie i sprzyja przekształceniu wyładowań niezupełnych w zupełne. W początkowej fazie działania pojedynczego kanału wyładowania (źródła) na katodę rośnie efektywność procesu sublimacji - rys. 4b i po osiągnięciu maksimum - maleje. Takie wyładowania elektryczne sprzyjają zanikaniu kanałów mniej efektywnie generujących plazmę, na korzyść powstawania nowych, nawet o bardzo małej mocy, lecz efektywniejszych. Należy podkreślić fakt, iż suma wydajności objętościowej dla oddzielnie działających kanałów o sumarycznej mocy równej mocy pojedynczego kanału - rys. 4a, jest większa niż wydajność objętościowa dla kanału pojedynczego.



Rys. 5. Wyniki badania wpływu czasu impulsu na wartości wskaźników technologicznych przy obróbce węglików spiekanych G40(-) impulsami izoenergetycznymi o natężeniu prądu w impulsie  $i_e = 50 \text{ A}$ , elektroda ze spieku wolfram-miedź WCu(+), CD - nafta kosmetyczna; a) wpływ czasu impulsu na efektywność procesu EDM, b) wpływ czasu impulsu na wydajność objętościową i zużycie elektrody roboczej

Węgliki spiekane stanowią około 30% przedmiotów obrabianych elektroerozyjnie, ale efektywność procesu EDM przy obróbce węglików spiekanych G40 jest o rząd

wartości mniejsza rys. 5a w porównaniu z efektywnością procesu EDM przy obróbce stali NC6, przyjmującą wartości rzędu  $0,2 \text{ mm}^3/(\text{A}\cdot\text{sek})$ . Właściwości fizyczne tych metali wskazują, iż efektywność procesu sublimacji węglików spiekanych może być około dwu lub trzykrotnie mniejsza od efektywności EDM stali. Warstwa węglików spiekanych zmieniona po EDM osiąga znaczną i nierównomierną grubość [11].

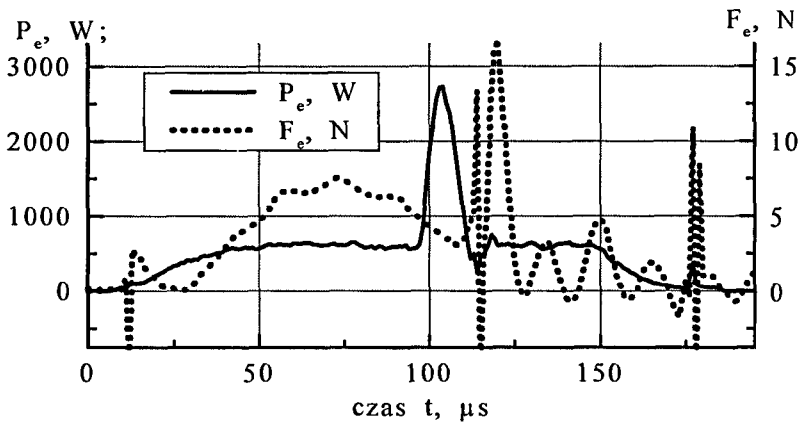


Rys. 6. Wynik badania siły działającej na elektrody pochodzącej od ciśnienia PKWE, warunki obróbki: węgliki spiekane G40(-), elektroda PA7(+)

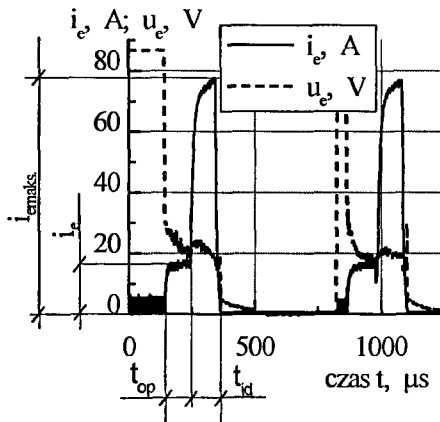
Prawdopodobną przyczyną tego zjawiska może być przebieg zmienności ciśnienia plazmy podczas impulsu, wyrażający się działaniem siły na elektrody. Przebieg zmienności siły pochodzącej od PKWE przy EDM węglików spiekanych przedstawiono na rys. 6. Podczas obróbki węglików spiekanych czujnik siły wskazuje, iż po  $20\div 30$  mikrosekundach jej wartość spada i oscyluje w granicy zera. Podobny przebieg ma zależność efektywności EDM od czasu impulsu - rys. 5a. Podobieństwo przebiegu zmienności siły działającej na elektrody pochodzącej od PKWE do zależności efektywności procesu EDM węglików spiekanych zasugerowało możliwość stymulacji jego efektywności. Jeżeli przyjąć, że erozja wywoływana przez „prostokątne” impulsy mocy jest erozją spontaniczną, charakteryzującą się niewielką wartością efektywności procesu EDM, to istnieje wówczas możliwość realizacji erozji stymulowanej.

#### 4. EROZJA ELEKTRYCZNA STYMULOWANA

Model wielokanałowego wylądowania elektrycznego pozwala na domniemanie, iż zwiększenie wartości mocy impulsu może - zgodnie z zależnościami (2) i przedstawioną na rys. 4 zależnością efektywności sublimowania od czasu - spowodować stymulowaną generację plazmy. Jeżeli szybkość narastania impulsu mocy będzie dostatecznie duża, to roztopiony i pozostający w kraterze metal może zostać z niego wyciśnięty przez stymulowane ciśnienie plazmy. Podjęto zatem badania nad dobraniem odpowiedniego kształtu napięcia i natężenia prądu, by spowodować na tyle szybkie narastanie impulsu mocy, aby czujnik siły wskazał przyrost siły rys. 7, czyli wzrost ciśnienia PKWE.

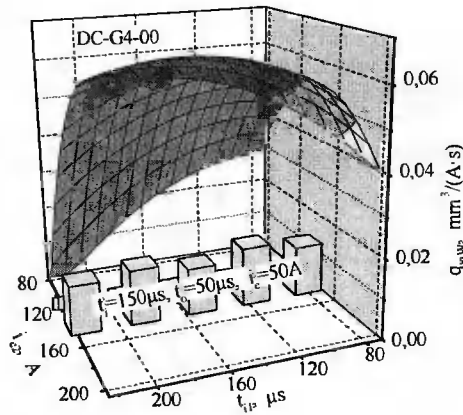


Rys. 7. Kształtowany impuls mocy powoduje wystąpienie fluktuacji impulsu siły



Rys. 8. Kształtowane impulsy mocy wykorzystywane do badania efektywności procesu EDM

Przedstawione na rys. 8 kształtowane impulsy napięcia i natężenia prądu stosowano do badania możliwości stymulowania procesu erozji elektrycznej. Badania wykazały, że przy prędkości narastania dodanego impulsu mocy  $dP_e/dt > 150 \text{ W}/\mu\text{sek}$ . występuje wzrost wartości siły działającej na elektrody, czyli oczekiwany wzrost ciśnienia PKWE. Badania wykazały, że kształtowane impulsy mocy osiągające prędkość narastania większą od  $150 \text{ W}/\mu\text{sek}$ ., stymulują proces erozji. Wyniki badania wpływu parametrów kształtowanych impulsów mocy na efektywność procesu EDM węglików spiekanych G40(-) obrabianych z zastosowaniem elektrody z miedzi M1E(+) w nafcie kosmetycznej wskazały, że erozja stymulowana pozwala na uzyskanie około pięciokrotnie większej efektywności procesu EDM węglików spiekanych od wartości uzyskiwanej przy stosowaniu erozji spontanicznej. Zgodnie z oczekiwaniem znacznemu zmniejszeniu uległa grubość warstwy zmienionej.



Rys. 9. Wykres (powierzchnia) obrazujący wpływ parametrów kształtowanych impulsów mocy na efektywność procesu EDM przy obróbce węglików spiekanych G40(-) elektrodą z miedzi M1E(+). Powierzchnię odpowiedzi narysowano dla  $i_e = 16$  A (słupki przedstawiają osiągnięte wartości  $q_{vi}$  przy obróbce węgla spiekane G40 tradycyjnymi izoenergetycznymi impulsami z generatora obrabiarki E36E)

## 5. PODSUMOWANIE

Stosowane układy automatycznej regulacji posuwu elektrody roboczej, z wykorzystaniem logiki rozmytej [12] pozwalają na optymalne wykorzystanie spontanicznej erozji, zmieniając grubość szczeliny międzyelektrodowej. Pozwalają one na zwiększenie efektywności procesu EDM o kilkadziesiąt lub nawet o 300% [12]. Badania efektywności erozji stymulowanej przeprowadzono z wykorzystaniem konwencjonalnej drążarki węgłębnej. Należy oczekiwać, iż sprzężenie wspomagań może dać jeszcze większe korzyści.

## LITERATURA

- [1] Albiński K., Musioł K., Miernikiewicz A., Łabuz S., Małota, M.: Plasma Temperature in Electrical Discharge Machining. Plasma Sources Science and Technology. Institute of Physics Publishing Techno House, Bristol, U.K. 1996.
- [2] Bärman P., Kröll S., Sunesson A.: Spatially and temporally resolved electron density measurements in streamers in dielectric liquids. J. Phys. D: Appl. Phys. 30, 1997.
- [3] Engel von A.: Electric Plasmas their Nature and Uses. Taylor and Francis Ltd., London and New York 1983.
- [4] Eubank Philip T., Baruffet M.: New Spark Model Proves EDM Stock Removal Caused by Superheating. EDM Digest, 1990.

- [5] Ikai T., Hashiguchi K.: Heat input for crater formation in EDM. Proceedings of the ISEM, XI, EPFL, Lousanne, Switzerland 1995.
- [6] Kesajev I. G.: Katodnye processy električeskoj dugi. Izd. Nauka, Moskva 1968.
- [7] Korotieva A. S., Žukova M. F. (red.): Teorija termičeskoj elektrodugovoj plazmy. Izd. Nauka, Novosybirsk 1987.
- [8] König W., Wertheim R., Zvirin Y., Toren M.: Material Removal and Energy Distribution in Electrical Discharge Machining. Annals of the CIRP, Vol. 24/II/1975.
- [9] Miernikiewicz A.: Plazmowy kanał wyładowania elektrycznego źródłem informacji o procesie obróbki elektroerozyjnej (EDM). V Konferencja Naukowo-Techniczna EM'97 (Electromachining), Bydgoszcz - Golub Dobrzyń 1997.
- [10] Miernikiewicz A.: Power density of an electric discharge under EDM conditions. PAN, Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, Vol. 23 1/99.
- [11] Miernikiewicz A.: Obróbka elektroerozyjna (EDM) w procesie sterowania kosztami i jakością wyrobów. III Ogólnokrajowa Konferencja Naukowo – Techniczna „Postępy w technice wytwarzania maszyn” POSTĘPY '99, Kraków 1999.
- [12] Rajurkar K. P., Wang W. M.: Advances in EDM Monitoring and Control Systems Using Modern Control Concept. International Journal of Electrical Machining, No 2, Tokyo 1997.
- [13] Termodinamičeskije i optičeskije svojstva plazmy metallov i dielektrykov. Metalurgija, Moskva 1988.
- [14] Van Dijck F., Croocall J. R., Heuvelman C. J., Snoeys R.: Some Results and Physical Research in EDM. Proc. of ISEM IV, Bratislava 1974.
- [15] Zolotyh B. N.: Osnovnyje voprosy kačestvennoj teorii elektroiskrovnoj obrabotki v židkoj dielektričeskoj srede. Proc. of Conf. “Problemy električeskoj obrabotki metallov”, Moskva 1962.

## ELECTRICAL EROSION - SPONTANEOUS AND STIMULATED

### Summary

In the die-sinking EDM, the electrical erosion is used to erode various materials. The electrical erosion process is caused by electrical discharges, mostly in a liquid dielectric. The present paper presents several new features of the electrical discharge, including the mechanism of the EDM plasma generation, its composition as well as values and variability of its temperature. A proposed method for stimulation of the EDM plasma generation resulted in a required increase in plasma pressure which showed an impact on the EDM (with sintered carbids machined) efficiency.

Key words: electro-discharge machining (EDM), electric discharge, plasma, temperature, efficiency



## PLAZMOWE WYTWARZANIE WARSTW NANOKRYSTALICZNEGO DIAMENTU NA NARZĘDZIACH SKRAWAJĄCYCH DO MATERIAŁÓW DREWNOPOCHODNYCH

Piotr Niedzielski<sup>1</sup>, Jacek Grabarczyk<sup>1</sup>,  
Andrzej Gołąbczak<sup>1</sup>, Petr Zahalka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Wydział Mechaniczny Politechniki Łódzkiej,  
Instytut Inżynierii Materiałowej,  
ul. Stefanowskiego 1/15, 90-537 Łódź

<sup>2</sup> Liberec Technical University,  
Department of Material Science,  
Halkova 6, 461 17 Liberec, Czech

W pracy przedstawiono sposób wytwarzania warstw nanokrystalicznego diamentu (NCD) metodą plazmy wysokiej częstotliwości na narzędziach skrawających z węglików spiekanych do obróbki materiałów drewnopochodnych. Zaprezentowano wyniki badań potwierdzające przydatność wytwarzanych warstw NCD na narzędziach skrawających do zwiększania ich trwałości.

*Słowa kluczowe:* nanokrystaliczny diament (NCD), plazma wysokiej częstotliwości, węgliki spiekane, materiały drewnopochodne, trwałość narzędzi

### 1. WSTĘP

Praca dotyczy wytwarzania, badania oraz zastosowania warstw nanokrystalicznego diamentu (NCD) otrzymywanego metodą plazmową na narzędziach skrawających do obróbki drewna i materiałów drewnopochodnych. Drewno jest kompozytem charakteryzującym się anizotropią właściwości mechanicznych, kwaśnym odczynem pH oraz złym przewodnictwem cieplnym (tablica 1). Po II wojnie światowej w przemyśle meblarskim, oprócz drewna, zaczęto wprowadzać materiały drewnopochodne, które w chwili obecnej powszechnie są stosowane. Składnikami materiałów drewnopochodnych (takich jak: sklejkki, płyty wiórowe, płyty MDF, laminaty) są: bardzo niskiej jakości drewno, jego odpady, kleje syntetyczne oraz zanieczyszczenia mineralne ( $\text{SiO}_2$  do 2 %). Materiały te charakteryzują się niejednorodną budową wewnętrzną i bardzo twardą warstwą przypowierzchniową, przez co należą do grupy materiałów wyjątkowo trudno obrabialnych. Z tych też powodów ich obróbka nastęrcza duże trudności technologiczne, obserwowane zwłaszcza w przemyśle meblarskim. Obrobionym przedmiotom stawiane są bardzo wysokie wymagania jakościowe, których spełnienie determinują właściwości skrawne i okres trwałości narzędzi.



Specyficzne właściwości materiałów drewnopochodnych oraz bardzo trudne warunki ich skrawania (obróbka z bardzo dużymi prędkościami skrawania) praktycznie wyeliminowały narzędzia z materiałów konwencjonalnych. Zostały one zastąpione narzędziami z węglików spiekanych, cermetów lub materiałów supertwardych. Jednym z kierunków badań nad zwiększeniem odporności na zużycie i okresu trwałości narzędzi jest ich pokrywanie cienkimi warstwami metali lub związków metali, np.: TiC, WC, TiN [5].

Atrakcyjnym sposobem zwiększania trwałości narzędzi skrawających jest wytwarzanie warstw węglowych i diamentopodobnych na ich roboczej powierzchni [1,3,4]. Jednym z pierwszych sposobów wytwarzania warstw diamentopodobnych była metoda gorącego żarnika (HF PCVD) [3]. Metodą tą uzyskano warstwy diamentopodobne o grubości kilku  $\mu\text{m}$  na narzędziach z węglików spiekanych służących do obróbki płyt cemento+wo-wiórowych. Po tym procesie trwałość narzędzi wzrosła o kilkanaście procent.

W prezentowanej pracy autorzy zastosowali metodę plazmy wysokiej częstotliwości (RF PCVD), którą wytworzyli warstwy nanokrystalicznego diamentu (NCD) na narzędziach skrawających z węglików spiekanych. Przydatność tak wytworzonych warstw NCD sprawdzono w warunkach badań eksperymentalnych.

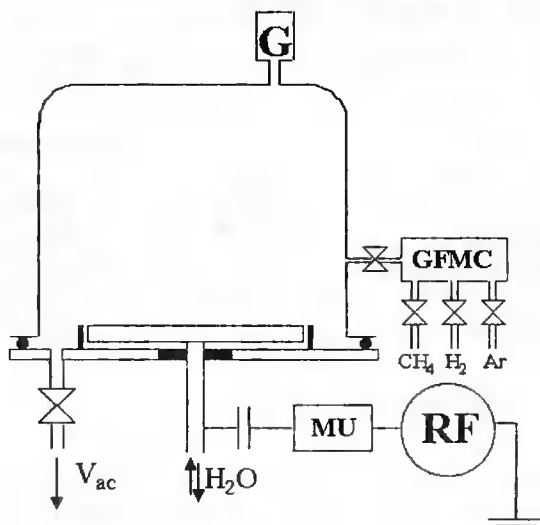
Tablica 1. Podstawowe właściwości drewna i materiałów drewnopochodnych

Materiał	Wilgotność [%]	pH	Własności mechaniczne		Przewodnictwo cieplne [W/mK]
			gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	moduł sprężystości [MPa $\times 10^3$ ]	
Dąb	12-22	4,7-5,6	430-960	10-13	0,12-0,19
Płyta wiórowa	8-10	5-6	500-750	0,14-2,6	0,09-0,14
Płyta MDF	8-10	5,6	420-800	4,5-5	0,07-0,11

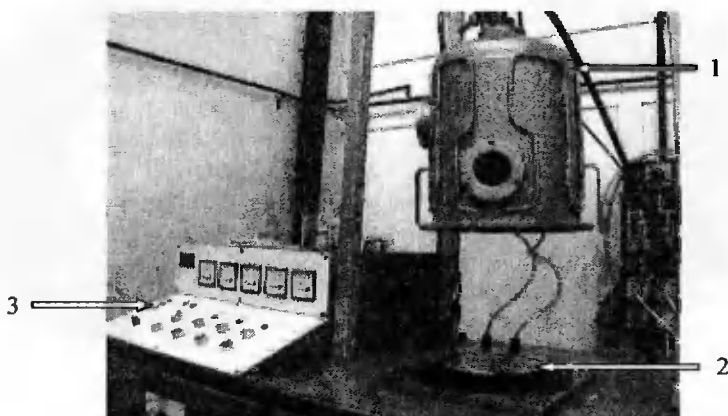
## 2. WYTWARZANIE WARSTW NANOKRYSTALICZNEGO DIAMENTU NA NARZĘDZIACH SKRAWAJĄCYCH

Do wytworzenia warstw nanokrystalicznego diamentu na narzędziach skrawających zastosowano metodę gęstej plazmy wysokiej częstotliwości (RF PCVD), która jest modyfikacją znanego od lat siedemdziesiątych sposobu wytwarzania warstw diamentopodobnych (DLC) [2]. Idea metody plazmy wysokiej częstotliwości polega na rozkładzie metanu w plazmie wysokiej częstotliwości (13,56 MHz) przy ciśnieniu 20÷80 Pa. Schemat aparatury stosowanej do wytwarzania warstw NCD ilustruje rys. 1. Nowe zbudowane stanowisko badawcze do realizacji procesu wytwarzania warstw NCD przedstawiono na rys. 2. Zastosowany w tym procesie generator o szerokim zakresie mocy umożliwia otrzymanie warstw węglowych o różnych właściwościach fizykochemicznych, począwszy od miękkich polimerów, poprzez warstwy diamentopodobne aż do bardzo twardych warstw nanokrystalicznego diamentu. Warstwy NCD wytworzone na narzędziach z węglików spiekanych charakteryzują się dobrymi właściwościami mechanicznymi, a w szczególności: dobrą adhezją do podłoża, wysoką odpornością na ścieranie i dużą twardością (ok. 8000HV) [1]. Warstwy te posiadają strukturę nanokry-

staliczną (wymiary krystalitów wynoszą od 10 do 40 nm) składającą się w około 94 % z fazy  $sp^3$  oraz wykazującą dużą odporność na działanie czynników chemicznych.



Rys. 1. Schemat aparatury do wytwarzania warstw węglowych metodą plazmy wysokiej częstotliwości (RF PCVD): RF - generator wysokiej częstotliwości, MU - układ dopasowania, GFMC - dozownik gazów, G - sonda próżniowa



Rys. 2. Widok aparatury stosowanej do wytwarzania warstw NCD metodą plazmy wysokiej częstotliwości (RF PCVD): 1 - komora próżniowa, 2 - elektroda wysokiej częstotliwości, 3 - układ pomiarowo - sterujący

W procesie wytwarzania warstw NCD narzędzia skrawające (frezy piłkowe, ostrza do głowic itp.) umieszczano na elektrodzie w.c.z. (rys. 2) w specjalnych uchwytach, umożliwiających dwustronne ich pokrycie w trakcie jednego procesu. Znacznie skraca to czas procesu i zmniejsza jego koszty. Stanowisko umożliwia wytwarzanie warstw NCD na narzędziach o średnicy do 200mm. Dla narzędzi o dużej masie stosuje się wstępne podgrzewanie w komorze reaktora w plazmie wysokiej częstotliwości w at-

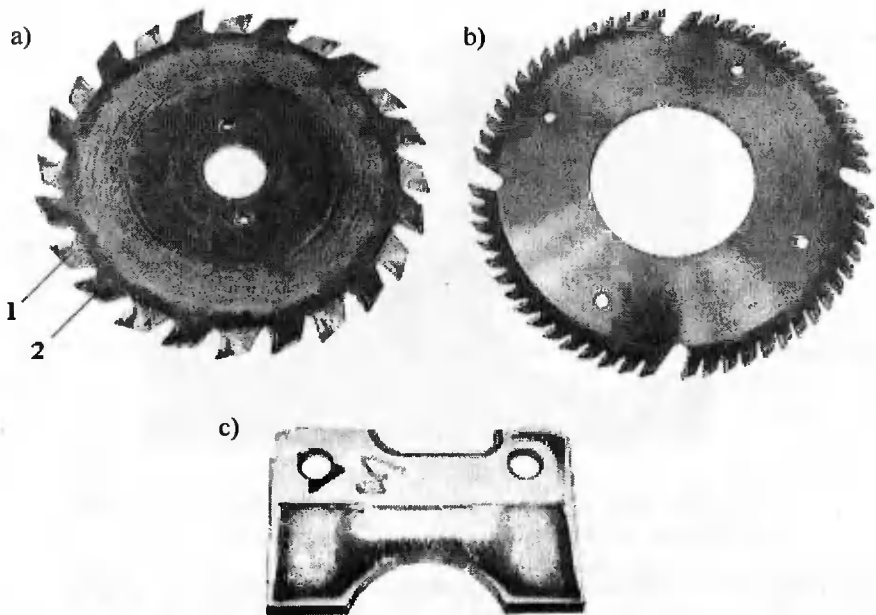
mosferze gazu obojętnego lub przy minimalnym przepływie metanu. Czas wytwarzania warstw NCD zależy od rodzaju i wymiarów narzędzi i wynosi od 30 minut do 5 godzin. Podstawowe parametry procesu zawiera tablica 2.

Tablica 2. Parametry wytwarzania warstw NCD na narzędziach skrawających

Podłoże	Węgiel spiekany
Gaz	Metan
Ciśnienie	20÷80 Pa
Częstotliwość i moc generatora	13,56 MHz, 2 kW
Potencjał elektrody w.cz.	400÷800 V
Czas procesu	0,5÷5 h

### 3. METODYKA I WARUNKI BADAŃ

Badania doświadczalne obejmowały sprawdzenie przydatności warstw NCD wytworzonych na narzędziach skrawających do obróbki materiałów drewnopochodnych. W tym celu przeprowadzono próby skrawania narzędziami z warstwą NCD i narzędziami standardowymi - bez tej warstwy. Do badań wybrano trzy grupy narzędzi z ostrzami skrawającymi z węglików spiekanych przedstawione na rys. 3.



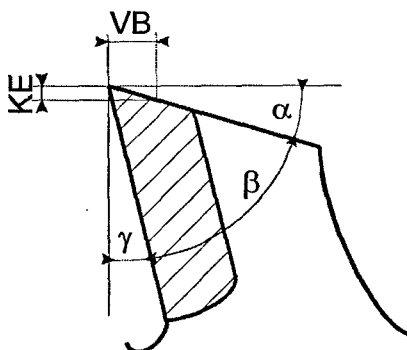
Rys. 3. Narzędzia skrawające z wytworzoną warstwą NCD: a) zespół frezów piłkowych GOPOL (1 - frez z NCD, 2 - frez standardowy), b) frez piłkowy PI-406, c) ostrze kształtowej głowicy frezarskiej GPU-1

Próby skrawania przeprowadzono w warunkach przemysłowych na zautomatyzowanych obrabiarkach do obróbki płyt meblowych. Podstawową ich zaletą była możliwość wykonania prób skrawania jednocześnie dwoma narzędziami, co zapewniało zachowanie powtarzalnych warunków badań. Parametry geometryczne badanych narzędzi i warunki skrawania zestawiono w tablicy 3.

Tablica 3. Geometria narzędzi skrawających i warunki skrawania

Odmiana i typ narzędzi	Zespół frezów piłkowych GOPOL	Frez piłkowy PI-406	Kształtowa głowica frezarska GPU-1
Wymiary geometryczne: - średnica zewnętrzna [mm] - szerokość ostrza [mm] - liczba ostrzy	125 1,8 24	200 4 60	180 40 4
Geometria ostrza: - kąt przyłożenia $\alpha$ - kąt ostrza $\beta$ - kąt natarcia $\gamma$	13° 65° 12°	16° 62° 12°	36° 54° 0°
Warunki skrawania: - prędkość skrawania [m/s] - posuw wzdłużny [m/min]	55 9,5	62 12	60 5
Materiał obrabiany	twarda płyta wiórowa laminowana	twarda płyta wiórowa laminowana	twarda płyta wiórowa laminowana
Obrabiarka	pilarka tarczowa DMMC-40/350	linia obróbki płyt meblowych WILHELM ATENDORE C-45M	linia obróbki płyt meblowych IMA-WEHRMAN D-32683

Jako kryterium oceny badanych narzędzi przyjęto porównywanie okresów ich trwałości, wyrażonych długością skrawania obrobionych płyt meblowych. Przy ocenie trwałości posłużono się geometrycznymi parametrami zużycia ostrza (rys. 4), określonymi przy pomocy mikroskopu warsztatowego. Parametry zużycia określono jako uśrednioną wartość pomiarów 4 ostrzy, trwale oznakowanych i równomiernie rozłożonych na obwodzie narzędzia. Dla określenia okresu trwałości badanych narzędzi posłużono się technologicznym kryterium stępienia ostrza, które wykluczało pojawienie się wykruszeń laminatu na krawędziach obrobionych płyt meblowych.



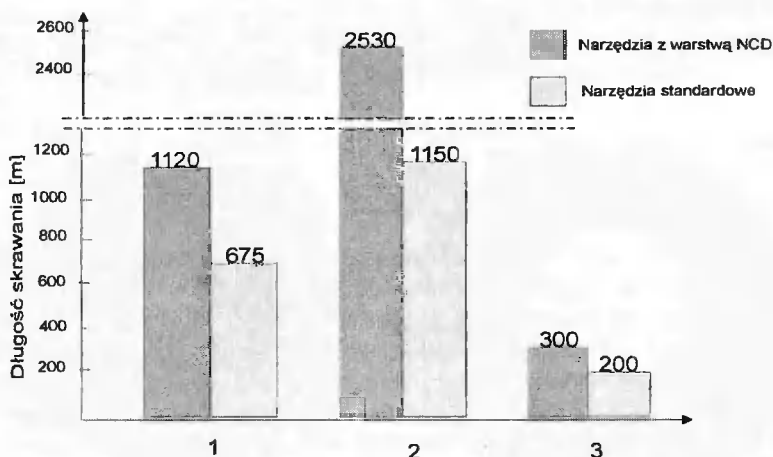
Rys. 4. Geometryczne parametry zużycia ostrza

#### 4. WYNIKI BADAŃ

Charakterystyczne wyniki badań, dotyczące oceny przydatności warstw NCD wytworzonych na narzędziach skrawających do obróbki materiałów drewnopochodnych, przedstawia tablica 4 i rysunki 5 i 6. Dotyczą one porównania geometrycznych parametrów zużycia i okresu trwałości narzędzi z warstwą NCD z identycznymi narzędziami standardowymi nie zawierającymi tych warstw.

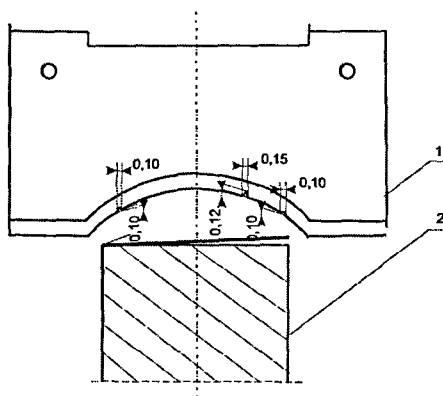
Tablica 4. Parametry zużycia ostrza i trwałość badanych narzędzi

Stan ostrza narzędzia	Parametry zużycia ostrza	Zespół frezów piłkowych		Frez piłkowy PI-406		Kształtowa głowica frezarska GPU-1	
		Standardowy	Z warstwą NCD	Standardowy	Z warstwą NCD	Standardowy	Z warstwą NCD
Przed próbą skrawania	VB	0,03	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02
	KE	0,02	0,02	0,005	0,05	0,01	0,01
Po próbie skrawania	VB	0,15	0,14	0,07	0,07	0,085	0,08
	KE	0,08	0,06	0,04	0,03	0,04	0,03
Procentowy wzrost trwałości narzędzi z warstwą NCD		—	66%	—	120%	—	50%



Rys. 5. Porównanie trwałości narzędzi skrawanych w próbach skrawania: 1 - zespół frezów piłkowych GOPOL, 2 - frez piłkowy PI-406, 3 - kształtowa głowica frezarska GPU-1

Spśród badanych narzędzi najkorzystniejsze rezultaty uzyskano dla frezów piłkowych PI-406. W wyniku zastosowania procesu plazmowego wytwarzania warstw NCD na roboczej powierzchni tych narzędzi uzyskano bowiem ponad 120 % wzrost ich trwałości. Potwierdzony w badaniach bardzo istotny wzrost trwałości freza piłkowego, w porównaniu do dwóch pozostałych typów narzędzi, należy wiązać z większą dokładnością jego ostrzenia oraz wykonywaną operacją obróbkową. Posiadał on bowiem największą ostrość krawędzi skrawającej po ostrzeniu (VB = 0,01 i KE = 0,005) oraz wykonywał rowek o głębokości 8 mm w twardej płycie wiórowej.



Rys. 6. Obszary występowania wykruszeń na krawędzi skrawającej frezarskiej głowicy kształtowej: 1 - ostrze skrawające, 2 - przedmiot obrabiany

W przypadku zespołu frezów, z których jeden był poddany procesowi wytworzenia warstwy NCD uzyskano około 66 % wzrost jego trwałości w porównaniu z współpracującym z nim frezem standardowym. Należy podkreślić, że wzrost ten uzyskano dla frezów o gorszym stanie krawędzi skrawającej po ostrzeniu ( $VE = 0,03$  i  $KE = 0,02$ ) oraz w trudniejszych warunkach skrawania. Realizowana operacja obróbkowa polegała bowiem na przecinaniu twardej płyty wiórowej o grubości 18mm.

Zastosowanie warstw NCD na ostrza skrawające kształtowej głowicy frezarskiej GPU-1 spowodowało wzrost jej trwałości o około 50 %. Relatywnie mniejszy wzrost trwałości - w porównaniu do badanych narzędzi - należy wiązać ze znacznie trudniejszymi warunkami skrawania. Realizowana operacja obróbkowa dotyczyła bowiem zaokrąglania brzegu twardej płyty wiórowej o grubości 18 mm (rys. 6). Występujące w tej operacji punktowe obciążenie krawędzi skrawającej, zmienna prędkość skrawania oraz niejednorodność materiału płyty wiórowej spowodowały, obok ściernego zużycia krawędzi, także jej mikrowykruszenia. Stwierdzone w warunkach badań mikrowykruszenia krawędzi skrawającej determinowały także okres trwałości głowicy frezarskiej.

## 5. WNIOSKI

Opracowano metodę plazmowego wytwarzania warstw nanokrystalicznego diamentu na roboczej powierzchni narzędzi skrawających do obróbki materiałów drewnopochodnych stosowanych w przemyśle meblowym. Przeprowadzono badania sprawdzające przydatność narzędzi skrawających z wytworzoną warstwą NCD. Wyniki badań potwierdziły istotny wzrost ich trwałości (50÷120%) w porównaniu z narzędziami standardowymi.

Dlatego też celowe wydaje się kontynuowanie prac badawczych nad doskonaleniem metody wytwarzania warstw NCD na narzędziach skrawających do obróbki materiałów drewnopochodnych.

## LITERATURA

- [1] Gołąbczak A., Niedzielski P.: Application of Hard Carbon Coating Made by Dense Plasma RF CVD Method for Increase of the Life Metal Slitting Saws. *Journal of Chemical Vapor Deposition*, 3/4(1996).
- [2] Holland L. and Ojha S.M., *Thin Solid Films*, 38(1976) L17, 48(1978) L21.
- [3] Morita T., Banshoya K., Tsutsumoto T., Murase Y.: Cutting of Difficult-to-cut Wood-based Materials with Diamond-coated Camanted Carbide Tools. Difference of Cutting Performance by the Filament Power in the Synthesis of Diamond Film. *Mokuzai Gakkaishi*, 41(1995)12.
- [4] Morita T., Banshoya K., Tsutsumoto T., Murase Y.: Effects of Work Materials on Cutting Performance of Diamond-coated Cemented Carbide Tools. *Forest Products Journal*, 48(1998)5.
- [5] Wysiecki M.: *Nowoczesne materiały narzędziowe*. WNT, Warszawa 1997.

GENERATION OF NANOCRYSTALLINE DIAMOND COATING  
PLASMA SPRAY IN CUTTING TOOLS  
FOR WOOD-BASE MATERIALS

Summary

The present paper presents a method of generation of nanocrystalline diamond coating (NCD) with the high frequency plasma spray in cutting tools with sintered carbide for wood-base materials. There presented the results of investigation into the applicability of the NCD coatings to increase the cutting tools lifetime.

**Key words:** nanocrystalline diamond (NCD), high frequency plasma, sintered carbide, wood-base material, tool lifetime

Badania wykonano w ramach projektów badawczych KBN nr 7 T08C 025 15 oraz nr 7 T08C 038 17.

## BADANIA WPŁYWU WYBRANYCH PARAMETRÓW OBRÓBKİ BEDMM NA JEJ EFEKTY

Bogdan Nowicki<sup>1</sup>, Robert Pierzynowski<sup>1</sup>, Sławomir Spadło<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Wydział Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej,  
Instytut Technologii Maszyn,  
al. Niepodległości 222, 00-663 Warszawa

<sup>2</sup>Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej,  
Katedra Pojazdów i Sprzętu Mechanicznego,  
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

W artykule omówiono wyniki badań obróbki erozyjno-mechanicznej z zastosowaniem elastycznej elektrody roboczej w postaci wirującej szczotki drucianej BEDMM (Brush Electrodischarge Mechanical Machining). Przedstawiono informacje dotyczące możliwości wykorzystania omawianej metody jako obróbki ubytkowej i gładkościowej powierzchni przedmiotów o złożonych kształtach, wykonanych z materiałów trudno obrabialnych metodami obróbki skrawaniem. Zaprezentowano wybrane wyniki badań eksperymentalnych obróbki.

*Słowa kluczowe:* elektroerozja, wygładzanie, elektroda szczotkowa, EDM

### 1. WSTĘP

W procesach wytwarzania części maszyn w wielu przypadkach konieczna jest obróbka elementów o skomplikowanych kształtach i małej lub średniej dokładności. Należą do nich, m.in. odlewane, spawane, lub kształtowane plastycznie elementy maszyn. Po obróbce kształtującej konieczne jest w tych przypadkach usunięcie nadlewów, wypływek itp. oraz nadanie gładkości powierzchni.

Dotychczas stosowane metody obróbki wykańczającej powierzchni odlewów charakteryzują się kilkuetapowym procesem: usuwania wypływek i pozostałości układu wlewowego przy pomocy tarcz szlifierskich, śrutowania, usuwania makronierówności przy pomocy tarcz trzpieniowych [5]. Końcowym etapem jest zwykle obróbka strumieniowo ścierna przy pomocy ziaren korundu lub wibrościerna, w zależności od gabarytów przedmiotów. Trudności związane z przygotowaniem powierzchni wzrastają w przypadku wyrobów wykonanych z materiałów trudno obrabialnych, o dużych wymiarach (brak odpowiedniej wielkości urządzeń) i złożonej geometrii. Ze względu na małą dokładność wykonania większości z tych elementów, ich obróbka mechaniczna metodami tradycyjnymi o określonej kinematyce, tj. frezowaniem, toczeniem, szlifowaniem napotyka na duże trudności. Jest też ekonomicznie nieuzasadniona. Elementy te są najczęściej obrabiane metodami obróbki ręcznej z zastosowaniem, np. elektronarzędzi lub narzędzi napędzanych pneumatycznie, wyposażonych w ściernice trzpieniowe lub tarcze ścierne.



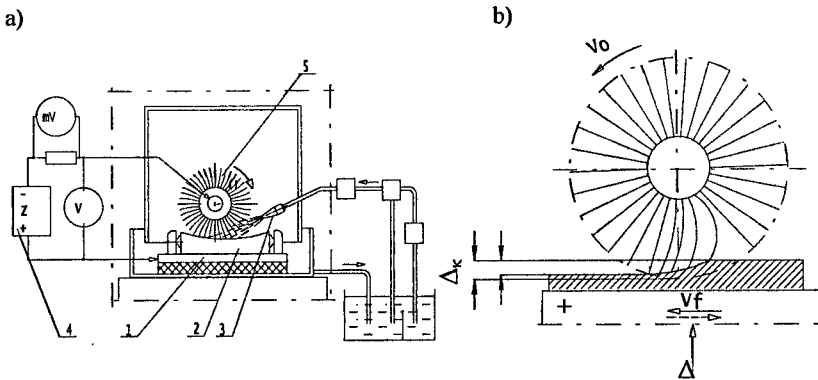
Podstawowymi trudnościami przy mechanizacji tych operacji są: zła obrabialność większości materiałów, z których wykonywana jest część tych elementów, brak baz technologicznych i powtarzalności kształtu, występowanie nieregularnych nadlewów, wypływek, spoin itp. Poszukując zatem metody obróbki tej klasy elementów zwrócono uwagę na możliwość połączenia cech dwóch sposobów obróbki, tj. obróbki anodowo-mechanicznej oraz obróbki szczotkami metalowymi - frezowaniem igłowym.

Zaproponowana metoda [1,3,4], łącząc pozytywne cechy obu w/w. obróbek oraz efekt synergizmu daje nadspodziewanie dobre wyniki, umożliwiając prowadzenie procesu z dużą wydajnością (przy zastosowaniu wysokich parametrów) jak również obróbki gładkościowej powierzchni.

Poprzez proste sterowanie parametrami obróbki, stosując te same urządzenia i ośrodki, można przejść z obróbki zgrubnej stosowanej przy usuwaniu pozostałości układu wlewowego, wypływek, oraz naddatku obróbkowego do obróbki gładkościowej.

## 2. CHARAKTERYSTYKA PROCESU I WARUNKI JEGO REALIZACJI

Schemat stanowiska do obróbki anodowo-mechanicznej przy użyciu elastycznej dyskretnej elektrody wirującej w postaci szczotki drucianej, zwanej dalej BEDMM pokazano na rys.1.a [2,6].



Rys. 1. Obróbka BEDMM; a) schemat stanowiska (1 - stół, 2 - przedmiot obrabiany, 3 - układ zasilania płynem obróbkowym z dyszą doprowadzającą w strefę obróbki, 4 - układ zasilania prądem roboczym, 5 - elektroda robocza); b) podstawowe parametry geometryczno-kinematyczne

W procesie obróbki BEDMM obrabiany przedmiot i narzędzie podłączone są do układu zasilania prądem stałym, przy czym narzędzie w postaci tarczy szczotkowej stanowi katodę zaś przedmiot obrabiany połączony jest z dodatnim biegunem źródła zasilania. Elektroda robocza wykonuje ruch obrotowy a przedmiotowi obrabianemu nadawany jest ruch posuwowy. Do strefy obróbki doprowadzana jest - przy pomocy dyszy - ciecz robocza w postaci wodnego roztworu tzw. szkła wodnego. Wzajemne położenie szczotki i obrabianej powierzchni są tak dobrane (rys. 1b) aby poszczególne druty podczas ruchu po obrabianej powierzchni ulegały ugięciu wywierając nacisk niezbędny do przebicia tworzącej się na powierzchni obrabianego przedmiotu błonki

anodowej oraz inicjacji wyładowania iskrowego, w wyniku którego następuje topnienie, parowanie i usunięcie materiału z wierzchołków nierówności obrabianej powierzchni.

Prezentowany sposób obróbki stanowi połączenie nakładających się na siebie procesów: elektroerozyjnego usuwania materiału roztwarzania elektrochemicznego oraz oddziaływań mechanicznych wpływających na tworzenie się struktury geometrycznej powierzchni.

### 3. BADANIA WPLYWU WYBRANYCH PARAMETRÓW OBRÓBK NA JEJ EFEKTY

#### 3.1. WARUNKI BADAŃ

W oparciu o przeprowadzone rozpoznanie w przemyśle dokonano wyboru stopu AlNiCo - materiału do wytwarzania magnesów stałych. Dotychczas stosowanym sposobem obróbki w przypadku tego typu wyrobów było szlifowanie. Stosowanie tej metody obróbki w przypadku magnesów o niewielkich przekrojach - z uwagi na znaczną kruchość tego stopu - prowadziło do powstawania dużej ilości braków spowodowanych pęknięciami. Obróbka magnesów o większych gabarytach metodą szlifowania jest mało wydajna i nieekonomiczna.

Badania przeprowadzono, używając tego samego rodzaju narzędzia i przy tych samych parametrach mechanicznych.

Celem badań było uzyskanie związków ilościowych pomiędzy parametrami obróbki BEDMM, a jej efektami. Badania obejmowały określenie wpływu warunków obróbki na wydajność i chropowatość powierzchni. Przeprowadzono je używając próbek prostopadłościennych wykonanych z omawianego stopu w środowisku cieczy roboczej w postaci wodnego roztworu krzemianu sodowego  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , o gęstości  $1,15 \text{ g/cm}^3$ .

Temperatura wejściowa wynosiła  $T = 293 \text{ K}$ .

W doświadczeniach wykorzystano jako elektrody robocze tarcze szczotkowe wykonane ze stali St3 o wymiarach:

- średnica zewnętrzna  $D_z = 80 \text{ mm}$
- szerokość  $w = 30 \text{ mm}$
- średnica drutu  $d = 0,3 \pm 0,6 \text{ mm}$

W badaniach zastosowano metodę eksperymentu planowanego w oparciu o program statyczny, zdeterminowany wieloczynnikowy, rotalnie-uniformalny PS/DS-P:  $\lambda(\lambda)$ , wsparty przez komputerowy program do wspomagania planowania eksperymentu CADEX-ESET.

#### 3.2. WIELKOŚCI CHARAKTERYZUJĄCE OBIEKT BADAŃ

Przyjęto program pięciopoziomowy trójczynnikiowy. Ponieważ głównym celem tej części badań była ocena wpływu średnicy drutów szczotki na efekty obróbki na tym etapie zrezygnowano z badań wpływu prędkości obwodowej elektrody i prędkości posuwu. Wyboru czynników wejściowych dokonano w oparciu o kryterium łatwego sterowanie nimi oraz ich wpływu na przebieg procesu.

Jako czynniki wejściowe przyjęto:

- napięcie zasilające  $U, \text{ V}$
- średnicę drutu  $d, \text{ mm}$
- ugęście DES  $\Delta, \text{ mm}$

Czynniki wyjściowe przyjęto tak aby charakteryzowały ilościowe zmiany podstawowych parametrów badanych próbek.

Do badań jako czynniki wyjściowe przyjęto:

- wydajność objętościową obróbki,
- podstawowe parametry charakteryzujące strukturę geometryczną powierzchni:
  - średnie arytmetyczne odchylenie profilu  $R_a$ ,  $\mu\text{m}$ ,
  - maksymalną wysokość profilu chropowatości  $R_t$ ,  $\mu\text{m}$ .

Tablica 1. Zestawienie czynników wejściowych w eksperymencie oraz przedziały ich zmienności

Lp.	Wielkość wejściowa	Oznaczenie zmiennych	Przedział zmienności		Jednostki
			$X_{kmin}$	$X_{kmax}$	
1	U	$x_1$	8,00	16,00	V
2	D	$x_2$	0,20	0,60	mm
3	$\Delta$	$x_3$	0,40	1,00	mm

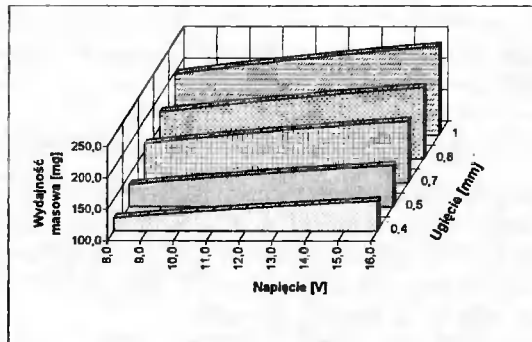
Dla wytypowanego programu eksperymentu na podstawie przyjętych przedziałów zmienności wejściowych parametrów obróbki (Tab. 1) określono wartości parametrów wejściowych (dla przedziału normowania  $[-\alpha, \alpha]$  ( $\alpha = 1,68$ )). Macierz planowania eksperymentu PS/DS – P:  $\lambda(\lambda)$  wygenerowano za pomocą programu CADEX.

W obróbce EDM znany jest efekt biegunowości zasilania. W celu oceny jej wpływu na wyniki obróbki wykonano eksperyment planowany przy biegunowości normalnej (przedmiot obrabiany stanowi anodę) i odwrotnej.

### 3.3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

W celu uzyskania funkcji odpowiedzi wiążącej parametry wejściowe procesu z czynnikami wyjściowymi, wyniki pomiarów poddano komputerowej obróbce metodą krokowej regresji wielokrotnej.

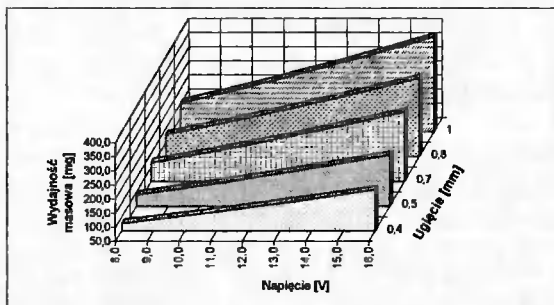
Zależność wydajności obróbki od napięcia i ugięcia dla biegunowości odwrotnej przedstawiono na rys. 2, a normalnej na rys. 3.



Rys. 2. Wpływ napięcia i ugięcia na wydajność masową (dla biegunowości odwrotnej);  $d = 0,4 \text{ mm}$ ,  $v_0 = 3,6 \text{ m/sek.}$ , materiał obrabiany: stop AlNiCo

Przebiegi zmienności ubytku masy w funkcji badanych parametrów dla obu sposobów zasilania mają podobny charakter. Dla badanego stopu zmiana biegunowości na odwrotną powoduje obniżenie wydajności procesu o około 30 %.

Wzrost wydajności wraz ze wzrostem napięcia można wytłumaczyć rosnącą średnią energią wyładowań przy rosnącym napięciu. Maksymalną wydajność obróbki, dla stopu AlNiCo, w badanym obszarze stwierdzono dla napięcia  $U = 16 \text{ V}$  i ugięcia  $\Delta = 1 \text{ mm}$ . Przy niskich wartościach napięcia (rzędu  $8 \text{ V}$ ) wydajność obróbki jest mała. Zjawisko to można uzasadnić tym, że w warunkach niskich napięć występuje względny wzrost udziału oddziaływań termomechanicznych w procesie.

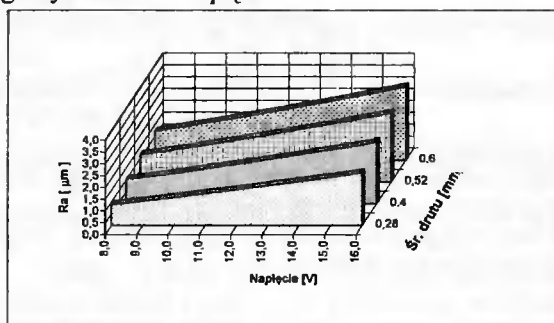


Rys. 3. Wpływ napięcia i ugięcia na wydajność masową w przypadku biegunowości normalnej:  $d = 0,4 \text{ mm}$ ,  $v_0 = 3,6 \text{ m/sek.}$ , materiał obrabiany: stop AlNiCo

Analiza uzyskanych równań regresji wskazuje, że wzrost nacisków spowodowany wyższą wartością ugięć elementów sprężystych powoduje wzrost wydajności procesu.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że najistotniejszym parametrem, decydującym o wydajności objętościowej procesu dla biegunowości normalnej i odwrotnej dla BEDMM jest napięcie obróbki.

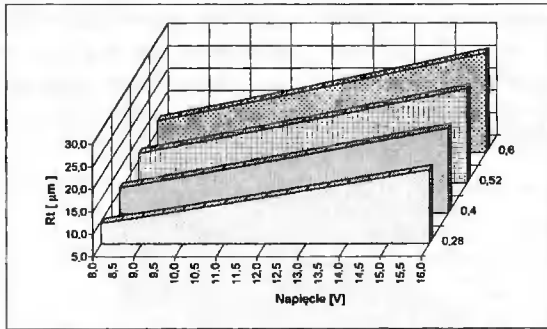
Wrzaz ze wzrostem tego czynnika rośnie jej wydajność, znaczny wpływ napięcia uwidacznia się w górnym zakresie napięć.



Rys. 4. Wpływ napięcia i średnicy drutu na chropowatość powierzchni  $R_a$ ; ugięcie  $\Delta = 0,5 \text{ mm}$ , prędkość obwodowa  $v_0 = 3,6 \text{ m/sek.}$ , materiał obrabiany: stop AlNiCo

Wpływ napięcia zasilania i średnicy elementów szczotki na parametr chropowatości  $R_a$  przedstawiono na rys. 4. Wartość tego parametru silnie zależy od napięcia i rośnie wraz z jego wzrostem. Zależność tę można wyjaśnić podobnie, jak w przypadku wydajności obróbki - wzrostem energii wyładowań. Ten sam wykres ilustruje, że

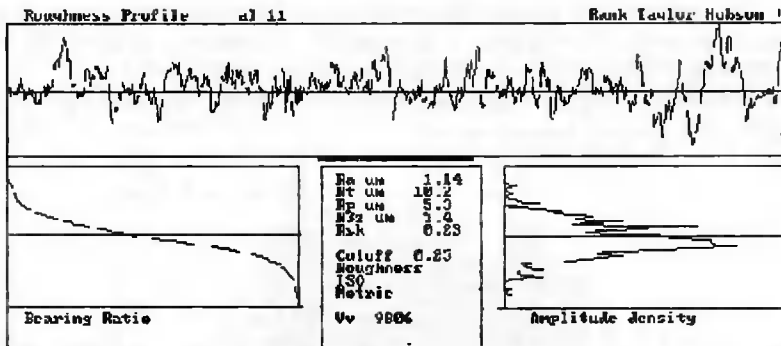
zwiększenie średnicy drutu elektrod roboczych powoduje większą chropowatość. Dla przypadku zilustrowanego omawianym wykresem dwukrotny wzrost średnicy drutu powoduje jednocześnie zwiększenie parametru  $R_a$  o około 50 %.



Rys. 5. Wpływ napięcia i średnicy drutu na wartość parametru  $R_a$ ; ugięcie  $\Delta = 1$  mm, prędkość obwodowa  $v_0 = 3,6$  m/sek., materiał obrabiany: stop AlNiCo

Przykładową zależność parametru  $R_a$  w funkcji napięcia  $U$  i średnicy drutu przedstawiono na rysunku 5. W badanym obszarze zmienności parametrów wejściowych obserwuje się silny wpływ napięcia na badany parametr.

Rysunek 6 przedstawia przykładowy profilogram po obróbce z zastosowaniem niskich parametrów ( $U = 8$  V). Chropowatość ma korzystny profil charakteryzujący się płaskimi wierzchołkami. Efekt ten jest spowodowany oddziaływaniami mechanicznymi elementów szczotki na wyerodowaną powierzchnię.



Rys. 6. Przykładowy profilogram powierzchni po obróbce BEDMM;  $U = 8$  V,  $d = 0,3$  mm, materiał obrabiany: stop AlNiCo

### 3.4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonego eksperymentu planowanego dla obróbki ubytkowej przy zmiennych parametrach  $U$ ,  $d$ ,  $\Delta$  i otrzymanych wynikach wyznaczono równania regresji. Na ich podstawie stwierdzono, że najbardziej istotnym czynnikiem wpływającym na uzyskiwane efekty przy biegunowości odwrotnej („-” na przedmiocie obrabianym) są: napięcie zasilające i ugięcie elementów szczotki. Zwiększenie średnicy drutu powoduje wzrost wydajności procesu.

W przypadku typowej biegunowości („+” na przedmiocie obrabianym) wyniki badań wskazują na decydujący wpływ na efekty obróbki napięcia, a w dalszej kolejności ugięcia  $\Delta$ , i średnicy drutu.

Można to wyjaśnić tym, że wraz ze wzrostem napięcia rośnie natężenie pola elektrycznego w szczelinie, powodując zwiększenie prawdopodobieństwa inicjacji wyładowań, wzrost ich liczby i energii wyładowań. Zwiększa się zatem całkowita moc wydzielania w strefie obróbki, a tym samym wydajność i chropowatość.

Wraz ze wzrostem ugięcia rosną naciski DES elektrody na powierzchnię obrabianą. Powoduje to intensywniejsze niszczenie błonki anodowej i ułatwia inicjację wyładowań. Rośnie również liczba DES znajdujących się w strefie obróbki, co prowadzi do intensywnego zbierania materiału, a w konsekwencji zwiększenie wydajności obróbki.

Analizując wpływ czynników na parametry chropowatości  $R_a$  i  $R_t$  można stwierdzić, że najistotniejszy wpływ na chropowatość powierzchni ma napięcie obróbki, a następnie średnica drutów i ugięcie.

Wzrost napięcia powoduje wzrost chropowatości. Jest to spowodowane stwierdzonym wyżej wpływem napięcia na energię impulsów, a ta z kolei wpływa na wartość wyerodowanego materiału w trakcie poszczególnych wyładowań. Rzeźba powierzchni jest tworzona przez nakładające się kraterki powstające w trakcie poszczególnych wyładowań. Wymiary kraterów decydują o chropowatości powierzchni.

Z przeprowadzonych badań wynika, że BEDMM umożliwia efektywną obróbkę stopów typu AlNiCo. Podczas obróbki tego typu stopów, praktycznie nieobrabialnych mechanicznie osiągnięto wydajność  $w = 250 \div 270 \text{ mm}^3/\text{min}$  oraz chropowatość  $R_a = 1,5 \div 4 \text{ }\mu\text{m}$ .

Na podstawie analizy wartości współczynników równań regresji oraz testu ich istotności można stwierdzić, że najistotniejszy parametrem decydującym o uzyskiwanej wydajności dla stopu AlNiCo jest napięcie obróbki. Wyniki te potwierdzają badania na próbkach wykonanych z żeliwa Ju-5 oraz staliwa Hadfielda.

#### 4. WNIOSKI

Obróbka anodowo-mechaniczna elastyczną elektrodą o strukturze dyskretnej (BEDMM) umożliwia:

- obróbkę przedmiotów o złożonych kształtach, bez zachowania ścisłych związków kinematycznych w układzie obróbczym,
- wykorzystanie elektrod roboczych nie odwzorowujących kształtu przedmiotu,
- realizację obróbki zgrubnej o wydajności rzędu setek  $\text{mm}^3/\text{min}$  i wykańczającej, umożliwiającej uzyskanie chropowatości  $R_a = 0,8 \div 2 \text{ }\mu\text{m}$ , tymi samymi urządzeniami i narzędziami,
- zastosowanie do obróbki zarówno urządzeń typu obrabiarek specjalizowanych, jak i prostych urządzeń w postaci napędzanych elektrycznie, pneumatycznie bądź giętym wałkiem szczotek sprzężonych ze źródłem prądu i układem zasilania cieczą roboczą,
- zmniejszenie nacisków i wibracji w porównaniu z zastosowaniem tarcz ściernych ze spoiwem ceramicznym,
- obróbkę materiałów trudno obrabialnych i odpornych na ścieranie, np. żeliw wysokochromowych, żeliw białych, staliw austenitycznych, stopów na magnezy trwałe typu AlNiCo itp.

## LITERATURA

- [1] Nowicki B., Pierzynowski R., Spadło S.: New Possibilities of Machining and Electrodischarge Alloying of Free-form Surface. Proceedings of International Conference on Advances in Production Engineering, Part II, Warsaw 1998.
- [2] Nowicki B., Pierzynowski R., Spadło S.: The Forming of Surface Roughness by Anodic-mechanical Machining with a Discrete Electrode. Proceedings of CIM'99, Opatija 1999.
- [3] Nowicki B., Spadło S.: Electrodischarge Machining of Free-form Surface by Brush Electrode. Proceedings of 9<sup>th</sup> DAAAM International Symposium, Cluj - Napoca, Romania 1998.
- [4] Nowicki B., Spadło S.: Smoothing the Surface by Brush Electro-discharge Mechanical Machining – BEDMM. Central European Exchange Program for University Studies, Project PL-1- CEEPUS, Kielce 1998.
- [5] Piersig W., Wicht H., Nestler K., Eckert B., Shubert P.: Elektrisches Abtragen von Deckschichten. Fertigungstechnik und Betrieb, Nr 32/1982.
- [6] Spadło S., Nowicki B.: Gładkościowa obróbka erozyjno-mechaniczna stopów trudno skrawalnych elastyczną elektrodą o strukturze dyskretnej. Seminarium nt. „Prezentacja projektów badawczych finansowanych przez Komitet Badań Naukowych”, Radom - Jedlnia Letnisko 1998.

INVESTIGATION INTO BEDMM TECHNOLOGICAL  
PARAMETERS AND EFFECTS

## Summary

The present paper investigates the electro-discharge mechanical machining (BEDMM) with a flexible (brush electrode) discrete electrode. The research results cover unworkable alloys of special properties as well as potential applications of the method presented.

Key words: electro-erosion, smoothing, brush electrode, EDM

## ANALIZA PORÓWNAWCZA PROCESÓW OBRÓBKI UBYTKOWEJ FORM I MATRYC

Kazimierz E. Oczós

Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej,  
Katedra Techniki Wytwarzania i Automatyzacji,  
ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów

W pracy przedstawiono główne sposoby obróbki ubytkowej tłoczników, form i matryc. Dokonano porównania sposobów obróbki lub połączeń od-mian sposobów obróbki pod kątem uzyskiwanej chropowatości powierzchni i niezbędnego czasu obróbki. Omówiono preferowane procesy obróbkowe w różnych grupach oprzyrządowania. Zasygnalizowano tendencję do dokonywania wyboru procesu obróbkowego na podstawie charakterystycznych cech geometrii przedmiotu (features). Podano ideę zintegrowanego gniazda wytwórczego – frezarka HSC/drażarka EDM.

*Słowa kluczowe:* obróbka form i matryc, drażenie EDM, frezowanie z dużymi prędkościami HSC, frezowanie wysoko parametryczne

### 1. WSTĘP

Zdolność przedsiębiorstw do skutecznej rywalizacji na rynku światowym poprzez możliwość oferowania swoich wyrobów po konkurencyjnych cenach ma bez wątpienia dla całego przemysłu wytwórczego szczególne znaczenie. Właśnie budowa narzędzi (głównie tłoczników), form lub matryc, które charakteryzują się na ogół bardzo wysokim udziałem kosztów w produkcji jednostkowej i małoseryjnej, wymaga – w erze coraz krótszych czasów wytwarzania wyrobu i zwiększonej różnorodności rozwiązań technologicznych – drastycznego zmniejszania długości cyklu operacji. Dlatego ograniczanie liczby ogni w łańcuchu procesowym, począwszy od pomysłu wyrobu aż do jego ostatecznej postaci, stanowi od lat kluczowy temat w efektywnym rozwoju jego produkcji.

W obszarze budowy oprzyrządowania produkcyjnego wyróżnia się następujące, główne grupy wyrobów [8,10,14,16]:

- narzędzia do głębokiego tłoczenia (tłoczniaki),
- formy wtryskowe i ciśnieniowe,
- matryce kuźnicze.

Wytwarzanie stalowych, kształtowych elementów oprzyrządowania przeznaczonych do produkcji seryjnej wyrobów (półfabrykatów) zalicza się do szczególnie wymagających zadań obróbkowych. Najwyższe wymagania dotyczą przede wszystkim dokładności i jakości powierzchni. Do najczęściej stosowanych sposobów kształtowania tego rodzaju wyrobów zalicza się obróbkę elektroerozyjną i frezowanie. Można je rów-



niez łączyć ze sobą w celu uzyskiwania możliwie najbardziej ekonomicznych efektów obróbkowych.

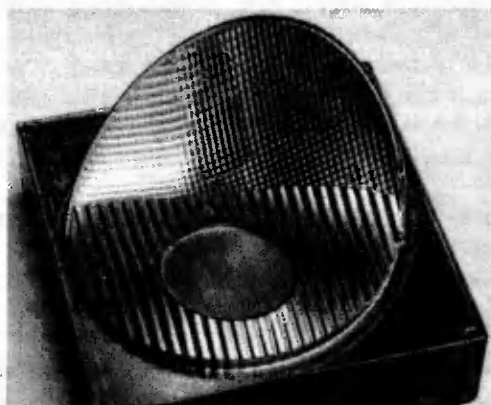
W praktyce spotyka się więc następujące główne sposoby (odmiany) obróbki tłoczników, form i matryc oraz ich połączenia [2,6,8,10,14,16,17,18]:

- kompletne drażnienie elektroerozyjne (kompletne drażnienie EDM),
- frezowanie zgrubne i następujące po nim wykańczające drażnienie EDM,
- zgrubne drażnienie EDM i następujące po nim frezowanie wykańczające,
- frezowanie kompletne.

Oprócz tych zasadniczych sposobów i ich połączeń istnieją też inne, np. zgrubne i wykańczające frezowanie kształtowanego przedmiotu z następnym drażnieniem EDM głębokich, wąskich rowków w celu wytwarzania żeber usztywniających (np. w przypadku form wtryskowych i ciśnieniowych). Dwoma istotnymi parametrami w odniesieniu do geometrii formy czy matrycy lub ich fragmentu są: maksymalny *stosunek głębokości do szerokości* (w odniesieniu do frezu – stosunek jego długości  $l$  do średnicy  $D$ ) oraz *stosunek powierzchni do objętości* [18].

**Obróbka elektroerozyjna (EDM)** realizowana za pomocą jej podstawowej odmiany – **drażnienia EDM**, w którym przedmiot obrabiany kształtowany jest przez odwzorowywanie w nim geometrycznego profilu elektrody roboczej, staje się szczególnie przydatna – w porównaniu z frezowaniem – przy kształtowaniu narzędzi i form wykonywanych z materiałów w stanie twardym oraz występowaniu głębokich i wąskich konfiguracji obrabianych przedmiotów. Wynika to przede wszystkim z pomijalnie małych sił procesu obróbkowego - niezależnie od stanu ulepszenia względnie zahartowania materiału - i wysokiej niezawodności procesu, co jest szczególnie ważne w przypadku pracy bezzałogowej.

Oprócz niewątpliwych walorów EDM wykazuje jednak określone wady, z których na plan pierwszy wysuwa się długość łańcucha procesowego (wykonywanie frezowaniem elektrod miedzianych - rys. 1 lub grafitowych, erodowanie materiału formy, ręczne wykończenie powierzchni) i związana z tym mała elastyczność podczas wprowadzania koniecznych zmian. Do ujemnych cech EDM zalicza się również mniejszą – w porównaniu z frezowaniem – produktywność oraz uszkodzenia warstwy wierzchniej na erodowanych powierzchniach.



Rys. 1. Elektroda miedziana do drażnienia EDM formy reflektora wykonana frezowaniem HSC z użyciem trzpieniowego freza kulistego o średnicy 1 mm

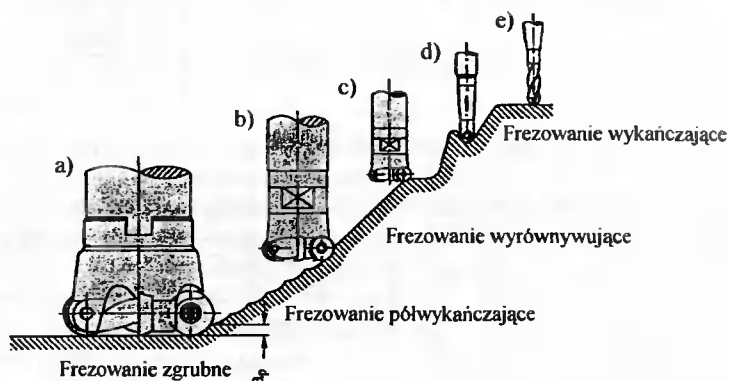
Ogólnie można przyjąć, że przewaga EDM jest widoczna zwłaszcza wówczas, gdy zachodzi potrzeba wykonania wnęki (gniazda) formy z małymi wykrojami i promieniami oraz dużym stosunkiem głębokości do szerokości (długości do średnicy) wynoszącym  $l/D > 8 : 1$  [2,12].

Frezowanie tłoczników, form czy matryc można praktycznie realizować jako [1,4,5,13,15]:

- frezowanie konwencjonalne (NC),
- frezowanie ze zwiększonymi prędkościami skrawania i posuwu (HSC), znacznie przekraczającymi prędkości stosowane w konwencjonalnej praktyce produkcyjnej,
- frezowanie wysoko parametryczne (określane różnymi akronimami HSC, HSM lub HVM) z prędkościami obrotowymi wrzeciona  $n_w > 10000 \text{ min}^{-1}$ , średnimi prędkościami posuwu  $v_f > 10 \text{ m/min}$  i przyspieszeniami  $a > 3 \text{ m/sek}^2$ , prędkościami szybkiego przesuwu rzędu  $30 \text{ m/min}$ , jak też mocą wrzeciona  $P_w > 15 \text{ kW}$ .
- frezowanie wysoko parametryczne materiałów w stanie twardym (frezowanie HSC na twardo).

Jedną z najbardziej spektakularnych zmian w łańcuchu procesowym wytwarzania form i matryc jest zwiększające się zastępowanie drażenia EDM bezpośrednim frezowaniem HSC materiału w stanie twardym. Można przyjąć, że obecne ekonomiczne granice stosowania frezowania HSC na twardo sięgają – z punktu widzenia zużycia narzędzia – do materiałów o twardości do 54 HRC, a z punktu widzenia stabilności narzędzia – do wartości stosunku długości trzpienia  $l$  do średnicy freza  $D$  wynoszącego  $5 : 1$  [2,4,12].

W procesie wytwarzania tłoczników, form i matryc najczęściej stosowanymi typami narzędzi są frezy trzpieniowe (rys. 2): **walcowo-czołowe**, **torusowe** i **kuliste** [3,7,11,15]. Na ostrza skrawające narzędzi, wykorzystywanych w procesie HSC, przede wszystkim używane są drobnoziarniste węgliki spiekane gatunku K20 ÷ K05, pokrywane w procesie PVD monowarstwą TiAlN o grubości  $2 \div 3 \mu\text{m}$  oraz polikrystaliczny regularny azotek boru (PKB).



Rys. 2. Przykładowe frezy stosowane do różnych odmian frezowania: a-c) czołowe frezy torusowe (4-ostrzowe), d) trzpieniowy frez kulisty z płytką ostrzową z węglików spiekanych, e) trzpieniowy frez kulisty jednolity z węglików spiekanych

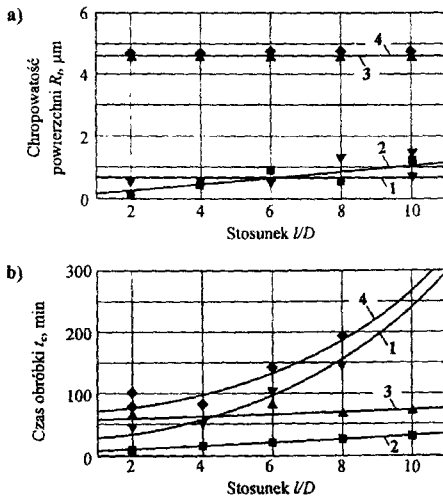
## 2. PORÓWNANIE I ZASADY WYBORU PROCESÓW OBRÓBKOWYCH

Wybór sposobu obróbki bądź połączenia odmian różnych sposobów obróbki następuje każdorazowo dla danego przypadku ich zastosowania do kształtowania tłoczniaka, formy lub matrycy. Zależy on od wielu czynników w tym, m.in. od geometrii przedmiotu, rodzaju materiału obrabianego, jakości powierzchni, dokładności wymiarów i kształtu, czasu obróbki itp. Przy wyborze procesu wytwarzania zostają określone także późniejsze parametry eksploatacyjne kształtowanego przedmiotu, np. żywotność formy i liczba wytwarzanych w niej części, oraz koszty utrzymania formy w stanie przydatnym do produkcji półfabrykatów.

### 2.1. PORÓWNANIE POŁĄCZEŃ RÓŻNYCH ODMIAN OBRÓBKOWYCH UBYTKOWEJ

Interesująco przedstawia się porównanie różnych sposobów obróbki i ich połączeń pod kątem uzyskiwanej chropowatości powierzchni i niezbędnego czasu na realizację identycznego zadania obróbkowego z zastosowaniem frezu kulistego o średnicy  $D = 12$  mm (obróbka zgrubna) i 6 mm (obróbka wykańczająca) lub elektrody z drobno-ziarnistego grafitu i dielektryku na bazie oleju [6].

Na rysunku 3a pokazano uzyskiwane chropowatości powierzchni obrabianego materiału przy różnych stosunkach  $l/D$  (głębokość/szerokość wnęki) i różnorodnych połączeniach obróbki ubytkowej. Chropowatość wykańczająco drażnionych EDM powierzchni (niezależnie od rodzaju obróbki poprzedzającej) wynosi ok.  $4,5 \mu\text{m}$ .



Rys. 3. Wpływ różnych połączeń odmian sposobów obróbki ubytkowej stali 56 NiCrMoV7 (45 HRC) przy zmiennych stosunkach  $l/D$  na: a) chropowatość powierzchni, b) czas obróbki; 1 - zgrubne drażnienie EDM/frezowanie wykańczające, 2 - frezowanie zgrubne/wykańczające, 3 - frezowanie zgrubne/wykańczające drażnienie EDM, 4 - zgrubne/wykańczające drażnienie EDM

Z drugiej strony frezowane wykańczająco powierzchnie wykazują różnice w zależności od rodzaju uprzedniej obróbki. Chropowatość powierzchni zgrubnie drążonych EDM, a następnie frezowanych wykańczająco wynosi ok.  $0,5 \mu\text{m}$ , natomiast przy zgrubnie i wykańczająco frezowanych wnękach matrycy obserwuje się progresywny wzrost chropowatości w kierunku większych stosunków  $L/D$ . Wynika to z faktu, że podczas zgrubnego drążenia EDM jest wytwarzany stały – niezależny od geometrii wnęki – naddatek, a z kolei frezowanie zgrubne pozostawia, przede wszystkim w zaokrągleniach, zróżnicowany naddatek. Wraz z rosnącą skłonnością do drgań (ze wzrostem stosunku  $L/D$ ) pogarsza się jakość powierzchni wnęk matryc frezowanych zgrubnie i wykańczająco.

Rysunek 3b przedstawia czas obróbki przy poszczególnych połączeniach jej odmiann. Ogólnie rośnie on ze wzrostem głębokości wnęki. Jedynie przy frezowaniu zgrubnym połączonym z wykańczającym drążeniem EDM uzyskiwane czasy obróbki są zbliżone do stałych. Nakład czasu na frezowanie zgrubne wnęk jest zdecydowanie podporządkowany obróbce wykańczającej. Ponieważ czas wykańczającego drążenia EDM jest praktycznie niezależny od głębokości wnęki łączne czasy obróbki okazują się prawie jednakowe. Z kolei czas niezbędny na realizację zgrubnego drążenia EDM – jako pierwszego kroku obróbkowego – silnie rośnie ze zwiększeniem się stosunku  $L/D$ , gdyż wydajność ubytkowa drążenia EDM jest relatywnie niska. Najmniejszy nakład czasu występuje w przypadku kompletnie frezowanych wnęk.

W odniesieniu do form i matryc z dużymi stosunkami kształtowanej powierzchni do objętości usuwanego materiału drążenie EDM jest ekonomiczniejsze od frezowania. Nakład czasu potrzebnego na frezowanie rośnie liniowo wraz ze wzrostem powierzchni, w przypadku zaś drążenia EDM tylko jedynie nieznacznie [18].

Przy stosunkach  $L/D > 10$  niezawodny przebieg frezowania wnęk matryc czy form nie jest praktycznie możliwy i wówczas drążenie EDM okazuje się niezbędne. Ogólnie z uwagi na wysoką produktywność frezowania powinno ograniczyć się stosowanie drążenia EDM jedynie do tych kształtów geometrycznych obrabianego przedmiotu, dla wykonania których niezawodne przeprowadzenie procesu frezowania nie jest realne.

## 2.2. PREFEROWANE PROCESY OBRÓBKOWE W RÓŻNYCH GRUPACH OPRZYRZĄDOWANIA

W poszczególnych, głównych grupach wytwarzanego oprzyrządowania preferencje dla sposobów obróbki wykazują duże zróżnicowanie [10,16].

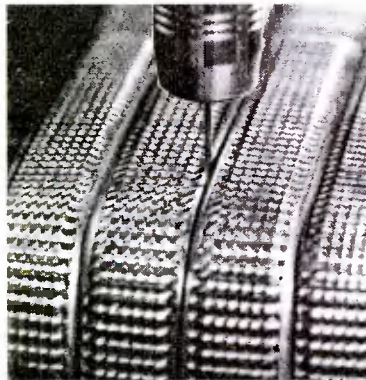
Podczas obróbki **narzędzi do głębokiego tłoczenia (tłoczników)** dominującą rolę - w porównaniu z drążeniem EDM - spełnia frezowanie. Płaskie geometrie obrabianych narzędzi i najczęściej łatwo skrawalne materiały oferują wręcz idealne warunki dla wysoko parametrycznego frezowania.

W odniesieniu do **matryc kuźniczych** drążenie EDM jest nadal szeroko rozpowszechnione i tradycyjnie stosowane, zwłaszcza do materiałów o dużej wytrzymałości. Jednakże w przypadku niewielkich głębokości konturów i relatywnie dużych, wklęsłych promieni istnieje możliwość efektywnego wykorzystywania frezowania kompletnego.

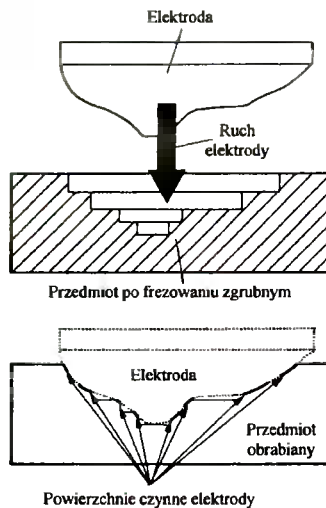
**Formy wtryskowe i ciśnieniowe**, częściowo ze skrajnie filigranowymi geometriami są wyzwaniem dla frezowania. Smukłe i w następstwie tego niestateczne narzędzia frezarskie o małej średnicy świadczą niekiedy o ograniczonej niezawodności procesu (rys.4). W celu osiągnięcia ekonomicznych prędkości skrawania i posuwu wymagane są też prędkości obrotowe wrzeciona, standardowo nie występujące w zakładach budowy

oprzyrządowania. Grupa tych wyrobów wymaga zatem ponownego rozważania sposobów obróbki, tj. frezowania i drążenia EDM po to, aby na nowo zdefiniować granice technologicznej produktywności, opłacalności i niezawodności procesu.

Oprócz geometrycznych warunków brzegowych, z wymagań nakładanych na wytwarzane wyroby w późniejszej ich eksploatacji wynikają wskazówki dotyczące wyboru właściwego procesu obróbkowego. Materiał, jakość powierzchni lub właściwości warstwy wierzchniej mogą stanowić decydujące czynniki dla wyboru frezowania HSC lub drążenia EDM. Przy połączeniu odmian obu tych sposobów (rys. 5) należy przede wszystkim zwrócić uwagę na różnorodne oddziaływanie na właściwości warstwy wierzchniej obrabianych przedmiotów.



Rys. 4. Frezowanie HSC na twardo formy wtryskowej za pomocą smukłego (o dużym stosunku  $l/D$ ) frezu trzpieniowego



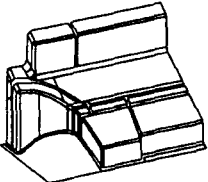
Rys. 5. Istota zastosowania połączenia odmian sposobów obróbki - frezowanie zgrubne/ wykańczające drążenie EDM

### 2.3. WYBÓR PROCESU OBRÓBKOWEGO NA PODSTAWIE CHARAKTERYSTYCZNYCH CECH GEOMETRII PRZEDMIOTU (*FEATURES*)

Decyzje dotyczące wyboru technologii obróbki są na ogół podejmowane na podstawie doświadczeń (często bardzo osobistych) w połączeniu z wieloma indywidualnymi warunkami brzegowymi. Strukturalny zapis podstaw wyboru jest potrzebny, aby ułatwiać znajomość – neutralnych personalnie – możliwości technologicznych, granic i zależności oraz uczynić je dyspozycyjnymi podczas realizacji całego łańcucha procesowego.

Do realizacji tego celu nadają się cechy charakterystyczne technologii (*features*), które kojarzą informacje o wymaganiach i właściwościach wyrobu z wariantami procesu wytwarzania [2, 10]. W procesie wytwarzania *features* wspomagają planowanie i realizację różnych technologii wykonywania wyrobu. Pod pojęciem technologicznych *features* rozumie się grupę powiązanych elementów geometrycznych, które są ściśle powiązane jedną określoną metodą lub jednym określonym procesem. Dają się one wykorzystać do tego, aby zdecydować o wyborze właściwej metody lub właściwego sposobu do wytworzenia geometrii przedmiotu.

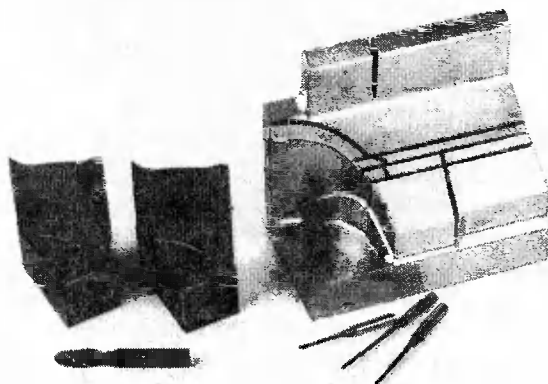
Jeżeli technologiczne *features* mają „zadszczynić” wymaganiom budowy form czy matryc, to każdy poszczególny element geometrii przedmiotu (np. żebra wzmacniające) musi pozostawać w łączności z kolejnością wytwarzania. Połączenie to jest dodatkowo utrudnione ze względu na odwrócenie relacji geometrycznych przy przejściu od przedmiotu do jego formy. Z tych powodów nie zostało jeszcze dokonane daleko idące rozpoznanie *features* wytwarzanego narzędzia w oparciu o kompleksowe powiązania, pomimo coraz sprawniejszych systemów CAD/CAM. Niektóre z nich oferują już funkcje do automatycznego identyfikowania zaokrąglenia i kwalifikowania konturów, jak też do wyznaczania odpowiednich strategii obróbki. Wówczas do rozgraniczania sposobów frezowanie/drażenie EDM służą ważne geometrie rowków, stanowiące funkcje systemowe, w dalszym ciągu ulepszone. Ponadto jest konieczna powierzchniowa i objętościowa analiza geometrii przedmiotu.

<p>Szczegół przedmiotu (formy)</p> 	<p>Cecha charakterystyczna - ROWKI</p> <p>Materiał 1.2311 (40CrMnMo7)</p> <p>Wytrzymałość na rozciąganie <math>R_m = 1050 \text{ N/mm}^2</math></p>										
<p>Cechy charakterystyczne geometrii przedmiotu (<i>features</i>)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zaokrąglenia</li> <li>• Rowki</li> <li>• Otwory</li> <li>• Pochylone powierzchnie boczne</li> <li>• Płaskie powierzchnie boczne</li> <li>• Powierzchnie wklęsłe</li> <li>• Powierzchnie wypukłe</li> </ul>	<p>Geometria rowka</p> <p>Pochylenie ścianek <math>\alpha = 0,5\alpha</math></p> <p>Szerokość rowka <math>b = 2 \text{ mm}</math></p> <p>Głębokość rowka <math>t = 20 - 80 \text{ mm}</math></p> <p>Warianty obróbki</p> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="text-align: center;">①</td> <td style="text-align: center;">①</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Frezowanie HSC wnęki formy i rowków do <math>t = 30 \text{ mm}</math></td> <td style="text-align: center;">Kompletne frezowanie HSC</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">▼</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Drażenie EDM rowków <math>t &gt; 30 \text{ mm}</math></td> <td style="text-align: center;">①</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">Kompletne drażenie EDM</td> </tr> </table>	①	①	Frezowanie HSC wnęki formy i rowków do $t = 30 \text{ mm}$	Kompletne frezowanie HSC	▼		Drażenie EDM rowków $t > 30 \text{ mm}$	①		Kompletne drażenie EDM
①	①										
Frezowanie HSC wnęki formy i rowków do $t = 30 \text{ mm}$	Kompletne frezowanie HSC										
▼											
Drażenie EDM rowków $t > 30 \text{ mm}$	①										
	Kompletne drażenie EDM										

Rys. 6. Planowanie technologii obróbki w oparciu o cechy charakterystyczne (*features*) geometrii przedmiotu (formy lub matrycy) na przykładzie geometrii rowka [10]

Elementy geometryczne są interaktywnie zaznaczane na ekranie monitora i przyporządkowywane do określonych *features* (przytoczonych na rys. 6), dopóki wymagane funkcje nie zostaną udostępnione użytkownikowi.

Gdy nastąpi zidentyfikowanie geometrycznych *features* mogą one zostać sprzężone z informacjami technologicznymi i zastosowane do planowania procesu wytwarzania. Przy obu sposobach – frezowaniu HSC i drążeniu EDM – pozostaje do rozstrzygnięcia problem, w którym przypadku powinno obrabiać się tylko frezowaniem lub tylko drążeniem, a kiedy jest korzystne połączenie obu sposobów. Dla przedstawionego na rys. 6 szczegółu kształtowanej formy wtryskowej z wąskimi rowkami różnej głębokości i bardzo małymi pochyleniami ścianek, zostały przeanalizowane 3 warianty obróbki. Z jednej strony kompletne frezowanie HSC nie wchodziło w rachubę ze względu na duże głębokości rowków, z drugiej zaś kompletne drążenie EDM byłoby zbyt czasochłonne z powodu objętości usuwanego materiału. Dlatego też zostało wybrane połączenie frezowania HSC gniazda formy i rowków do głębokości  $t = 30$  mm oraz drążenie EDM rowków o głębokości  $t > 30$  mm (rys. 7).

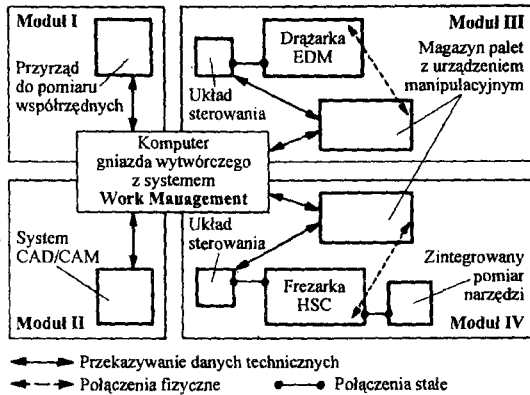


Rys. 7. Frezy trzpieniowe i elektrody do obróbki ubytkowej przedmiotu z rysunku 6 (firma Physen Nothelfer) – [9]

Przy wyborze elementu geometrii w systemie CAD/CAM, np. głębokiego rowka, zostaje znaleziona przez system propozycja obróbki łącznie z oczekiwanymi rezultatami, relatywnymi kosztami oraz z uwzględnionymi warunkami brzegowymi.

### 3. ZINTEGROWANE GNIAZDO WYTWÓRCZE: FREZARKA HSC – DRAŻARKA EDM

Jeżeli wziąć pod uwagę, że już przy mniejszych formach wtryskowych z wieloma zębami usztywniającymi występuje potrzeba zastosowania podczas drążenia EDM, nawet do 300 elektrod kształtowych, wówczas wyraziście uwidacznia się nakład czasu niezbędny do realizacji konwencjonalnego kształtowania geometrii przedmiotu (formy). W celu rozwiązania tego problemu Instytut Fraunhofera IPT w Aachen we współpracy z konsorcjum przemysłowym zbudował zintegrowane gniazdo wytwórcze (rys. 8).



Rys. 8. Struktura zintegrowanego gniazda wytwórczego - frezarka HSC/drażarka EDM (Fraunhofer IPT, Aachen)

Ze sprzężenia frezowania HSC i drążenia EDM powstał system, który obejmuje – oprócz wielu operacji obróbkowych – generowanie zbiorów danych NC, pomiar i ustawianie, jak też końcową kontrolę jakości przedmiotu. Dzięki systemom paletyzacji zminimalizowano błędy, których przyczyną są czynności ustawne przedmiotów i elektrod. Przedmioty i elektrody można ustawiać poza obrabiarkami, likwidując czasy ich przestoju. Zastosowanie skomputeryzowanych palet stwarza ponadto możliwość wprowadzenia zmian bezzałogowych, głównie nocnych. **System Work Management**, służący do celowego sterowania przebiegiem procesu wytwarzania, sprawia, że sprzężone zespoły frezarki HSC i drążarki EDM są znacznie elastyczniejsze w przypadku potrzeby dokonywania nieprzewidzianych zmian, poprawek czy napraw [10].

## LITERATURA

- [1] Barthelson C.: High Velocity Comes to Die Machining. *Manufacturing Engineering*, 121(1998)1.
- [2] Bates Ch.: Moldmaking's Dynamic Duo. *American Machinist*, 143(1999)7.
- [3] Bellmann B.: Hartmetallwerkzeuge zum Hartfräsen. *VDI-Z, Special Werkzeuge*, August 1999.
- [4] Fritsche K.: HSC rationalisiert Formenbau. *Werkstatt u. Betrieb*, 130(1997)6.
- [5] Hock S.: Hochgeschwindigkeitsbearbeitung im Formenbau: Erfahrungen aus der Praxis. Tagungsband – "Hochleistungswerkzeuge: Schlüssel für innovative Zerspantechnologien", Düsseldorf, 3-4 November 1998; *VDI Berichte*, Nr. 1399, 1998.
- [6] Hock S.: Leistungsfähige Prozesse im Werkzeug- und Großformenbau. *Werkstatt u. Betrieb*, 131(1998)1/2, 28÷34.
- [7] Kieninger A.: Tool System for HSC-processing in Die, Mould and Model Making. *EPE*, 23(1999)1.
- [8] Klocke F.: The process sequence in tool and diemaking. *Proc. 12th Inter. Symp. ISEM XII, Aachen, May 11-13, 1998; VDI Berichte*, Nr. 1405, 1998.



- [9] Klocke F., Bilsing A.: Ingenieurdienstleistungen im Werkzeugbau. VDI-Z, Special Werkzeug- und Formenbau, November 1999.
- [10] Klocke F., Nöken St., Altmüller St., Knodt St.: Featurebasierte Technologieplanung für die Verfahrenskombination HSC-Fräsen – Senkerodieren. wt-Werkstattstechnik, 89(1999)7/8.
- [11] Langenbach K., A. Kieninger: Genau mit PKD- und CBN-Fräsen. Werkstatt u. Betrieb, 132(1999)1/2.
- [12] Malle K.: HSC-Fräsen oder EDM? VDI-Z, 140(1998)6.
- [13] Mason F.: High-speed Forging Die Milling is Coming. Manufacturing Engineering, 118(1997)6.
- [14] Oczóś K. E.: Charakterystyka i zasady wyboru procesów obróbki ubytkowej narzędzi, form i matryc. Mechanik, 73(2000)4.
- [15] Oczóś K. E.: Postęp w obróbce skrawaniem. Cz. I. Obróbka z dużymi prędkościami (*High Speed Machining*). Mechanik, 71(1998)3.
- [16] Wälder G.: New Technologies and EDM. Proc. 12th Inter. Symp. ISEM XII, Aachen 1998; VDI Berichte, Nr. 1405, 1998.
- [17] Weinert K., Albersmann F., Finke M., Guntermann G.: Prooptimierung bei der Formherstellung. wt-Werkstattstechnik, 89(1999)7/8.
- [18] Weinert K., Guntermann G.: Bearbeiten von Freiformflächen. Werkstatt u. Betrieb, 131(1998)9.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF DIES AND MOULD MACHINING

### Summary

The present research presents the main methods of dies and mould machining and compares the methods of machining or their combinations in respect to the final surface roughness and time of machining required. The analysis included machining processes preferred with specific tool groups and it mentioned a trend towards object-geometry-features-related machining selection and, finally, suggested an integrated machine group - HSC milling machine/EDM sinking machine.

Key words: dies and mould machining, EDM sinking, high-speed milling, high-parameter milling

## ISTOTA, ZNACZENIE I ROZWÓJ HYBRYDOWYCH PROCESÓW OBRÓBKU UBYTKOWEJ

Kazimierz E. Ocoś

Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej,  
Katedra Technik Wytwarzania i Automatyzacji,  
ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów

W artykule zaprezentowano potrzebę rozwoju ubytkowych procesów wytwarzania i przekraczania dotychczasowych granic technologicznych na tle rosnącej tendencji do wprowadzania nowych wyrobów i realizacji związanych z ich produkcją wymagań. Podano definicję procesu hybrydowego oraz omówiono istotę i osobliwości przykładowych procesów hybrydowych. Zwrócono uwagę na zapewnienie powtarzalności procesów hybrydowych oraz możliwości i tryb ich przemysłowego wdrażania. Wskazano na niezbędne warunki zapewnienia przemysłowej użyteczności procesów hybrydowych.

*Słowa kluczowe:* granica technologiczna procesu obróbkowego, proces hybrydowy obróbki ubytkowej, obróbka z nagrzewaniem laserowym, obróbka ze wspomaganie ultradźwiękowym, szlifowanie elektrochemiczne, ECM-EDM, szlifowanie z ECM ściernicy, powtarzalność procesów hybrydowych

### 1. WSTĘP

Sytuację w przedsiębiorstwach produkcyjnych i ich zdolność do współzawodniczenia można w głównej mierze charakteryzować stopniem aktywności innowacyjnej w odniesieniu do produkowanych wyrobów i stosowanych sposobów wytwarzania. Skuteczne wprowadzenie na rynek nowych wyrobów może zostać zrealizowane – z ekonomicznego punktu widzenia – tylko wtedy, gdy odpowiednio wcześniej zostaną rozpoznane i przetworzone wszystkie możliwości optymalizujące zarówno wyrób, jak i jego metodę produkcji. Możliwości techniczne, wywodzące się z tradycyjnych podejść do optymalizacji procesów wytwórczych są jednak w wielu przypadkach niewystarczające, głównie wówczas, gdy rozpatrywane wyroby odznaczają się złą obrabialnością względnie nie mogą być wytwarzane z wykorzystaniem dotychczas znanych sposobów.

W celu utrzymania konkurencyjności swojej produkcji, przedsiębiorstwa powinny ciągle doskonalić istniejące procesy wytwarzania i ogniskować swoją uwagę na nowych wyrobach. Fakt, iż wprowadzeniu takich wyrobów zazwyczaj towarzyszy także stosowanie nowych, często wysoko wytrzymałych materiałów, prowadzi w następstwie do istotnego wzrostu zapotrzebowania na nowe, wysoko wydajne procesy obróbkowe i urządzenia produkcyjne. Oprócz optymalizacji znanych już i stosowanych procesów muszą być konsekwentnie doświadczane i wdrażane nowe podejścia do technologii

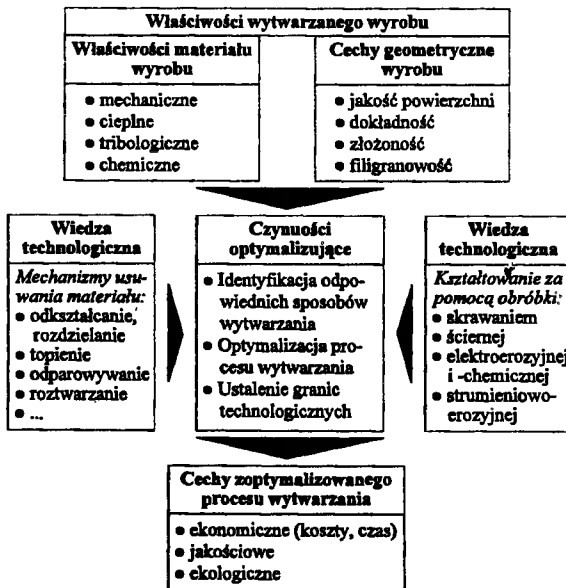
obróbki ubytkowej. Tego rodzaju nowe możliwości ujawniają się przy wprowadzaniu, tzw. procesów **hybrydowych**, dzięki którym, wykorzystując już istniejące i zoptymalizowane sposoby obróbki osiąga się dalsze, wymierne podwyższenie wydajności ubytkowej poprzez jednoczesne doprowadzenie innych form energii do strefy oddziaływania procesu.

## 2. NOWE WYROBY I ICH WYMAGANIA

### 2.1. OKREŚLENIE ZOPTYMALIZOWANEGO PRZEBIEGU PROCESU WYTWARZANIA

Coraz więcej nowych wyrobów wytwarza się z trudno obrabialnych materiałów, takich jak: stopy tytanu, stopy niklu, ceramika specjalna, materiały kompozytowe, w tym wzmocnione różnymi włóknami itp. Wiele z nich odznacza się złożoną geometrią, zminimalizowanymi wymiarami względnie wysokimi wymaganiami jakościowymi. Jako spektakularne przykłady tego rodzaju wyrobów można wymienić elementy silnika lotniczego, wykonane z trudno obrabialnych stopów metalowych, ceramiczne łożyska walcowe stosowane w skrajnie trudnych warunkach pracy, czy mikroturbiny wytwarzane z ceramiki specjalnej [17, 8, 10, 19, 32].

Wynikające z tych wymagań technicznych zadania, dotyczące procesu produkcji trudno kształtowanego wyrobu, z reguły wymagają do ich rozwiązania nie tylko rozległej wiedzy technologicznej, ale również bogactwa pomysłów i gotowości innowacyjnej producenta. Dochodzenie do najwłaściwszego przebiegu procesu wytwarzania rozpatrywanego wyrobu należy rozpocząć od identyfikacji odpowiednich technologii, służących wyłącznie spełnieniu postawionych zadań obróbkowych (rys. 1).



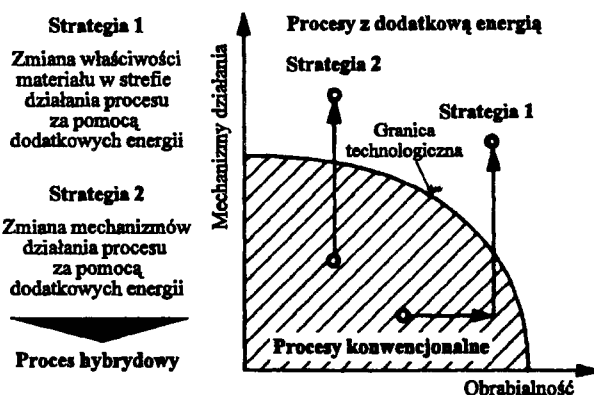
Rys. 1. Tryb dochodzenia do zoptymalizowanego przebiegu procesu wytwarzania wyrobu

Kolejną czynność stanowi optymalizacja procesów wytwarzania i ich przebiegów obowiązująca jedynie do ustalonych granic technologicznych, które wynikają często z niekorzystnego połączenia właściwości materiału i sposobu obróbki. Przykładowo stopy tytanu z powodu generalnie złej obrabialności dają się skrawać toczeniem lub frezowaniem tylko z niewielką wydajnością. Ponadto ich silna skłonność do umocnienia przez zgniot i adhezji do ostrza skrawającego określają, przede wszystkim w odniesieniu do obróbki zgrubnej, granice zdolności wytwórczej. W przypadku, np. ceramiki  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , jej wysoka twardość i ograniczona ciągliwość uniemożliwiają stosowanie normalnego toczenia i frezowania. Jeśli zaś chodzi o wytwarzanie mikroczęści, w dodatku z materiałów ceramicznych, można mówić jedynie o obróbce ze skrajnie małymi wartościami sił, występujących w danym procesie w celu uniknięcia ich uszkodzeń.

Ogólnie tego rodzaju uwarunkowania decydują o wyborze odpowiedniego sposobu wytwarzania i ustalaniu granic technologicznych. Tworzy to sytuację wyjściową dla procesu produkcyjnego rozpatrywanych wyrobów, służąc – oprócz tego – za podstawę jego oceny z punktu widzenia efektów ekonomicznych i oddziaływań ekologicznych, jak też osiągalnych walorów jakościowych.

## 2.2. PRZEKRACZANIE GRANIC TECHNOLOGICZNYCH

Ocena zdolności realizacji procesu wytwarzania przez dany sposób obróbkowy, a przy tym jego zdolności wytwórczej, może zostać dokonana tylko po uwzględnieniu każdorazowego zadania obróbkowego, względnie obrabialności materiału. Na rys. 2 pokazano te zależności. Przedstawiono ponadto od strony jakościowej granicę technologiczną, po przekroczeniu której zastosowanie określonego procesu obróbkowego nie jest celowe i możliwe [10].



Rys. 2. Strategie przekraczania istniejących granic technologicznych [10]

Możliwość osiągnięcia dalszego wzrostu efektywności w procesie wytwarzania – po sprawdzeniu praktycznej przydatności wszystkich tradycyjnych podejść optymalizujących – uzależniona jest od obrania „nowych dróg” postępowania, które pozwoliłyby na wyjście poza istniejące dotychczas granice technologiczne. Stwierdzono bowiem doświadczalnie [10], że dokonywanie dalszych zabiegów optymalizacyjnych, w obszarze granicznym danego sposobu, charakteryzującym się występowaniem błędów wytwarzania i wyrobu, nie jest usprawiedliwione przede wszystkim ze względu na ponoszone nakłady i uzyskiwane korzyści.

Nowe perspektywy zaczynają się pojawiać po zastosowaniu całkowicie innowacyjnego podejścia do rozwiązywanego problemu polegającego na tym, że istniejące zoptymalizowane metody produkcji zostają z dużą efektywnością wspierane przez celowe dostarczanie dodatkowych form energii. Oddziałuje się przy tym na rzeczywistą przyczynę pojawiania się granic technologicznych, tj. na obrabialność materiałów i przebiegi procesów obróbkowych. Obydwa podejścia charakteryzują się specyficznymi strategiami postępowania.

Stosując przedstawioną na rys. 2 strategię 1 wywołuje się zmianę właściwości materiału w obszarze oddziaływania procesu, natomiast postępując zgodnie ze strategią 2 – zmianę dominujących, czynnych mechanizmów procesu. Charakterystyczną cechą strategii 1 jest czasowo ograniczone, zacieśnione do strefy działania procesu, polepszenie obrabialności materiału, co prowadzi – zależnie od rodzaju zastosowania – do wyraźnego zwiększenia zdolności procesu. W sporadycznych przypadkach zastosowanie określonej technologii staje się dopiero możliwe po przyjęciu tego trybu postępowania. Z kolei strategia 2 wywiera bezpośredni wpływ na procesy oddzielania lub usuwania materiału, co powoduje zwiększenie zdolności procesu bez zmiany właściwości materiału obrabianego [10].

### 2.3. DEFINICJA PROCESU HYBRYDOWEGO

Nieodzownym warunkiem realizacji strategii przekraczania granic technologicznych jest – jak już wspomniano – włączenie w istniejący proces obróbkowy jednej lub więcej dodatkowych form energii. Wówczas ma się do czynienia z, tzw. **procesem hybrydowym**. W odniesieniu do obróbki ubytkowej **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 jej oddziaływania na obrabiany materiał.**

Wyraźne rozgraniczenie procesu konwencjonalnego od hybrydowego jest w wielu przypadkach trudne, ponieważ często – zależnie od sposobu obróbki – występują dalsze formy energii, które jednak nie są wnoszone do procesu przez źródło zewnętrzne. Przykładem tego może być samoindukowane skrawanie na gorąco, w którym zależne od procesu obróbkowego nagrzewanie zmniejsza umocnienie materiału w strefie skrawania i czyni go łatwiej obrabialnym. Energia pochodzi w tym przypadku od samego procesu skrawania względnie od poprzedzającej obróbki plastycznej i nie jest wnoszona przez dodatkowe źródło ciepła podczas realizacji procesu hybrydowego.

Do procesów hybrydowych nie można także zaliczać zarówno kinematycznego połączenia sposobów obróbki, np. frezotoczenia [20], szlifowania powierzchni czółowych z kinematyką docierania [29, 31], jak też kombinacji sposobów, przy których różne technologie są sekwencyjnie stosowane na danym stanowisku roboczym, jak np. tłoczenie i wycinanie laserowe [35] czy realizowane po sobie zabiegi, np. toczenia, frezowania i wiercenia na centrum obróbkowym przy jednym zamocowaniu przedmiotu w ramach, tzw. obróbki kompletnej [20].

## 3. PRZYKŁADOWE PROCESY HYBRYDOWE

Jak już podkreślono, rosnące zapotrzebowanie przemysłu na nowe materiały z właściwościami eksploatacyjnymi zwiększającymi walory użytkowe wytwarzanych

wyrobów wymusza rozwój konwencjonalnych i poszukiwanie nowatorskich, efektywniejszych sposobów obróbki [25]. Oprócz doskonalenia właściwości stosowanych materiałów narzędziowych i konstrukcji narzędzi oraz budowy urządzeń wytwórczych, zapewniających intensyfikację procesu obróbkowego przy zachowaniu wysokiej dokładności i jakości wyrobów, zainteresowanie instytutów badawczych i producentów zwraca się również w kierunku opracowywania podstaw i techniki procesów hybrydowych. Umiejętne kombinacje jednoczesnych oddziaływań **mechanicznych, cieplnych i chemicznych** na obrabiany materiał (tabl. 1) tworzą w wielu przypadkach bardzo korzystne i pożądane rozwiązania technologiczne. Szczególna rola przypada wprzeganiu promieniowania laserowego, drgań ultradźwiękowych, ścierniwa oraz erozji elektrycznej, elektrochemicznej czy chemicznej do wspomaganie i intensyfikowanie konwencjonalnych procesów wytwarzania.

Tablica 1. Przykłady hybrydowych procesów obróbki ubytkowej o zastosowaniu przemysłowym

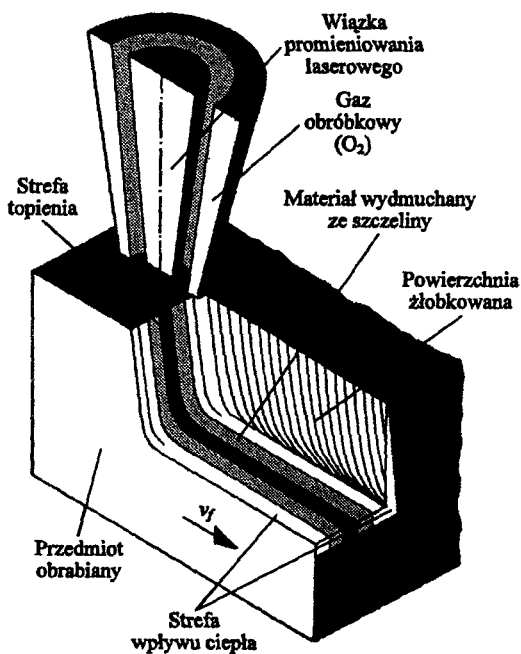
Główna forma energii	Forma dodatkowej energii		
	Mechaniczna	Ciepłna	Chemiczna
Mechaniczna	Obróbka ze wspomaganie ultradźwiękowym	Obróbka z nagrzewaniem materiału, np. promieniowanie laserowym	Szlifowanie z elektrochemicznym ostrzeniem ściernicy (ELID – grinding)
Ciepłna	Obróbka elektroerozyjna ze wspomaganie ultradźwiękowym (EDUM)		Obróbka laserowa ze spajaniem i wydmuchiowaniem materiału
Chemiczna	Szlifowanie elektrochemiczne (ECG)	Elektrochemiczna obróbka łukowa (ECAM, ECDM)	

### 3.1. LASEROWA OBRÓBKA UBYTKOWA ZE SPALANIEM I WYDMUCHIWANIEM MATERIAŁU

Wiązki promieniowania laserowego, dzięki swojej dobrej ogniskowalności i osiągalnym przez to dużym gęstościom mocy, umożliwiają miejscowe i szybkie nagrzewanie określonego obszaru powierzchni, aż do temperatury topnienia względnie odparowywania materiału. Z tego względu mogą być bardzo przydatne do obróbki ubytkowej materiałów metalowych i niemetalowych, np. ceramicznych. Objętościowy udział powstającego ciekłego metalu lub pary jest zależny od specyficznych właściwości materiału, jak podatność na utlenianie, ciepło spalania czy przewodność cieplna oraz od wybranych parametrów procesu, np. intensywności promieniowania laserowego, długości fali, czasu impulsu czy ciśnienia i objętości strumienia gazu obróbkowego (roboczego).

**Laserowa obróbka ubytkowa ze spalaniem i wydmuchiowaniem materiału** (*Laserbrennabtragen*) jest jednym z typowych przykładów procesu hybrydowego. Jest znacznie bardziej wydajna od pokrewnych obróbek ze stapieniem (*Laserschmelzabtragen*) i z odparowywaniem (*Lasersublimierabtragen*) materiału [10,18]. Laserowa obróbka ubytkowa ze spalaniem polega na tym (rys. 3), że materiał poruszający się względem wiązki promieniowania laserowego z prędkością posuwu  $v_f$ , zostaje nią nagrzany do temperatury zapłonu (dla stali wynosi ona ok. 1200°C) i spalony przez doprowadzany dyszą roboczą strumień gazu obróbkowego ( $O_2$ ), który jednocześnie

wydmuchuje z powstającej szczeliny (lub powierzchni) produkty spalania. Mechanizm tego procesu jest podobny do obróbki laserowej ze stapieniem materiału z tą jednak różnicą, że zamiast gazu obojętnego (np. azotu) stosuje się tlen, dzięki czemu nagrzewanie strefy działania procesu jest wspomagane chemiczno-egzotermiczną reakcją. Wydajność procesu prawie wyłącznie stosowanego do obróbki materiałów metalowych może nawet ośmiokrotnie przewyższać obróbkę laserową ze stapieniem materiału dzięki elastycznemu zwiększeniu doprowadzania energii przez ciepło wytwarzanej reakcji egzotermicznej (udział utleniania w bilansie energetycznym może przekraczać 70%). Jednakże w odróżnieniu od obróbki ze stapieniem lub odparowywaniem materiału obrabiane powierzchnie zostają utlenione i występuje większa strefa wpływu ciepła. Może to doprowadzić - przy wytwarzaniu powierzchni konturowych czy ostrokątnych geometrii - do przegrzania, a nawet wypalenia elementów konturu. Z tego względu potrzebne jest odpowiednie sterowanie i regulacja mocy lasera. Także w następstwie odwzorowywania się na obrabianych powierzchniach żłobków, w wyniku nakładania się dynamiki roztopionego metalu i wypalania w czasie silnie egzotermicznej reakcji, często konieczna staje się ich obróbka wykańczająca.



Rys. 3. Zasada laserowej obróbki ubytkowej ze spalaniem i wydmuchiwanym materiału ze szczeliny za pomocą gazu obróbkowego (O<sub>2</sub>)

Tytan – dzięki dobrej absorpcji, małej przewodności i pojemności cieplnej – jest materiałem nadającym się do kształtowania za pomocą laserowej obróbki ubytkowej ze spalaniem. Stwierdzono [10], że jakość tego rodzaju obróbki zależy od ciśnienia gazu obróbkowego i prędkości posuwu  $v_f$ . Zbyt duża podaż tlenu prowadzi do żłobkowania i rozmywania obrabianych powierzchni. Aby zapobiec niekontrolowanemu wypalaniu tlenem czoła obróbki (*machining front*) należy tak dobrać ciśnienie gazu, żeby oddzia-

ływał on jedynie wspomagająco na zależne od promieniowania laserowego roztopienie materiału.

Laserowa obróbka ubytkowa ze spalaniem materiału została obecnie wprowadzona, m.in. do przemysłowej produkcji obudów lotniczych zespołów napędowych, wykonywanych ze stopów tytanu i niklu w firmie Pratt & Whitney (Hartford, USA). Podstawowym celem było zastąpienie dużego udziału zgrubnego toczenia w wytwarzaniu takich części. Dzięki stworzeniu nowego łańcucha procesowego – laserowa obróbka ze spalaniem/toczenie wykańczające - znacznie obniżono koszty narzędziowe i wyraźnie zmniejszono czasy wytwarzania dzięki zwielokrotnieniu wydajności ubytkowej [8, 10].

### 3.2. OBRÓBKA UBYTKOWA Z LASEROWYM NAGRZEWANIEM MATERIAŁU

Obróbka ubytkowa z miejscowym nagrzewaniem materiału obrabianego zasadniczo zalicza się do grupy obróbek na gorąco [17,10] i odpowiada w terminologii obróbek hybrydowych przypadkowi, w którym energia mechaniczna jest sprzężona z dodatkową energią cieplną. Poprzez wprowadzenie ciepła i nagrzanie materiału bezpośrednio przed strefą obróbki zostaje wywołana miejscowa zmiana jego właściwości, wpływająca na polepszenie obrabialności.

Nagrzewanie z użyciem lasera jako źródła ciepła wykazuje – w porównaniu, np. z nagrzewaniem strumieniem plazmy czy nagrzewaniem indukcyjnym prądami wielkiej częstotliwości – jedną rozstrzygającą zaletę: kontrolowalne, nie tylko przez moc lasera ale także przez kształt i położenie plamki promieniowania laserowego, wprowadzanie ciepła do materiału umożliwia dokładne dotrzymywanie wymaganych warunków procesu, co stanowi ważną przesłankę dla wykorzystywania tej technologii w praktyce.

Do miejscowego nagrzewania materiału znajdują zastosowanie lasery molekularne CO<sub>2</sub>, lasery na ciele stałym Nd:YAG [4, 17, 18, 23] i nowo rozwijane lasery diodowe dużej mocy.

Lasery diodowe dużej mocy (*high power diode lasers, Hochleistungsdiodenlaser*) wykazują obecnie – w porównaniu z laserami konwencjonalnymi – największą dynamikę rozwoju [1,2,3,5,12,13,34]. Zasada ich działania polega na tym, że z jednego półprzewodnikowego elementu laserowego (bazującego na kryształach GaAs) można w typowym przypadku krzewdziwo emitować promieniowanie o mocy rzędu kilku mW. W celu podwyższenia mocy łączy się znaczną liczbę tych elementów w, tzw. sztabkę laserową (*laser bar, Laserbarren*). Posiada ona typowe wymiary 10 x 0,6 x 0,1 mm<sup>3</sup> i osiąga moc wyjściową do 60 W. Aby dojść do mocy wynoszącej od kilkuset do tysiąca W w jeden stos składa się do 25 sztabek laserowych (rys. 4a). Poprzez połączenie kilku stosów można uzyskać łączną moc wyjściową sięgającą nawet 6 kW.

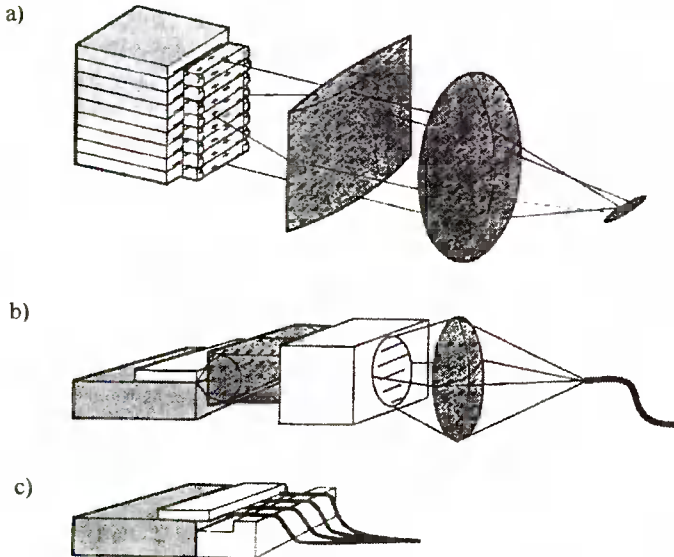
Lasery diodowe mają wiele zalet, a mianowicie:

- są małe i lekkie (o masie zaledwie 10 kg), co umożliwia ich instalowanie na istniejących urządzeniach lub bezpośrednio na ramieniu robota,
- ze współczynnikiem sprawności wynoszącym 40% są najbardziej efektywnymi źródłami promieniowania laserowego,
- pracują bardzo ekonomicznie, przy czym koszty nabycia, eksploatacji i dozoru są relatywnie niskie.

Zaletom tym przeciwstawia się jednak obciążająca lasery diodowe wada - niewielka jakość wiązki promieniowania. Ze względu na specyficzną charakterystykę emisji



osiągalna gęstość mocy na powierzchni przedmiotu jest relatywnie niewielka, co ogranicza zakres zastosowań tego rodzaju źródeł promieniowania. Przykładowo plamka lasera diodowego o mocy  $P_L = 1,5 \text{ kW}$  może mieć wymiary  $0,7 \text{ mm} \times 0,9 \text{ mm}$ . Źródła te są jednak w pełni przydatne do efektywnego nagrzewania różnych materiałów.



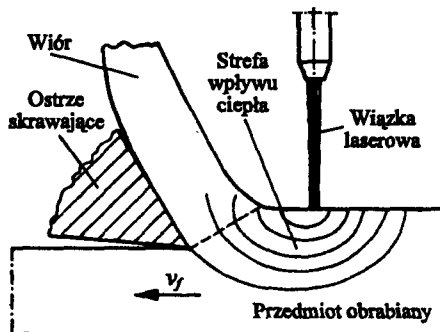
Rys. 4. Przykłady rozwiązań systemów laserów diodowych: a) stos sztabek laserowych, b) sztabka laserowa z przetwornikiem wiązki laserowej, c) sztabka laserowa z bezpośrednim sprzężeniem światłowodowym (wg Fraunhofer – Institut für Lasertechnik, Aachen)

Zwiększona temperatura poddanego nagrzewaniu materiału obrabianego wywołuje obniżenie jego wytrzymałości. Uzyskane przy różnych zastosowanych temperaturach krzywe zmiany wytrzymałości potwierdziły, że nie tylko w stosunku do materiałów metalowych, jak stopy na bazie Ti czy Ni, ale także w odniesieniu do spiekanych materiałów niemetalowych, np. ceramiki  $\text{Si}_3\text{N}_4$  po przekroczeniu określonej minimalnej temperatury występuje miarodajny zanik umocnienia. Podobne zjawisko zachodzi przy wysokowytrzymałych stalach narzędziowych lub twardych powłokach, jak Stellite 6 [10, 13].

W centrum uwagi obróbki z laserowym nagrzewaniem materiału znajdują się przede wszystkim klasyczne sposoby skrawania – toczenie i frezowanie, które przy wielu nowoczesnych materiałach nie są lub są tylko warunkowo stosowane.

Toczenie z laserowym nagrzewaniem materiału (rys. 5) pozwala – dzięki celowemu wprowadzeniu energii cieplnej do strefy oddziaływania procesu – na zastosowanie klasycznej technologii toczenia do kształtowania trudno obrabialnych materiałów, m.in. Ceramiki  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Możliwość wykorzystania omawianego procesu hybrydowego (w odniesieniu do tego materiału) opiera się na obecności amorficznej fazy szklistej, która traci swoją pierwotną wytrzymałość w temperaturze powyżej  $1000^\circ\text{C}$ . Towarzyszące nagrzewaniu fazy szklistej zmniejszenie oporu odkształcenia umożliwia skrawanie tego materiału geometrycznie określonym ostrzem w postaci noża tokarskiego.

Przy ustalaniu materiału narzędziowego odpowiedniego do realizacji tego rodzaju procesu okazało się, że połączenie dużej twardości i wystarczającej wytrzymałości cieplnej stanowi podstawowy warunek obróbki z minimalnym zużyciem ostrza. Obecnie wymagania te spełnia najlepiej polikrystaliczny diament (PKD). Ważne jest przy tym aby były to możliwe do nabycia gatunki handlowe materiałów narzędziowych..

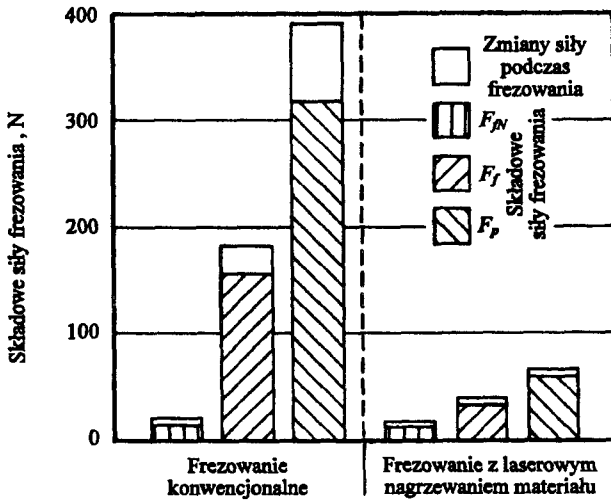


Rys. 5. Istota procesu toczenia z laserowym nagrzewaniem materiału

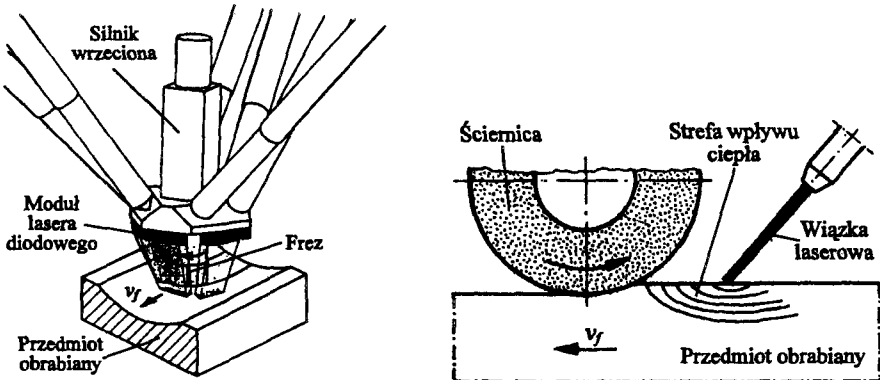
Rozpatrując parametry promieniowania laserowego oraz skrawania, tj. prędkość, posuw i głębokość, przy wspomaganym laserowo toczeniu ceramiki  $\text{Si}_3\text{N}_4$  uwzględnia się podstawowe zależności, służące zapewnieniu koniecznych warunków cieplnych w strefie skrawania. Wynikające stąd parametry skrawania pozwalają z jednej strony na niezawodną obróbkę zgrubną względnie kształtową z głębokościami  $a_p < 2$  mm, z drugiej zaś na obróbkę wykańczającą z nadadkami  $< 0,5$  mm, zapewniającą wysoką jakość powierzchni ( $R_a < 0,3 \mu\text{m}$ ) przy okresie trwałości ostrza  $T > 3$  h [10].

**Frezowanie z laserowym nagrzewaniem materiału** za pomocą lasera diodowego dużej mocy wykazało, że pozycjonowanie płamki promieniowania bezpośrednio przed stykiem ostrza narzędzia z materiałem obrabianym polepsza skrawalność wysokowytrzymałych stali, głównie tytanu i jego stopów oraz stopów na bazie Ni i Co. Przykładowo w procesie frezowania żaroodpornej stali 30NiCrMo16-6 wydajność ubytkowa wzrosła 3-krotnie, a jednocześnie zużycie narzędzia obniżyło się w granicach 80÷90%. Podobnie oddziałuje frezowanie ze wspomaganie laserowym na zmniejszenie składowych sił frezowania, np. w przypadku obróbki Stellite 6 aż o 70% (rys. 6).

W następstwie dokonującego się rozwoju laserów diodowych, wyrażającego się zwiększaniem ich mocy i polepszaniem jakości wiązki promieniowania, w najbliższej przyszłości stanie się także możliwe dostarczanie modułowych systemów laserów diodowych. Dostosowane do zastosowań profile wiązki laserowej pozwalają – w oparciu o miejscowe i czasowe nastawianie geometrii płamki i rozdziału gęstości mocy – na celowe rozporządzanie mocą lasera. Stwarza to możliwość wspomaganego laserowo frezowania dowolnych powierzchni przestrzennych, a ostatnio także złożonych geometrii przedmiotu. Dlatego też systematycznie rozwijane są badania prowadzone są na frezarce hexapodowej, z którą został zintegrowany modułowy laser diodowy (rys. 7). W ramach tych badań zostaną także sformułowane wymagania w stosunku do wykorzystywanego lasera diodowego i obrabiarki ze względu na funkcjonalnie niezawodne i odnoszące się do zastosowania powiązanie systemów prowadzenia i nadzorowania procesu obróbkowego [13].



Rys. 6. Porównanie sił podczas konwencjonalnego i wspomaganego laserowo frezowania. Warunki: materiał – Stellite 6, frez o średnicy  $d = 32$  mm z ostrzem PKB, prędkość frezowania  $v_c = 100$  m/min, posuw  $f = 0,1$  mm,  $a_p = 1$  mm,  $a_e = 10$  mm, droga frezowania  $l_f = 700$  mm, moc lasera diodowego  $P_L = 3$  kW [3]

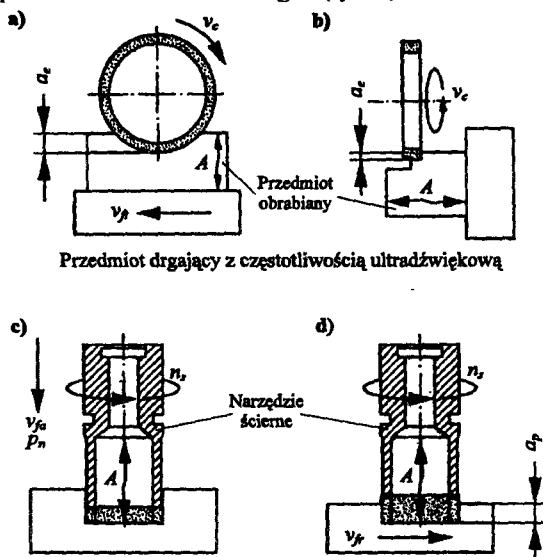


Szlifowanie z laserowym nagrzewaniem materiału (rys. 8) nie prezentuje – jak dotychczas – większego znaczenia praktycznego, gdyż relatywność uzyskiwanych efektów obróbkowych w porównaniu ze szlifowaniem konwencjonalnym jest istotnie mniejsza niż w przypadku toczenia czy frezowania wspomaganego laserowo. Pewne interesujące rezultaty uzyskano przy wspomaganym laserowo szlifowaniu ceramiki HPSN (spiekanej pod ciśnieniem ceramiki  $Si_3N_4$ ) [33].

### 3.3. SZLIFOWANIE ZE WSPOMAGANIEM ULTRADŹWIĘKOWYM

Szlifowanie wspomagane drganiami ultradźwiękowymi charakteryzuje się tym, że na kinematykę konwencjonalnego procesu szlifowania zostaje nałożony dodatkowy, podłużnie oscylujący ruch, którego kierunek zmienia się wraz z częstotliwością ultra-

dźwiękową (np. wynoszącą 22 kHz). Wprowadzenie wspomaganie ultradźwiękowego w strefie styku może zostać dokonane poprzez wzbudzenie drgań narzędzia lub przedmiotu obrabianego. W zależności od położenia czynnych partnerów procesu względem siebie, jak też obrabianego konturu można w odniesieniu do narzędzia ściernego stosować osiowe lub promieniowe nałożenie drgań (rys. 9).

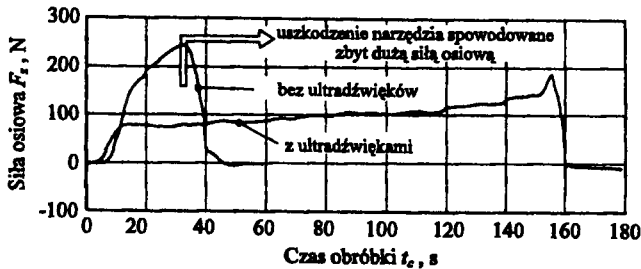


Rys. 9. Odmiany szlifowania wspomaganego ultradźwiękowo: a) wzdłużne szlifowanie obwodowe (promieniowe), b) wzdłużne szlifowanie obwodowe (osiowe), c) poprzeczne szlifowanie czołowe (osiowe); A – amplituda,  $a_e$  – styk roboczy,  $a_p$  – głębokość szlifowania,  $n_s$  – prędkość obrotowa ściernicy,  $p_n$  – nacisk narzędzia,  $v_c$  – prędkość skrawania,  $v_{fa}$  – prędkość posuwu osiowego,  $v_{fr}$  – prędkość posuwu promieniowego,  $v_f$  – prędkość posuwu stycznego (prędkość stołu)

Nakładane drgania prowadzą do stałej zmiany kierunku prędkości czynnej, a zatem podstawowej zmiany mechanizmów powstawania powierzchni obrabianej i zużycia narzędzia. Wspomaganie ultradźwiękowe jest zasadniczo możliwe przy każdej odmianie kinematycznej procesu szlifowania [31,26,28,30]. Szczególnie interesująca jest problematyka wykonywania na materiałach ceramicznych złożonych konturów w postaci otworów, rowków, powierzchni sferycznych lub przestrzennych oraz struktur filigranowych. Z tego punktu widzenia szlifowanie wspomagane ultradźwiękowo oferuje alternatywę o dużej zdolności wytwórczej w stosunku do technologii dotychczas stosowanych przeważnie nieekonomicznych lub wymagających relatywnie dużych nakładów. Oprócz tego ultradźwięki umożliwiają celową strukturyzację powierzchni przedmiotu, dzięki czemu można uniknąć kierunkowych śladów obróbkowych lub wprowadzić kieszenie smarowe na tribologicznie eksploatowanych powierzchniach.

W odniesieniu, np. do poprzecznego szlifowania czołowego (rys. 9c), w istocie odpowiadającego obróbce otworu, zachodzi potrzeba sterowania drogą przesuwu lub siłą nacisku narzędzia. Przy wyborze rodzaju sterowania posuwem narzędzia decydującą rolę odgrywa zastosowane urządzenie. Podczas gdy przy obróbce udarowo-ścierniej zazwyczaj pracuje się ze sterowaniem siłą, to w przypadku zastosowania wrzeciona ultradźwiękowego na frezarce czołowej oferuje się przeważnie sterowanie drogą narzędzia.

W celu przeprowadzenia oceny procesu obróbkowego przeanalizowano - podczas sterowania drogą narzędzia - przebieg zmienności siły osiowej  $F_z$  (rys. 10). Stwierdzono [30,31], że szlifowanie bez wspomaganie ultradźwiękowego prowadzi do niepożądanego przebiegu procesu, ponieważ szybko rosnące siły osiowe wymuszają jego przerwania. Przeciwnie, w przypadku stosowania ultradźwięków zachodzi jedynie niewielki wzrost siły osiowej, a tym samym stabilny przebieg procesu podczas obróbki.

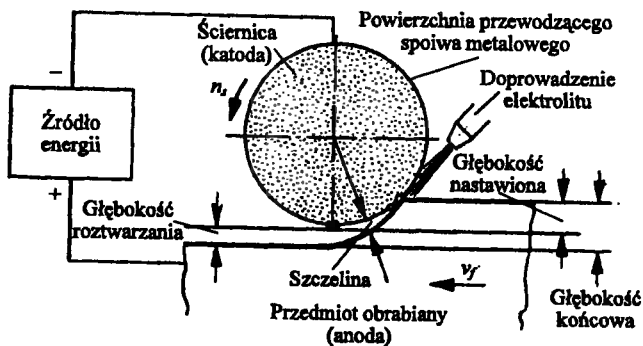


Rys. 10. Porównanie sił osiowych  $F_z$  w procesach obróbki (wg kinematyki z rys. 9c) wspomaganie i nie wspomaganie drganiami ultradźwiękowymi. Warunki: materiał -  $Al_2O_3$ , narzędzie ściernie - D46 BZ 335 C 75 o średnicy 16 mm, chłodziwo - roztwór wodny 4%,  $n_s = 3000 \text{ min}^{-1}$ ,  $A = \sigma/12 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $v_{fs} = 4 \text{ mm/min}$  [30, 31]

Obniżone siły szlifowania są istotne w przypadku obróbki filigranowych konturów przedmiotu. Jako przykład efektywnego zastosowania szlifowania wspomaganego ultradźwiękowego może służyć mikroturbina wykonywana z ceramiki  $Si_3N_4$  [8,10].

### 3.4. SZLIFOWANIE ELEKTROCHEMICZNE (ECG)

Szlifowanie elektrochemiczne (*ElectroChemical Grinding - ECG*) stanowi przykład wydajnego procesu hybrydowego. W procesie ECG stosuje się wirującą ściernicę z przewodzącym spoiwem metalowym w celu zapewnienia roztwarzania anodowego powierzchni materiału obrabianego (rys. 11).



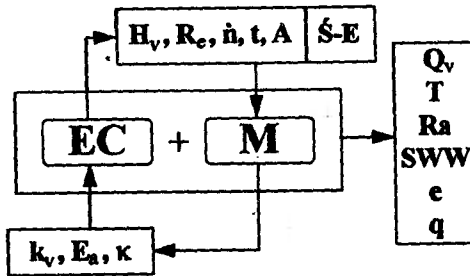
Rys. 11. Istota hybrydowego procesu szlifowania elektrochemicznego (ECG)

Wystające na czynnej powierzchni ściernicy ziarna ściernie tworzą szczelinę, przez którą przemieszcza się pasywny strumień elektrolitu. Ścierniwo jest zazwyczaj odpowiedzialne tylko za mechaniczne usuwanie cienkiej warstwy tlenków (depasywacja mechaniczna powierzchni anody), natomiast udział elektrotechnicznego roztwarzania w glo-

balnym ubytku materiału mieści się w granicach 90÷95% [24]. ECG umożliwia więc uzyskiwanie mniejszej energochłonności, poprawy właściwości warstwy wierzchniej, większej żywotności ściernicy oraz wyższej wydajności ubytkowej w porównaniu ze szlifowaniem konwencjonalnym. Zalety te doprowadziły ECG do wielu zastosowań, m. in. w przemyśle lotniczym do wytwarzania łopatek, kierownic lub pierścieni uszczelniających o budowie plastra miodu [22].

W procesie ECG należy dokładnie dobierać parametry roztwarzania materiału podlegającego obróbce. Stwierdzono [27], że zastosowanie impulsów prądowych zamiast prądu ciągłego polepsza efekty ECG. Bardziej precyzyjne zlokalizowanie roztwarzania anody ogranicza obróbkę elektrochemiczną przyległych obszarów przedmiotu. Impulsowa ECG jest procesem bardziej elastycznym w stosunku do konwencjonalnej ECG w osiąganiu większej równowagi pomiędzy łącznym roztwarzaniem elektrochemicznym i chemicznym a mechanicznym usuwaniem obrabianego materiału.

Powiązania fizykochemiczne pomiędzy oddziaływaniami elektrochemicznymi i chemicznymi (EC) oraz mechanicznymi (M) pokazano na rys. 12. Są one następstwem zmian zachodzących w materiale obrabianym, w cieczy roboczej oraz ściernicy-elektrodzie pod wpływem tych oddziaływań [14, 15, 16].



Rys. 12. Schemat powiązań fizykochemicznych w procesie szlifowania elektrochemicznego (ECG)

W wyniku oddziaływań EC w warstwie wierzchniej obrabianego materiału zmienia się gęstość dyslokacji oraz zwiększa się prędkość ( $\dot{n}$ ) ich wyjścia dzięki zmniejszeniu potencjału powierzchni podczas roztwarzania. Ułatwia to deformację plastyczną i zmniejsza stopień umocnienia materiału ( $R_e, H_v$ ). Jednocześnie heterogeniczność elektrochemiczna materiału, wyrażająca się zróżnicowaniem potencjałów elektrycznych ( $E_a$ ) oraz współczynników elektrochemicznych ( $K_v$ ) poszczególnych ziaren i ich granic, powoduje nierównomierność w prędkości roztwarzania faz, co osłabia spójność materiału.

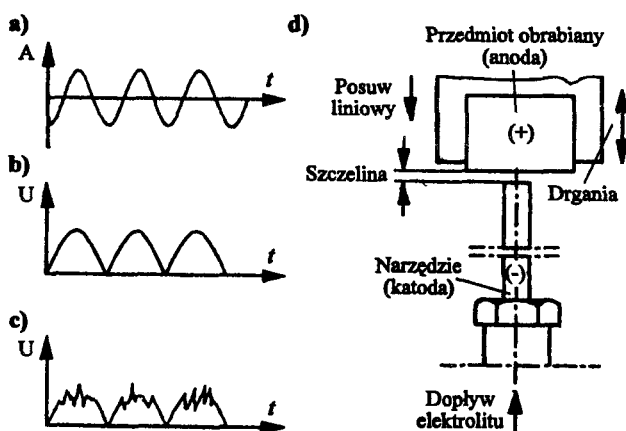
Zmiany właściwości ściernicy-elektrody ( $\dot{S}-E$ ) wskutek oddziaływań elektrochemicznych są spowodowane zjawiskami osadzania, absorpcji i erozji. Poprawianie właściwości skrawnych następuje głównie przez usuwanie produktów zalepiających ściernicę za pomocą oddziaływań elektrycznych. Intensyfikacji tego procesu sprzyjają zmiany biegunowości, podczas których zachodzi roztwarzanie anodowe produktów zalepiających przestrzeń międzyziarnową. Istotne znaczenie dla przebiegu mikroskrawania ma zmniejszenie grubości warstwy skrawnej ( $t$ ) w stosunku do rzeczywistej głębokości szlifowania. Zachodzi ono na skutek roztwarzania anodowego a wpływ na jego przebieg ma m.in. napięcie robocze, konduktywność elektryczna elektrolity, ziarnistość czy prędkość posuwu ściernicy.

Zjawiska te wpływają istotnie na wyniki procesu ECG. Wyraża się to we wzroście wydajności ubytkowej ( $Q_v$ ), zwiększeniu dokładności ( $T$ ), zmniejszeniu chropowatości ( $R_a$ ), poprawie właściwości warstwy wierzchniej ( $SWW$ ) zmniejszeniu energochłonności ( $e$ ) oraz zużycia materiału ściernego ( $q$ ).

Podobne połączenie obróbkowego oddziaływania energii chemicznej i mechanicznej zachodzi podczas obróbki elektrochemicznej wspomaganej obróbką udarowo-ścierną (*ElectroChemical Ultrasonic Machining – ECUM*), określanej również akronimem *ECM-USM (ElectroChemical Machining – UltraSonic Machining)*. Może być ona stosowana do usuwania lub rozdrabniania obojętnych lub nie przewodzących warstw powierzchni, umożliwiając tym samym efektywne wykorzystanie procesu ECM. Jakkolwiek dotychczasowe badania tego procesu hybrydowego dotyczyły jego podstaw [11], pierwsze próby praktycznych zastosowań już wykazały, że przy pomocy ECUM można wydajnie kształtować struktury kompozytowe, np. materiały kompozytowe z osnową metalową (*Metal-Matrix Composites – MMC*), zawierające cząstki nie przewodzące.

### 3.5. ELEKTROCHEMICZNA OBRÓBKA ŁUKOWA (ECAM)

**Elektrochemiczna obróbka łukowa** (*ElectroChemical Arc Machining – ECAM*), stanowiąca w istocie **obróbkę elektrochemiczno-elektroerozyjną** (*ECDM*), wykorzystuje wyładowania elektryczne w elektrolicie w celu osiągnięcia zarówno roztwarzania elektrochemicznego oraz erozji elektrycznej. Badano zastosowanie procesu ECAM do wykonywania otworów oraz drążenia wykrojów matryc [6, 7]. Urządzenie do wiercenia za pomocą ECAM jest podobne do używanego w każdym procesie ECM, jednakże kinematyka ruchu elektrody różni się w obu tych urządzeniach. W przypadku typowej ECAM narzędzie-katoda jest stacjonarne, a materiał obrabiany realizuje posuw liniowy z nałożonymi drganiami o częstotliwości 100 Hz. Wykorzystywane napięcie  $U$  stanowi wyprostowaną dwupołówkowo sinusoidę o częstotliwości 100 Hz.



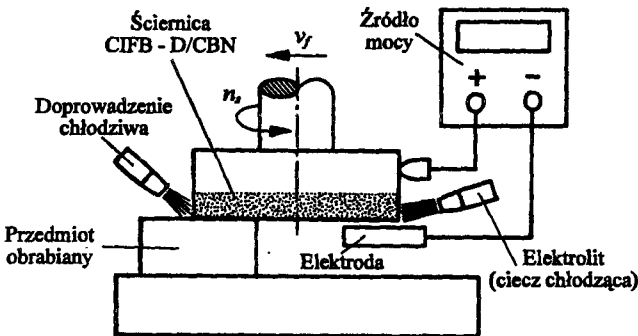
Rys. 13. Istota elektrochemicznej obróbki łukowej (ECAM)

Na rys. 13 pokazano wzmocnienie drgań (a), zastosowane napięcie przed obróbką (b) i podczas obróbki (c) oraz wzajemne rozmieszczenie elektrod (d). W ECAM pole elektryczne, o relatywnie dużym natężeniu, występujące pomiędzy elektrodami i mniejsza szczelina międzyelektrodowa powodują, że cząsteczki obojętne zostają zjonizowane

przez elektrony emitowane z elektrody. Wraz z narastaniem procesu jonizacji zachodzi reakcja łańcuchowa w postaci tworzenia się lawiny jonów w obszarze złożonych wzajemnych oddziaływań, tj. kanale plazmy. Z powodu temperatury kilkunastu tysięcy stopni panującej w kanale plazmy odparowują wszelkie pozostałości elektrolitu lub metalu w trakcie wyładowania. ECAM zapewnia relatywnie wysoką wydajność procesu obróbkowego.

### 3.6. SZLIFOWANIE Z CIĄGŁYM OSTRZENIEM ELEKTROCHEMICZNYM ŚCIERNICY (*ELID-GRINDING*)

Szlifowanie ultraprecyzyjne (lustrzane) z ciągłym ostrzeniem elektrochemicznym (elektrolitycznym) ściernicy (*Electrolytic In-process Dressing – ELID – grinding*) polega na tym (rys. 14), że mikro- lub submikroziarnista (wielkość ziarn  $< 1\mu\text{m}$ ) ściernica diamentowa (D) lub z regularnym azotku boru (CBN) ze spoiwem metalowym wiązany włóknami żeliwnymi (*Cast Iron Fiber Bonded – CIFB*) poddawana jest podczas procesu szlifowania ciągłemu ostrzeniu elektrochemicznemu [9,17,21]. Do szczeliny pomiędzy biegunem dodatnim – ściernicą i biegunem ujemnym – elektrodą zostaje doprowadzony elektrolit stanowiący zarazem ciecz chłodzącą, a zachodzące dzięki doprowadzeniu prądu elektrycznego zjawisko elektrolizy powoduje efektywne uwydatnianie wystawiania ziaren ściernych na czynnej powierzchni ściernicy. Sprzyja to lepszemu usuwaniu materiału obrabianego i samoostrzeniu ściernicy, a tym samym znacznie poprawia jej zdolność skrawną i eliminuje zalepanie wiórami przestrzeni międzyziarnowych.



Rys. 14. Istota szlifowania z ciągłym ostrzeniem elektrochemicznym ściernicy (*ELID – grinding*)

Istota mechanizmu procesu *ELID* polega na tym, że wraz z uruchomieniem szlifowania na powierzchni spoiwa ściernicy zaczyna tworzyć się warstwa tlenku żelaza sukcesywnie zmniejszając przewodność elektryczną i spowalniając proces elektrolizy spoiwa. Z kolei w miarę zużywania się ziaren następuje ubytek warstwy tlenku (depasywacja mechaniczna), a tym samym zwiększa się przewodność elektryczna powierzchni spoiwa, wzrasta elektroliza, jonizacja cząsteczek żelaza odsłania nowe ziarna ściernic i następuje ponowne odnawianie się warstwy tlenku. Dzięki temu wysięg ziaren ponad powierzchnię spoiwa pozostaje stały.

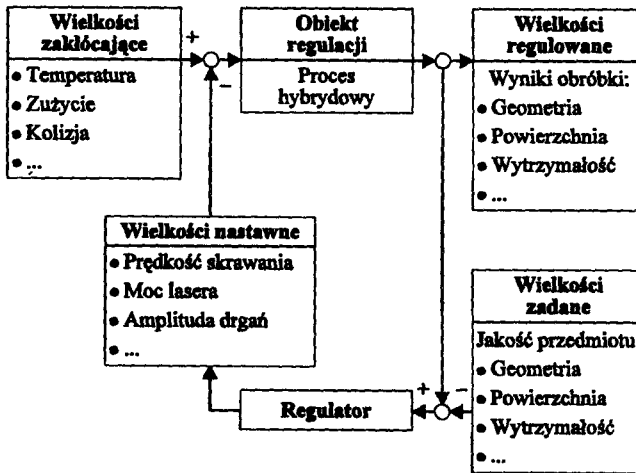
Ściernice diamentowe CIFB-D znajdują zastosowanie do szlifowania lustrzanego materiałów niemetalowych, a więc ceramiki (w tym ferrytów), krzemu, szkła oraz in-



nych twardych i kruchych materiałów, natomiast ściernice CIFB-CBN do materiałów stalowych. Dla potrzeb procesu *ELID-grinding* można wykorzystywać impulsowe źródło mocy (zasilania) konwencjonalnych obrabiarek elektroerozyjnych lub elektrochemicznych oraz - dzięki mniejszym siłom szlifowania, konwencjonalne szlifierki.

#### 4. ZAPEWNIENIE POWTARZALNOŚCI PROCESÓW HYBRYDOWYCH

Jednym z głównych wymagań dotyczących niezawodności procesu hybrydowego jest zapewnienie powtarzalności uzyskiwanych wyników, wyrażanych za pomocą różnych wielkości w zależności od rodzaju materiału obrabianego i jego stanu, geometrii przedmiotu lub jego właściwości funkcjonalnych (rys. 15).



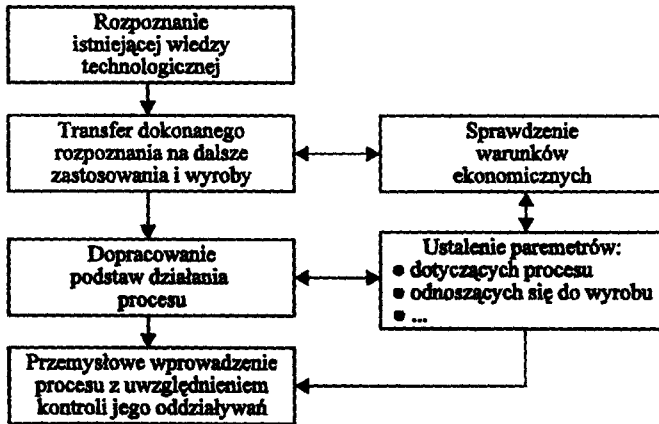
Rys. 15. Zapewnienie powtarzalności hybrydowych procesów obróbki ubytkowej

Podczas procesu wytwarzania należy zapewnić możliwość prostej regulacji parametrów służących do nastawiania tych właściwości przedmiotu. W tym celu operatorowi powinien być znany charakter oddziaływania zmiany jednego lub kilku parametrów na proces obróbkowy i sam przedmiot, co umożliwiłoby mu wpływanie w każdym przypadku na jego jakość. Ponieważ automatyczna produkcja przedmiotów zyskuje na znaczeniu przy dużej liczbie sztuk, strategie wytwarzania i operacje obróbkowe są tak nastawiane, aby zapewniały w sposób nie tylko samodzielny ale także z wykorzystaniem wspomagania systemami sensorowymi wymaganą jakość przedmiotu. Ponadto wykrywa się i kontroluje wielkości zakłócające, wpływające na przebieg procesu obróbkowego, inteligentnie reagując przy tym nie tylko na niespodziewane zetknięcia kolizyjne narzędzia z przedmiotem, ale również na wolno następujące zmiany w procesie w postaci zużycia narzędzia czy powolnej zmiany temperatury. Dzięki komputerowej symulacji warunków procesu i rozpoznania fizycznych zależności w strefie jego działania wielkości zakłócające można kwalifikować i kwantyfikować podczas badań eksperymentalnych. Z kolei poprzez dobór adekwatnej, najbardziej przydatnej w produkcyjnych warunkach wytwarzania sensoryki nadzorującej proces poprzez rejestrację

wartości powstających sił, pomiary temperatury lub natężenia dźwięku materiałowego, wpływy wielkości zakłócających daje się znacznie stłumić lub całkowicie wyeliminować. Dąży się do oparcia procesów hybrydowych na systemach ekspertowych postrzeganych jako skojarzenie banku danych, mechanizm regulacji i modeli procesu [10].

## 5. MOŻLIWOSCI I TRYB PRZEMYSŁOWEGO WPROWADZANIA PROCESÓW HYBRYDOWYCH

Procesy hybrydowe nie stanowią całkowicie nowych metod wytwarzania, jak np. *Rapid Prototyping* czy *Rapid Tooling*. Swoją innowacyjność opierają całkowicie lub częściowo na istniejącej, konwencjonalnej wiedzy technologicznej. Co więcej, rozszerzanie granic technologicznych poprzez wprzęgnięcie dodatkowej energii do strefy oddziaływań procesów należy traktować jako punkt ciężkości tych procesów. Dlatego rozpoznanie konwencjonalnych procesów obejmuje zarówno określenie konkretnych wartości ich parametrów, jak też sformułowanie problemów i granic sposobów obróbki wraz z ich podstawami. Często towarzyszy mu prezentacja już rozpracowanych warunków ekonomicznych możliwych do wykorzystania technik hybrydowych, jako ważnego elementu dokonywanego rozpoznania (rys. 16).



Rys. 16. Tryb przemysłowego wprowadzania hybrydowych procesów obróbki ubytkowej

W ten sposób rozpoznany stan wiedzy technologicznej, uwzględniający potencjalne możliwości poszczególnych procesów jest następnie transferowany i konfrontowany z własnymi, specyficznymi dla danej firmy zadaniami i wymaganiami. Już w tym wczesnym stadium muszą być brane pod uwagę ekonomiczne warunki ramowe. W przypadku korzystnie rokującej analizy techniczno-ekonomicznej przystępuje się do tworzenia podstaw działania procesu hybrydowego. Celem tego etapu rozwoju jest takie ukształtowanie nowego procesu pod względem specyficznych dla niego i wyrobu parametrów, aby wytwarzane z jego pomocą wyroby przewyższały pod względem jakości i/lub kosztów produkcję konwencjonalną. Dopiero wówczas, gdy techniczno – wytwórcze i ekonomiczno-produkcyjne dane przemawiają za przemysłowym wprowadzeniem opracowanej technologii, powinien zostać dokonany końcowy krok właściwego wdro-

zenia procesu. Należy jednak podkreślić, że także w tym ostatnim etapie bierze się pod uwagę potrzebę optymalizacji parametrów procesu hybrydowego, co powinno odgrywać istotną rolę w dalszym jego rozwoju.

Czas tworzenia i wprowadzania nowego procesu hybrydowego zależy z jednej strony od stopnia złożoności postawionego zadania obróbkowego, z drugiej zaś od zakresu dokonanego rozpoznania względnie koniecznych, dodatkowych czynności badawczych. Ścisła współpraca w obszarze badań naukowych i przemysłowych może stworzyć szeroką bazę dla efektywnego rozwoju i praktycznego wdrażania technologii hybrydowych.

## 6. PODSUMOWANIE

Stosowanie procesów hybrydowych stwarza nowe, efektywne możliwości kształtowania materiałów o różnych właściwościach. Dzięki celowemu wprowadzeniu dodatkowej energii osiąga się rezultaty obróbkowe przewyższające – nieraz znacznie – zdolność wytwórczą procesów konwencjonalnych. Uzyskuje się je w dwojaki sposób. Po przez doprowadzenie do strefy działania procesu określonej formy energii można spowodować po pierwsze lokalną zmianę obrabialności kształtowanego materiału, po drugie zaś polepszenie przebiegu samego procesu. Te potencjalne możliwości wyraźnie uwidaczniają się na przykładzie procesów obróbkowych wspomaganych energią chemiczną, cieplną lub mechaniczną.

Warunki, które należy koniecznie zapewnić, aby technologiczne zalety tego rodzaju procesów uczynić przemysłowo użytecznymi obejmują, oprócz całości kształtu wiedzy o technice obróbki hybrydowej, również przygotowanie dostosowanego do tego celu urządzenia produkcyjnego, umożliwiającego realizację procesu bez zakłóceń. W tym obszarze badawczym prowadzi się intensywne prace rozwojowe, służące nie tylko efektywnemu wytwarzaniu różnych form energii, ale również technice regulacji, warunkującej doprowadzenie tych nowych procesów obróbkowych do w pełni użytecznego wykorzystywania.

## LITERATURA

- [1] Albers P.: Brennpunkt Strahlqualität. Hochleistungs-Diodenlaser-Systeme (HDLS) werden immer besser. Laser-Praxis, 1999.
- [2] Benninghoff H.: Lasertechnik - Market, Neuentwicklungen, Trends. Technische Rundschau, 91(1999)5.
- [3] Brettschneider C.: Diodenlaser bieten hohe Verfügbarkeit. Industrie-Anzeiger, 121(1999)23/24.
- [4] Chryssolouris G., Anifantis N., Karagiannis S.: Laser Assisted Machining: an Overview. Trans. ASME, J. Manuf. Sci. Eng., 119(1997)4.
- [5] CNC-gestütztes Diodenlaser-Auftragschweißen für den Formaufbau. Laser-Praxis, 1999.
- [6] De Sliva A., McGeough J.A.: Hybrid Electrodischarge – Electrochemical Process for Roughing and Finishing Dies and Moulds. Proc. ISEM-XII, Aachen, Germany 1998.

- [7] De Sliva A., McGeough J. A.: The Production of Full Die Shapes by Electrochemical Arc/electrochemical Machining. Proc. ISEM-IX, Nagoya, Japan 1989.
- [8] Eversheim W., Klocke F., Pfeifer T., Weck M.: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik - Aachener Perspektiven. VDI-Z, 141(1999)5.
- [9] Gołąbczak A.: Elektrochemiczne ostrzenie ściernic z zastosowaniem prądu przemiennego. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej 762, Łódź 1996.
- [10] Hybride Prozesse – Neue Wege zu anspruchsvollen Produkten. Tagungsband -Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium AWK'99 „Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik - Aachener Perspektiven”, Shaker Verlag, Aachen, Germany 1999.
- [11] Imai Y., Clifton D., McGeough J.A.: Some Ultrasonic Effects in Machining Materials Encountered in the Offshore Industry. Proc. 30<sup>th</sup> MTDR Conference, MacMillan Press, London, UK 1993.
- [12] Jehle R.: Laser – unterstützt drehen für die Serienfertigung. Werkstatt u. Betrieb, 132(1999)5.
- [13] Klocke F., Bausch S., A. Dammer A., Senster P.: Schweißen und laserunterstütztes Fräsen mit dem Diodenlaser. wt-Werkstattstechnik, 90(2000)1/2.
- [14] Kozak J.: Analiza powiązań procesów mikroskrawania i roztwarzania anodowego w szlifowaniu elektrochemicznym. Mat. XIX Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Łódź 1996.
- [15] Kozak J.: Wybrane zagadnienia hybrydowych obróbek elektro-mechanicznych. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji. 16(1996), numer specjalny.
- [16] Kozak J., Oczos K.E.: Selected Problems of Abrasive Hybrid Machining. Proc. Inter. Conf. on Advances in Production Engineering – Part II, Warsaw, Poland 1998.
- [17] Oczos K.E.: Kształtowanie ceramicznych materiałów technicznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1996.
- [18] Oczos K.E.: Kształtowanie materiałów skoncentrowanymi strumieniami energii. Wyd. Uczelniane Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1988.
- [19] Oczos K.E.: Kształtowanie mikroczęści - charakterystyka sposobów mikroobróbki i ich zastosowanie. Mechanik, 72(1999)5/6.
- [20] Oczos K.E.: Obróbka kompletna – obrabiarki metody, narzędzia. Mechanik, 72(1999)3.
- [21] Oczos K.E.: Obróbka ultraprecyzyjna. Mechanik 64(1991)8/9.
- [22] Phillips R.E.: ECG: Combining Electrochemical Attack and Abrasion. Manuf. Engineering 108(1986)12.
- [23] Poprawe P. u.a.: Trends bei Lasern in der Metallbearbeitung. Fertigung 11/12, 1997.
- [24] Rajurkar K.P., Zhu D., McGeough J.A., Kozak J., De Sliva A.: New Developments in Electro-chemical Machining. Ann. CIRP 48(1999)2.
- [25] Ruszaj A.: Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi. Instytut Obróbki Skrawaniem, Kraków 1999.
- [26] Spur G., Holl S.-E.: Material Removal Mechanisms During Ultrasonic Assisted grinding. Production Engineering 4(1997)2.

- [27] Tehrani F.A., Atkinson J.: A Study of Pulsed Electrochemical Grinding. Proc. of ISEM XI, Lousanne, Switzerland 1995.
- [28] Uhlmann E.: Surface Formation in Creep Feed Grinding at Advanced Ceramics with and without Ultrasonic Assistance. Ann. CIRP 47(1998)1.
- [29] Uhlmann E., Ardelt T.: Influence of Kinematics on the Face Grinding Process on Lapping Machines. Ann. CIRP 48(1999)1.
- [30] Uhlmann E., Holl S.-E.: Schwer zerspanbare Werkstoffe ultraschallunterstützt schleifen. Maschinenmarkt 104(1998)48.
- [31] Uhlmann E., Holl S.-E., Ardelt T., Sroka F., Laufer J.: Innovative Schleifverfahren zur Keramikbearbeitung. Teil I: Ultraschallunterstütztes Schleifen, Planschleifen mit Läppkinematik. ZWF 94(1999)3.
- [32] Wenda A. u.a.: Möglichkeiten und Grenzen der Mikrozerspanung. F&M 107(1999)11.
- [33] Westkämper E.: Grinding Assisted by Nd:YAG Lasers. Ann. CIRP 44(1995)1.
- [34] Wolff D.: Kilowatt-Diodenlaser. Entwicklungsstand und Perspektiven. F&M 108(2000)3.
- [35] Zeitgleiche Prozesse sollen die Wettbewerbsfähigkeit der Werkzeugmaschinen-Branche sichern. Produktion. 25, 1999.

## NATURE, IMPORTANCE AND DEVELOPMENT OF HYBRID METAL REMOVAL PROCESSES

### Summary

The present paper presents a justification for the development of production metal removal processes and breaking the technological limits due to a growing trend in introducing new goods and meeting the production requirements. The hybrid process is defined and the nature and peculiarities of selected hybrid processes discussed. The investigation highlights the need to ensure the repeatability as well as their potential and industrial implementation stages and, finally, it defines all the necessary conditions to be fulfilled in order to provide an industrial demand for hybrid processes.

Key words: technological limit of machining process, hybrid metal removal machining, laser-heating machining, ultrasonic-aided machining, electro-chemical grinding, ECM-EDM, ECM dressing grinding wheel, hybrid process repeatability

## TECHNOLOGICZNE UWARUNKOWANIA RECYRKULACJI PŁYNÓW OBRÓBKOWYCH W PROCESACH OBRÓBKI EROZYJNEJ

Ewa Ozimina<sup>1</sup>, Janusz Musiał<sup>2</sup>, Michał Styp-Rekowski<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Wydział Budownictwa Politechniki Świętokrzyskiej,  
Samodzielny Zakład Chemii Technicznej,  
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

<sup>2</sup>Wydział Mechaniczny Akademii Techniczno-Rolniczej,  
Zakład Obrabiarek i Robotów,  
ul. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W pracy przedstawiono analizę czynników technologicznych mających wpływ na rezultaty obróbek erozyjnych. Zwrócono uwagę na te własności i właściwości płynów obróbkowych, od których uzależniona jest możliwość ich recykulacji. Recykulacja płynów obróbkowych stanowi ekologiczny aspekt, który powinien być uwzględniany w projektowaniu i wytwarzaniu maszyn i procesów wytwórczych na równi z czynnikami technicznymi i ekonomicznymi.

*Słowa kluczowe:* recykulacja, metody recykulacji, obróbka erozyjna, płyny obróbkowe

### 1. WSTĘP

Postęp obserwowany w dziedzinie inżynierii materiałowej wymusza konieczność poszukiwania nowych metod obróbki tworzyw konstrukcyjnych stosowanych we współczesnym przemyśle. Badania w tym zakresie prowadzone są równoległe w dwóch kierunkach.

Pierwszy, to doskonalenie metod uznawanych za tradycyjne (toczenie, frezowanie itp). Rezultatem drugiego są nowe oryginalne metody umożliwiające obróbkę nowych tworzyw konstrukcyjnych, w tym także uznawanych dotychczas za nieobrabbialne lub trudno obrabbialne.

Podstawowymi cechami jakimi charakteryzować powinny się wszystkie metody obróbki, bez względu na zaliczenie ich do któregoś z powyższych zbiorów, są:

- zapewnienie dużej wydajności i założonej dokładności obróbki,
- możliwość uzyskania produktu o oczekiwanej dokładności.

Są to cechy mierzalne, bezpośrednio wpływające na jednostkowy koszt wytwarzanego produktu.

Drugą grupą cech metod obróbki, na które obecnie zwraca się szczególną uwagę stanowią:

- możliwość uzyskania warstwy wierzchniej o oczekiwanej strukturze geometrycznej,
- możliwie najmniejsze szkodliwe oddziaływanie na środowisko.

Są to cechy bezpośrednio niewymierne, nie mniej jednak bardzo istotne z punktu widzenia procesu eksploatacji zarówno obrabiarek jak i maszyn, w skład których wchodzi wytwarzane elementy.

Przedstawione w niniejszej pracy rozważania mają służyć minimalizacji oddziaływania na środowisko stosowanych w obróbkach erozyjnych płynów obróbkowych poprzez rozszerzenie możliwości ich recykulacji.

## 2. RODZAJE EROZYJNYCH METOD OBRÓBK

Szeroki rozwój erozyjnych metod obróbki, głównie materiałów trudno obrabialnych, spowodował trudności w czytelnej ich systematyzacji. Przeplatają się one wzajemnie, tworząc, tzw. metody hybrydowe a nierzadko stanowią połączenie z metodami tradycyjnymi [1,5,8]. Przyjmując jako kryterium wykorzystywany rodzaj erozji, obróbki erozyjne można podzielić na:

- elektroerozyjną (erozja elektryczna),
- elektrochemiczną (erozja elektrochemiczna),
- strumieniową (erozja strumienia energii).

W przypadku erozji elektrycznej źródłem energii - której oddziaływanie na przedmiot obrabiany powoduje oddzielanie od niego cząstek materiału (także od elektrody roboczej) - jest prąd elektryczny doprowadzany z generatora do obu biegunów w postaci impulsów.

Erozja elektrochemiczna przebiega w wyniku zachodzących reakcji chemicznych w obecności prądu elektrycznego, a więc reakcji elektrochemicznych w obszarze przyanodowym i w szczelinie międzyelektrodowej.

W erozji strumieniowej energia powodująca oddzielanie cząstek materiału od przedmiotu obrabianego zawarta jest w skoncentrowanym strumieniu, np.: jonów, elektronów lub fotonów, wody lub mieszaniny wody i ścierniwa.

W każdej z wyżej wymienionej grup obróbek występują płyny robocze, z tym że ich rola dla każdego rodzaju obróbki jest inna.

## 3. PŁYNY OBRÓBKOWE I ICH ROLA W POSZCZEGÓLNYCH METODACH OBRÓBK EROZYJNEJ

W przypadku obróbki elektroerozyjnej (EDM) płyn obróbkowy jest dielektrykiem. Jego rola polega głównie na:

- izolowaniu przedmiotu obrabianego od elektrody roboczej,
- stwarzaniu możliwości powstawania kanału wyładowania i koncentrowania energii wyładowania przez ograniczenie wymiarów kanału,
- chłodzeniu elektrody oraz cząstek roztwarzanego przedmiotu obrabianego,
- odprowadzeniu produktów erozji elektrycznej ze szczeliny międzyelektrodowej.

W tego rodzaju obróbce jako płyny robocze stosuje się ciecze węglowodorowe lub zdejonizowaną wodę [8, 10, 11].

W obróbkach (ECM) wykorzystujących erozję elektrochemiczną płynami obróbkowymi są wodne roztwory soli nieorganicznych, najczęściej sodu, potasu, wapnia lub mieszaniny różnych soli. Stosuje się w nich także wodne roztwory kwasów nieorga-

nicznych (np.: solnego, siarkowego, fosforowego) oraz ich mieszaniny [3,8,12]. Są to więc płyny przewodzące prąd elektryczny - elektrolity, a proces roztwarzania ma charakter elektrochemiczny i przebiega zgodnie z prawami Faraday'a.

Funkcje cieczy obróbkowych stosowanych w erozji elektrochemicznej jedynie w niewielkim stopniu pokrywają się z cieczami używanymi w obróbce elektroerozyjnej (chłodzenie i odprowadzanie produktów erozji ze strefy roztwarzania). Wynika to głównie z właściwości cieczy. Elektrolit w obróbce elektrochemicznej ma przede wszystkim umożliwić sprawny przebieg reakcji elektrochemicznych inicjowanych i wspomaganych prądem elektrycznym o określonych parametrach.

W obróbkach strumieniowych (np. LBM, EBM, EJM, WJM) ciecze obróbkowe nie występują we wszystkich ich odmianach. Tam gdzie są one obecne (np. lasery wodne, obróbka strumieniowo-ścierna) podstawową ich funkcją jest dostarczanie energii niezbędnej do oddzielania cząstek materiału od przedmiotu obrabianego i odprowadzenie produktów erozji ze strefy obróbki. Do tego celu najczęściej stosowana jest woda, ewentualnie ze specjalnymi dodatkami (antyutleniającymi, powierzchniowo czynnymi itp.).

#### 4. REAKCJE CHEMICZNE ZACHODZĄCE W PŁYNACH OBRÓBKOWYCH

Środowisko w jakim zachodzi obróbka erozyjna, a także obecność prądu elektrycznego są czynnikami sprzyjającymi zachodzeniu reakcji chemicznych. Powodują one zmianę własności i właściwości płynów obróbkowych, a jednym z warunków stabilnego przebiegu procesu erozji zarówno elektrycznej, jak i elektrochemicznej jest trwałość cech płynów obróbkowych [12].

W zależności od rodzaju obróbki zmiany te mają różne formy, a skutki zachodzących zmian są także inne.

##### 4.1. OBRÓBKA ELEKTROEROZYJNA (EDM)

Wysoka temperatura jaka towarzyszy procesom wyładowania w kanale plazmowym w obróbce EDM powoduje, że zachodzący proces starzenia ma charakter termooksydacyjny. Powoduje on pogarszanie cech użytkowych cieczy obróbkowych.

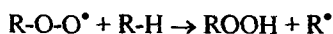
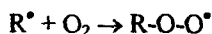
Proces utleniania cieczy węglowodorowych jest procesem rodnikowo-łańcuchowym, w którym można wyróżnić trzy fazy [7]:

- inicjowania, która ma bardzo duży wpływ na przebieg kolejnych faz,
- propagacji - rozwijania łańcucha,
- zakończenia w wyniku przerwania reakcji łańcuchowej.

W pierwszej fazie zapoczątkowana zostaje reakcja łańcuchowa w wyniku ataku uaktywnionej cząsteczki tlenu na wiązanie C-H i powstania w rezultacie hydroksynadtenu. Zachodzące reakcje można zapisać:

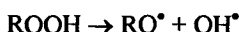


Druga faza - rozbudowa łańcucha zachodzi według reakcji:

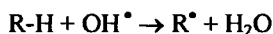
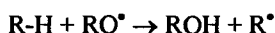




Powstający w tej fazie nadtlenek ROOH ma właściwości silnie utleniające. Rozpada się on homolitycznie na rodniki:



Wolne rodniki alkoksy- i hydroksylowe są bardzo reaktywne i reagują natychmiast, powodując oderwanie wodoru od węglowodoru, co można zapisać:



W wyniku powyższych oraz kolejnych reakcji, w węglowodorowej cieczy obróbkowej powstają aldehydy, ketony, kwasy i alkohole organiczne powodujące zmianę kwasowości dielektryka, pogarszając jego cechy użytkowe w obróbce EDM.

W trzeciej fazie wolne rodniki węglowodorowe i nadtlenkowe deaktywują się w wyniku rekombinacji, przerywając reakcję łańcuchową:



Reakcje te wspomagane są działaniem substancji antyutleniających, polegającym na rozkładzie silnych utleniaczy - wodoronadtlenków i rodników nadtlenków do związków nieaktywnych.

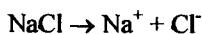
Poprawę użytkowych cech węglowodorowych płynów obróbkowych można uzyskać przez stosowanie dodatków modyfikujących. Ich działanie polega na obniżaniu intensywności zjawisk negatywnych i wzmacnianiu ich pozytywnego oddziaływania. Wśród tych dodatków są m. in.[4]:

- dyspergująco-myjące,
- inhibitory utleniania,
- inhibitory korozji,
- zwiększające lepkość.

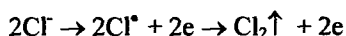
Dodatki te - ze względu na możliwe interakcje pomiędzy nimi - należy stosować kompleksowo w postaci pakietu i kontrolować w czasie obróbki istotne dla jej przebiegu wielkości charakteryzujące ciecz obróbkową.

## 4.2. OBRÓBKA ELEKTROCHEMICZNA

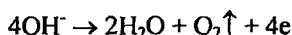
Ze względu na dużą różnorodność stosowanych w obróbce elektrochemicznej elektrolitów różne są także zachodzące reakcje chemiczne. Tworzeniu się wodnych roztworów soli lub kwasów towarzyszy dysocjacja elektrolityczna, w wyniku której powstają dodatnio i ujemnie naładowane jony, co dla roztworu soli kuchennej NaCl można zapisać:



Obecność prądu elektrycznego wywołuje migrację jonów: dodatnich do katody, ujemnych do anody. Na anodzie wykonanej, np. z żelaza mogą zachodzić więc reakcje rozładowywania anionów elektrolitu:



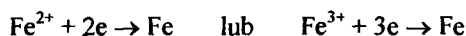
a po wyczerpaniu jonów  $\text{Cl}^-$  reakcje:



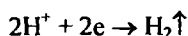
oraz roztwarzania żelaza, co można zapisać w uproszczonej formie:



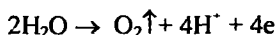
Na katodzie możliwe jest natomiast osadzanie żelaza według reakcji:



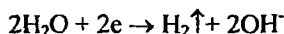
oraz dejonizacja jonów wodoru:



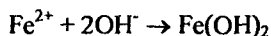
Na obu elektrodach zachodzi też elektroliza wody, z tym że na anodzie w g reakcji:



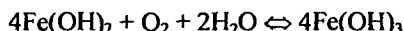
na katodzie:



Jony anody dyfundują następnie w głąb szczeliny międzyelektrodowej, w której zachodzą dalsze reakcje, np.:



oraz



Reakcje zachodzące w elektrolicie powodują, że zmienia się stężenie roztworu a wraz z nim inne wielkości charakteryzujące elektrolit, od których zależy przebieg obróbki elektroerozyjnej. W obróbce tej podstawową wielkością jest wymiar szczeliny międzyelektrodowej  $s$ , który można opisać wzorem:

$$s = \kappa_1 \cdot \eta \cdot k_v \cdot \frac{U - \Delta U_p}{v_f}$$

przy czym:

$$\kappa_1 = \kappa_0 (1 + \alpha \Delta T) \cdot (1 - c_H)^{1,5}$$

gdzie:

$\kappa_{(1,0)}$  - przewodność właściwa elektrolitu (konduktywność) odpowiednio: w szczelinie (1) i na wlocie do szczeliny (0),

$\eta$  - wydajność prądowa procesu roztwarzania,

$k_v$  - równoważnik elektrochemiczny obrabianego metalu,

$U$  - napięcie elektrodowe,

$\Delta U_p$  - spadek potencjału pola elektrycznego w warstwach przyelektrodowych (napięcie polaryzacyjne),

$v_f$  - prędkość posuwu narzędzia (elektrody),

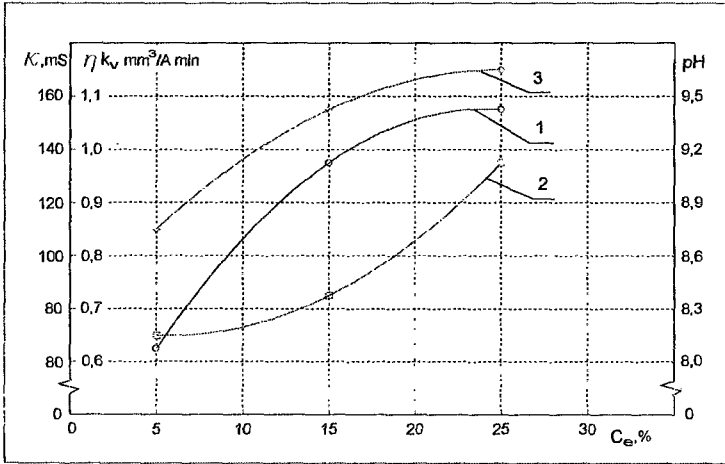
$\alpha$  - temperaturowy współczynnik przyrostu konduktywności elektrolitu

$\Delta T = T_1 - T_0$  - przyrost temperatury w szczelinie,

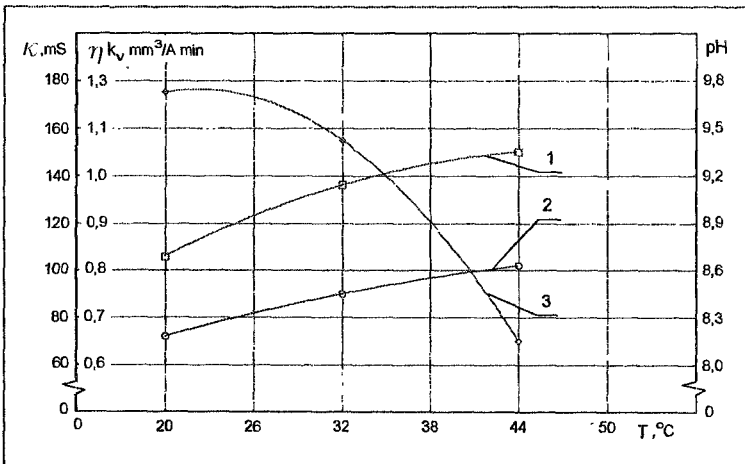
$c_H$  - koncentracja objętościowa wodoru.

Przeprowadzone badania, np. [12] wykazały istotną zależność wielkości (m. in. tworzących powyżej przedstawione funkcje) od stężenia elektrolitu. Wybrane wyniki w formie graficznej przedstawiono na rysunku 1.

Reakcje zachodzące w elektrolizie są egzotermiczne, powodują więc wzrost jego temperatury. Ma ona także istotny wpływ na analizowane wielkości. Wykresy obrazujące te zależności przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 1. Zależność własności elektrolitu: 1 – konduktywności  $\kappa$ , 2 – odczynu pH, oraz 3 – współczynnika obrabialności elektrochemicznej  $\eta k_v$ , od stężenia elektrolitu  $c_e$  w procesie drążenia (elektrolit: wodny roztwór  $\text{NaNO}_3$ , temperatura elektrolitu:  $T = 305 \text{ K}$ , obrabiany materiał: stal 3H13, prędkość drążenia:  $v_f = 0,4 \text{ mm/min}$ ) wg [12]



Rys. 2. Zależność własności elektrolitu: 1 – konduktywności  $\kappa$ , 2 – odczynu pH, oraz 3 – współczynnika obrabialności elektrochemicznej  $\eta k_v$ , od temperatury elektrolitu  $T$  w procesie drążenia (stężenie elektrolitu:  $c_e = 15 \%$ , pozostałe parametry – jak na rys. 1) wg [12]

Z przytoczonych powyżej wyników badań wynika więc jednoznacznie, że procesy starzenia elektrolitu w istotny sposób pogarszają warunki obróbki.

### 4.3. OBRÓBKA STRUMIENIOWA

W tym rodzaju obróbki erozyjnej cieczy obróbkowe (tam gdzie one występują) spełniają funkcję nośnika energii. Istotną ich rolą jest dostarczenie energii do strefy obróbki w postaci skoncentrowanego strumienia, gdyż tylko taka postać zapewnia efektywną obróbkę. Cieczą roboczą jest najczęściej woda lub jej mieszanina ze ścierniwem [6, 8]. Ponieważ ma ona odczyn obojętny nie zachodzą w niej reakcje chemiczne i tym samym nie ulega starzeniu.

Woda jako rozpuszczalnik polarny prawie pozbawiona jonów (zawiera jedynie jony z dysocjacji własnej  $H^+$  i  $OH^-$  w ilości po  $10^{-7}$  mola/dm<sup>3</sup> każdego) jest dielektrykiem o nieszkodliwych dla środowiska produktach rozkładu.

Skutki procesów utleniania się obrabianych powierzchni w wyniku kontaktu z wodą, jakie występują w przypadku niektórych obrabianych materiałów, można minimalizować dodatkami antykorozyjnymi dodawanymi do cieczy obróbkowych.

## 5. WARUNKI NIEZBĘDNE DO RECYRKULACJI PŁYNÓW OBRÓBKOWYCH

Jak już wcześniej stwierdzono jedną z cech jaką powinny charakteryzować się metody obróbki stosowane w nowoczesnym przemyśle jest możliwie najmniej szkodliwe oddziaływanie ich na środowisko. Jednym ze sposobów pozwalających osiągnąć ten cel jest używanie mediów występujących w procesach technologicznych w obiegu zamkniętym. Wymaga to zwiększenia ich trwałości lub zastosowania procesów regeneracji (w szerokim pojęciu) i recykulacji.

Rozwiązanie takie może dotyczyć płynów obróbkowych będących przedmiotem rozważań w niniejszej pracy. Jak wcześniej stwierdzono cieczy te ulegają starzeniu i zanieczyszczeniu produktami obróbki. Aby więc możliwa była recykulacja płynów obróbkowych niezbędne jest dokonanie ich regeneracji polegającej na przywróceniu im pierwotnych cech [9, 12]. Wymaga to zrealizowania dwóch zasadniczych działań technologicznych:

- oczyszczenia płynu z produktów erozji oraz związków powstałych w wyniku reakcji chemicznych,
- zidentyfikowania stopnia zmian stanu płynu obróbkowego i uzupełnienia go składnikami przywracającymi cechy początkowe.

Pierwsze z powyższych działań można zrealizować, wykorzystując do tego metody:

- mechaniczne, np. filtrowanie, rozdzielanie grawitacyjne (wirowanie),
- fizyczne, np. sedymentację,
- chemiczne, np. flotację, koagulację,
- połączenie wyżej wymienionych metod (w zależności od możliwości i potrzeb).

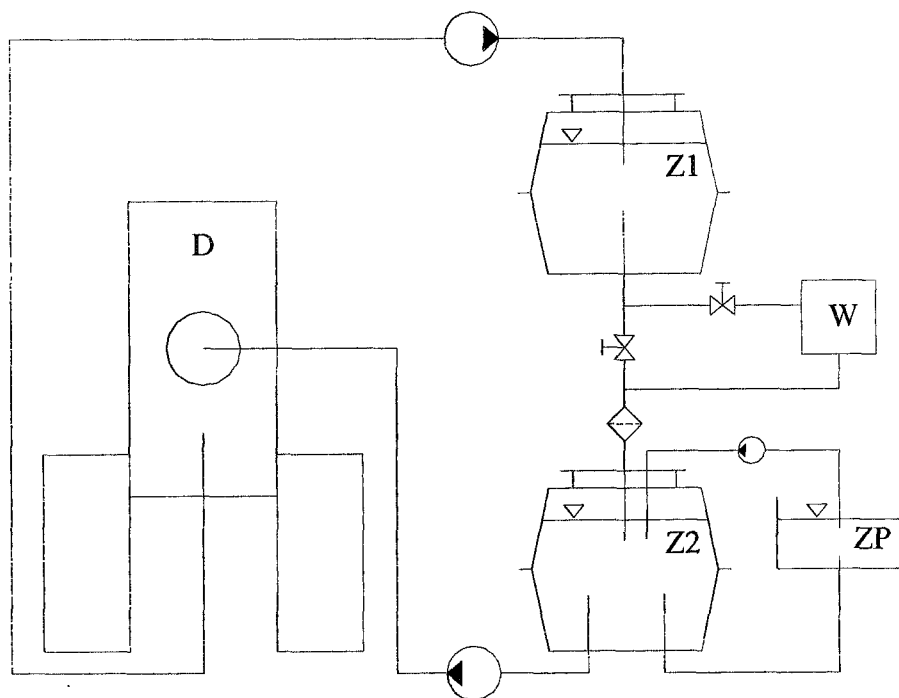
Fracje stanowiące zanieczyszczenia płynów obróbkowych powinny być następnie utylizowane, aby uniknąć zanieczyszczenia środowiska. Metody utylizacji zależą głównie od ich składu chemicznego [9].

Fracja oczyszczona stanowi podstawę płynu przewidzianego do recykulacji. Reakcje chemiczne, temperatura a także procesy oczyszczania mogą jednak tak zmienić

jego własności i właściwości, że bez identyfikacji tych zmian nie należy go powtórnie wprowadzać do obiegu. Ciągłe monitorowanie składu chemicznego płynu obróbkowego jest technicznie możliwe ale jednocześnie uciążliwe i kosztowne. Dlatego też często realizuje się je pośrednio. Zmianę stężenia roztworu stanowiącego elektrolit w obróbce elektrochemicznej można na przykład zbadać laboratoryjnie w funkcji czasu obróbki lub ilości materiału roztrzonego i korygować okresowo, weryfikując w ustalonym cyklu inne jego istotne dla obróbki parametry, np.: konduktywność, kwasowość.

Temperaturę płynu obróbkowego - drugi istotny czynnik technologiczny w obróbkach erozyjnych - można stabilizować automatycznie.

Realizacja powyższych zabiegów technologicznych wymaga właściwego zabezpieczenia technicznego. Potrzeby w tym zakresie należy uwzględnić już na etapie projektowania obrabiarki. Względy te, a także zagadnienia związane z bezpieczeństwem pracy na obrabiarkach tego typu powodują, że układy zasilania w płyny obróbkowe wraz z układami peryferyjnymi są niekiedy bardzo rozbudowane [2, 3]. Przykładowy schemat obiegu elektrolitu w drążarce EDCA10 przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Ideowy schemat obiegu elektrolitu w drążarce EDCA10

Składa się on z dwóch magazynowych zbiorników elektrolitu. Do zbiornika górnego (Z1) zbierany jest elektrolit zanieczyszczony produktami erozji. Spełnia on także funkcję odstojnika, z którego elektrolit jest grawitacyjnie podawany - w zależności od potrzeb - do wirówki (W) lub bezpośrednio na filtr i dalej do zbiornika dolnego (Z2) połączonego ze zbiornikiem pomocniczym (ZP), w którym dokonuje się niezbędnych pomiarów wykorzystywanych do ewentualnej korekty składu i temperatury elektrolitu.

Tak przygotowany w górnym zbiorniku (Z1) elektrolit powraca z dolnego zbiornika do obiegu roboczego i bierze udział w realizacji procesu technologicznego w drążarce (D).

Jest to przykład układu niezbyt rozbudowanego, który zawiera jednak elementy niezbędne do prowadzenia obróbki elektrochemicznej w stabilnych warunkach, umożliwiające recykulację elektrolitu. Zapewnia to tym samym opisanym procesom obróbki minimalizację szkodliwego ich oddziaływania na środowisko.

## 6. PODSUMOWANIE

Celem niniejszej pracy było uwypuklenie ekologicznego oddziaływania procesów technologicznych, w których wykorzystuje się obróbki erozyjne. Przy opracowywaniu nowych metod obróbki oraz obrabiarek, które będą je realizowały aspekt ten powinien być traktowany równorzędnie z zagadnieniami technicznymi, technologicznymi ekonomicznymi.

W przedstawionych powyżej rozważaniach dokonano pewnych, czasami nawet znacznych uproszczeń. Dotyczy to głównie zjawisk zachodzących podczas opisanych metod obróbki. Obróbki erozyjne, a szczególnie bardzo liczne obecnie obróbki hybrydowe są tak różnorodne, że dokładne omówienie, nawet w tak wąskim aspekcie, jak możliwość ich recykulacji przekraczałaby ramy niniejszej pracy. Poruszane zagadnienia są jednak zdaniem autorów najistotniejsze dla przyjętego zakresu opracowania.

## LITERATURA

- [1] Albiński K.: Rozwój erozyjnych metod obróbki materiałów. Materiały II Konferencji EM'86 (Electromachining), Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1986.
- [2] Chuchro M., Czekał J., Zybura-Skrabalak M.: Wybrane zagadnienia bezpiecznej eksploatacji obrabiarek elektrochemicznych. Materiały V Konferencji EM'97 (Electromachining), Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz-Golub Dobrzyń 1997.
- [3] Gołąbczak A.: Elektrochemiczne ostrzenie ściernic z zastosowaniem prądu przemiennego. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej nr 762, s. Rozprawy z. 234, Łódź 1996.
- [4] Marczak R., Ozimina D., Senatorski J., Scholl H.: Ocena aktywności tribologicznej dodatków do smarów i cieczy technologicznych. Tribologia nr 5-6/1997.
- [5] Musiał J., Styp-Rekowski M.: Struktura geometryczna powierzchni kształtowanych metodami erozyjnymi. Materiały V Konferencji EM'97 (Electromachining). Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz-Golub Dobrzyń 1997.
- [6] Ocoś K. E.: Kształtowanie ceramicznych materiałów technicznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1996.
- [7] Płaza S.: Fizykochemia procesów tribologicznych. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 1997.
- [8] Ruszaj A.: Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi. Prace Instytutu Obróbki Skrawaniem. Monografia, Kraków 1999.

- [9] Styp-Rekowski M.: Recykulacja technicznych płynów obróbkowych. Materiały VI Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Recykulacja w budowie maszyn”, Bydgoszcz 1996.
- [10] Tomczak J.M.: Ciecze dielektryczne stosowane w obróbce elektroerozyjnej. Materiały II Konferencji EM'86 (Electromachining). Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1986.
- [11] Waszkiewicz L.: Podstawy teoretyczne obróbki anodowo-mechanicznej. Materiały Szkoły Naukowej Obróbek Erozyjnych. Wydawnictwo Sekcji Podstaw Technologii KBM PAN, Warszawa 1990.
- [12] Zybura-Skrabalak M., Ruszaj A., Chuchro M.: Stabilizacja właściwości elektrolitu w procesie obróbki elektrochemicznej. Materiały IV Konferencji EM'94 (Electromachining), Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz-Ciechocinek 1994.

## TECHNOLOGY- CONDITIONED WORKING FLUIDS RECYCLING IN EROSIIVE MACHINING

### Summary

The present paper presents an analysis of manufacturing factors which essentially affect erosive machining, highlighting working fluid characteristics and properties whose stability remains very important for technological erosive machining conditions. Ensuring stability is also basic for working fluid recycling which is also an environmental activity and as such should be taken into account while machinery designing and manufacturing along with technical and economic factors.

Key words: recycling, recycling method, erosive machining, working fluid

## SYMULACJA KOMPUTEROWA OBRÓBKII ELEKTROCHEMICZNEJ ELEKTRODĄ DRGAJĄCĄ

Tomasz Paczkowski

Wydział Mechaniczny Akademii Techniczno-Rolniczej,  
Zakład Obrabiarek i Robotów,  
ul. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W artykule przedstawiono przykłady symulacji komputerowej obróbki elektrochemicznej elektrodą drgającą. Opisano założenia do modelu matematycznego i numerycznego.

*Słowa kluczowe:* obróbka elektrochemiczna, ECM, symulacja komputerowa, elektroda drgająca

### 1. WSTĘP

W czasie drażenia ECM prądem ciągłym elektroda robocza wykonuje najczęściej ruch postępowy w kierunku powierzchni obrabianej. Trudności uzyskania wysokiej dokładności obróbki wiążą się głównie z nieoznaczonością szczeliny roboczej, której nie można zmierzyć bezpośrednio w czasie procesu. Wiadomo, że ze względu na dokładność obróbki proces powinien być prowadzony przy możliwie małej grubości szczeliny międzyelektrodowej [4]. Przy stosowaniu prądu ciągłego zmniejszanie grubości jest ograniczone zjawiskami w niej zachodzącymi jak wzrost koncentracji fazy gazowej w elektrolicie oraz jego temperatury. Jednym ze sposobów podwyższania dokładności oraz stabilności procesu ECM jest wprowadzenie drgań elektrody roboczej [3].

W tym przypadku grubość szczeliny międzyelektrodowej zmienia się periodycznie od minimum, stwarzając dobre warunki do uzyskania dużej dokładności obróbki i dobrego odwzorowania elektrody roboczej do maksimum, które umożliwia dobre przepłukiwanie strefy obróbki przy jednocześnie występujących małych gęstościach prądu - rys. 1.

Przedmiotem symulacji komputerowej opisanej w artykule jest obróbka elektrochemiczna elektrodą drgającą.

### 2. MODEL MATEMATYCZNY PROCESU ECM ELEKTRODĄ DRGAJĄCĄ

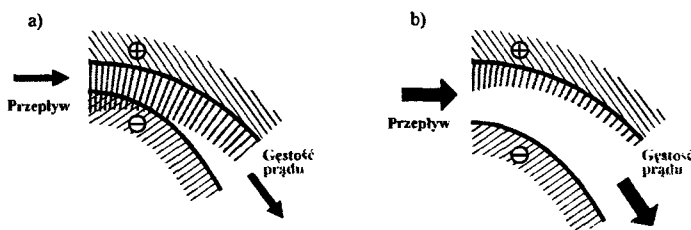
Jednym z podstawowych zadań analizy tej obróbki jest wyznaczenie zmian w czasie grubości szczeliny oraz położenia anody, czyli powierzchni obrabianej.

W modelu matematycznym przyjęto następujące założenia upraszczające, w wyniku których powstaje określony model fizyczny obiektu.



Zakłada się:

- przepływ dwuwymiarowy,
- przepływ homogeniczny,
- przepływ dwufazowy pęcherzykowy (elektrolit modelowany jest jako mieszanina cieczy(woda + sól) oraz gazu (wodór)),
- faza gazowa rozłożona jest równomiernie w poprzek szczeliny,
- pomija się fazę produktów roztworzonego metalu,
- przepływ dwufazowy jest przepływem bezpoślizgowym,
- pomija się ciepło powstające w wyniku dyssypacji energii mechanicznej podczas przepływu,
- pomija się ciepło powstające w wyniku reakcji chemicznych i elektrochemicznych,
- pomija się wydzielanie tlenu na anodzie,
- pomija się współczynniki strat lokalnych na wlocie i wylocie ze szczeliny,
- stałą wydajność prądową wodoru (brak danych doświadczalnych),
- dla danego zestawu - metal obrabiany elektrolit - przyjmuje się współczynnik obrabialności  $k$ , określony z badań doświadczalnych,
- liniowy rozkład potencjału pola elektrycznego wzdłuż grubości szczeliny [1].



Rys. 1. Warunki ECM elektrodą drgającą: a) dla minimalnej szczeliny międzyelektrodowej, b) dla maksymalnej szczeliny międzyelektrodowej

Przepływ elektrolitu wymuszony jest stałym gradientem ciśnienia  $\Delta p/L$ . Powierzchnia dolna anoda jest nieruchoma, natomiast górna jest powierzchnią drgającą, powodując, że:

$$h = h_0 + A \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (1)$$

gdzie:

$A$  - amplituda drgań wymuszonych,

$\omega$  - częstość drgań,

$h_0$  - grubość szczeliny w warunkach początkowych.

Układ równań opisujących przepływ dwufazowy pęcherzykowy elektrolitu można przedstawić następująco po uprzednim uśrednieniu w poprzek szczeliny równań wynikających z zasady zachowania, masy pędu i energii [2].

Równania wynikające z zasady zachowania masy odpowiednio dla elektrolitu - cieczy i wodoru - gazu są następujące:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{el}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_{el} v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_{el} v_y) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_h) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_h v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_h v_y) = j \eta_H k_H \quad (3)$$

gdzie:  $\rho_{el} = h(1-\beta)\rho_{el}^0$ ;  $\rho_h = h\beta \cdot \rho_h^0$  - odpowiednio gęstość elektrolitu i wodoru,  
 $v_x, v_y$  - składowe wektora prędkości przepływu,  
 $k_H$  - równoważnik elektrochemiczny wodoru,  
 $\eta_H$  - wydajność prądowa roztwarzania,  
 $\beta$  - koncentracja objętościowa fazy gazowej.

Równanie wynikające z zasady zachowania pędu odpowiednio dla elektrolitu i wodoru przyjmuje postać:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{el}\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_{el}v_x\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_{el}v_y\bar{v}) = -(1-\beta)h\Delta p - \bar{\tau}_{el} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_h\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_hv_x\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_hv_y\bar{v}) = -h\beta\Delta p - \bar{\tau}_h - j\eta_H k_H \bar{v} \quad (5)$$

gdzie:

$$\tau_{el} = \frac{\lambda(1-\beta)\rho_{el}v^2}{8} \quad \tau_{elx} = \frac{\tau_{el}v_x}{v} \quad \tau_{ely} = \frac{\tau_{el}v_y}{v}; \quad v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

$$\lambda = \frac{96}{Re_{el}} \quad \text{gdym: } Re_{el} < 2300 \quad \lambda = \frac{0,3164}{Re_{el}^{0,25}} \quad \text{gdym: } Re_{el} \geq 2300$$

$$Re = \frac{h\rho_{el}(1-\beta)v}{\mu_{el}} \quad \mu_{el} = \mu_0 \exp[-m(T-T_0)] \quad m=0,019$$

$$\tau_h = \frac{\lambda_h\rho_hv^2}{8} \quad \tau_{hx} = \frac{\tau_hv_x}{v} \quad \tau_{hy} = \frac{\tau_hv_y}{v} \quad \lambda_h = \frac{96}{Re_h} \quad Re_h = \frac{h\rho_h\beta v}{\mu_h}$$

Równanie wynikające z zasady zachowania energii ma postać:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{el}T_{el}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_{el}v_xT_{el}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_{el}v_yT_{el}) = \frac{Q}{c_p} \quad (6)$$

gdzie:

$$Q = \alpha \cdot j \quad j = \frac{\kappa \cdot U_c}{h} \quad \alpha = 1 - \frac{\Delta U_c}{U_c} \quad \kappa = \kappa_0(1-\beta)^{1,5} [1 - \alpha(T-T_0)]$$

Układ równań (4÷6) pozwala określić rozkłady: prędkości, ciśnienia, temperatury, oraz przewodność właściwą elektrolitu, tzw. konduktywność.

Aby znaleźć kształt powierzchni obrabianej korzystano z zależności na prędkość przemieszczania się punktów anody wzdłuż osi y. Zmiana kształtu anody wynika z nierównomierności prędkości roztwarzania anodowego, która na podstawie prawa Faraday'a dla punktu A (rys. 2) przedstawia zależność:

$$\frac{\partial Y_A}{\partial t} = k_v j_A \sqrt{1 + \left(\frac{\partial Y}{\partial X}\right)^2} \quad (7)$$

gdzie:

$j_A = j(X_A, Y_A, t)$  - gęstość prądu na anodzie w punkcie A,

$k_v$  - równe jest objętości materiału usuniętego przez roztwarzanie anodowe przy przepływie jednostkowego ładunku elektrycznego.

Gęstość prądu opisuje równanie:

$$j = -\kappa \cdot \text{grad } u \quad (8)$$

gdzie:

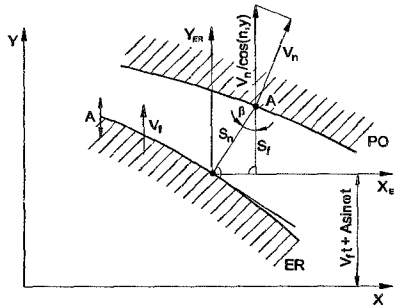
- $u$  - potencjał pola elektrycznego między elektrodami,
- $\kappa$  - przewodność właściwa, konduktywność.

Rozkład potencjału  $u$  opisuje równanie:

$$\nabla^2 u = 0 \quad (9)$$

przy warunkach brzegowych:

- na elektrodzie roboczej  $y = f(x, t); u(f) = 0$
- na anodzie  $y = F(x, t); u(F) = U - E$
- na powierzchniach izolowanych  $\left. \frac{\partial u}{\partial n} \right|_{GI} = 0$



Rys. 2. Schemat obróbki elektrochemicznej z drgającą elektrodą roboczą.

W wyniku linearyzacji potencjału

$$|\text{grad } u|_A \cong \frac{U - E}{S_n} \quad (10)$$

$S_n$  jest odległością punktu A na PO od ER. Odległość  $S_n$  w kierunku posuwu ER wynosi:

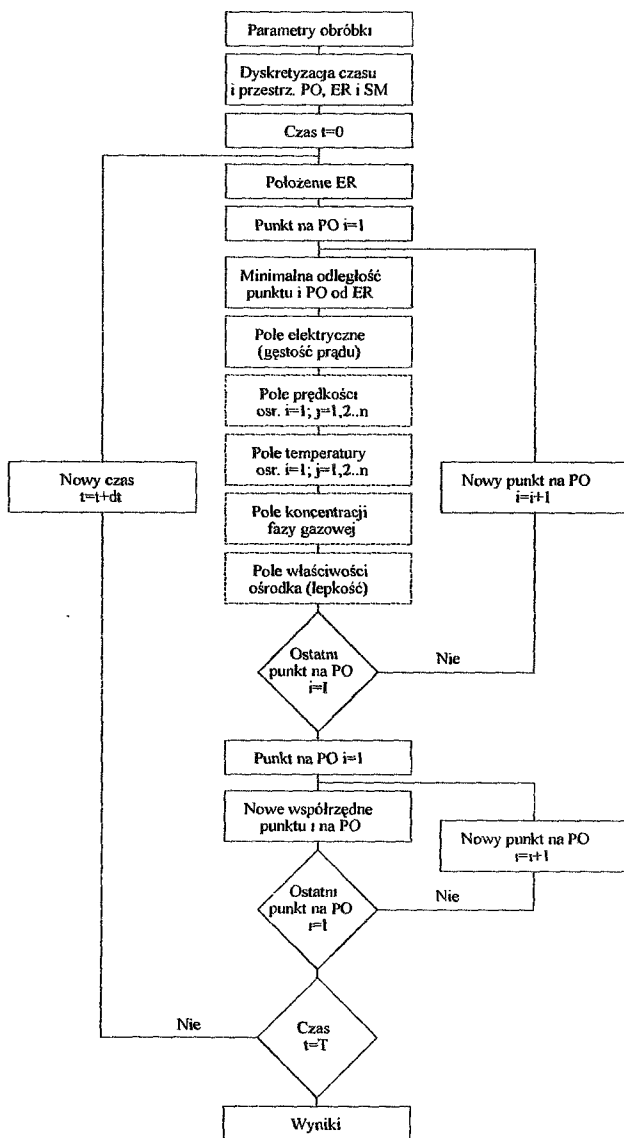
$$S_n = \frac{Y_A - (V_f \cdot t + A \sin(\omega \cdot t))}{\cos \beta} \quad (11)$$

ostatecznie prędkość przemieszczania się punktów anody opisuje zależność:

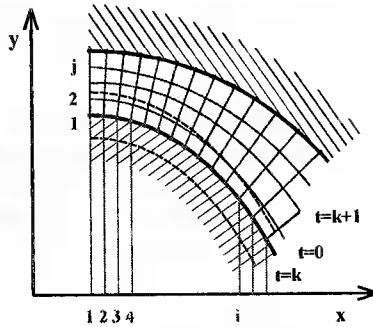
$$\frac{\partial Y_A}{\partial t} = k_v \kappa \frac{(U - E) \cos \beta}{Y_A - V_f \cdot t - A \sin(\omega \cdot t)} \sqrt{1 + \left( \frac{\partial Y}{\partial X} \right)^2} \quad (12)$$

### 3. MODEL NUMERYCZNY PROCESU ECM ELEKTRODĄ DRGAJĄCĄ

Do rozwiązania równań cząstkowych częściowo wykorzystano metodę Eulera, zastępując pochodne cząstkowe różnicami skończonymi. Algorytm rozwiązania układu równań przedstawiono na rysunku 3. Linia przerywaną zaznaczono procedury rozszerzające model numeryczny i opisujące właściwości przepływu elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej. Na rysunku 4 pokazano dyskretyzację czasu i przestrzeni.



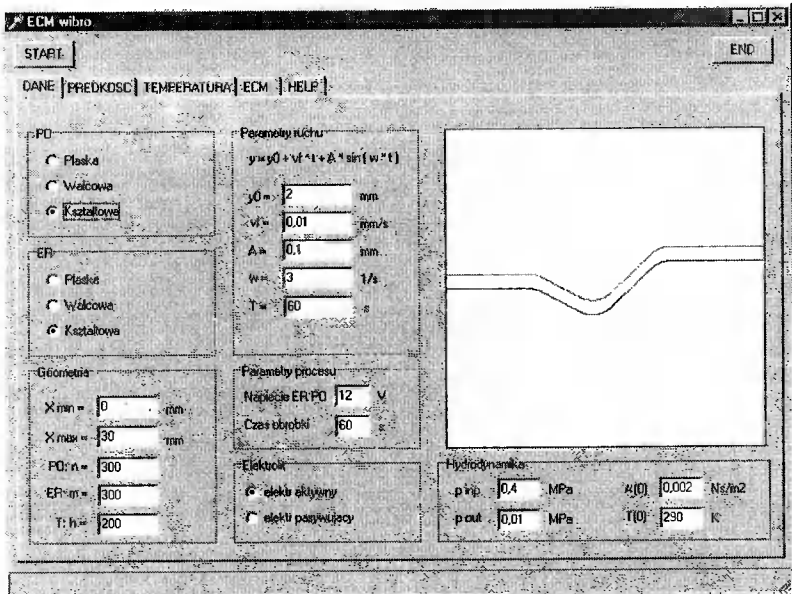
Rys. 3. Algorytm rozwiązywania układu równań modelu matematycznego



Rys. 4. Dyskretyzacja czasu i przestrzeni

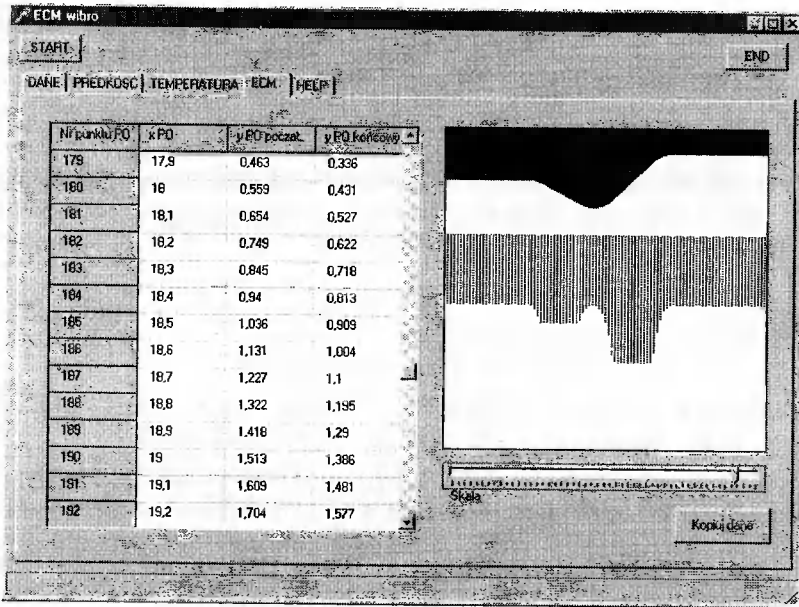
#### 4. OPIS PROGRAMU SYMULACJI KOMPUTEROWEJ PROCESU

W oparciu o przedstawiony model numeryczny napisano program komputerowy do symulacji procesu obróbki elektrochemicznej elektrodą drgającą. Wprowadzanie danych do programu odbywa się w pierwszym module programu. Wprowadza się cechy geometryczne przedmiotu obrabianego, elektrody roboczej oraz parametry opisujące jej ruch, w tym ruch drgający, oraz wyróżniki procesu ECM i rodzaj elektrolitu. Obliczenia można prowadzić z zadaną dokładnością podziału elektrody roboczej, oraz przedmiotu obrabianego - rysunek 5.



Rys. 5. Moduł wprowadzania danych

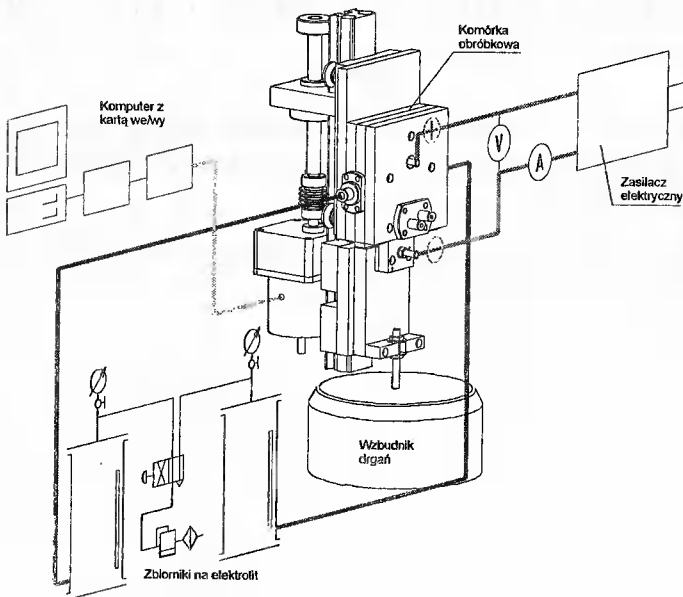
W kolejnym module przedstawiono symulację procesu wraz z tablicą wyników oraz wykres odchyłek przedmiotu obrabianego względem elektrody - rysunek 6.



Rys. 6. Wyniki obliczeń

Natomiast w kolejnych modułach przewiduje się wizualizację obliczeń rozkładu prędkości i temperatury w zadanym przekroju szczeliny międzyelektrodowej.

Model matematyczny wykorzystany w programie symulacyjnym będzie zweryfikowany doświadczalnie na stanowisku badawczym - rysunek 7.



Rys. 7. Stanowisko badawcze

Na rys. 7 przedstawiono schemat budowy stanowiska badawczego. Drgania wywołuje wzbudnik elektrodynamiczny WED-04. Końcówka wzbudnika związana jest z ER poprzez suport ER osadzony na prowadnicy. Na tej samej prowadnicy osadzony jest drugi suport, z którym związana jest komórka obróbkowa. Porusza się on ruchem postępowym z prędkością  $V_f$ . Napędzana jest silnikiem krokowym poprzez przekładnię redukcyjną 1:50 oraz śrubę toczną. Silnik sterowany jest programowo za pomocą napędu firmy ISEL i komputera klasy PC. Na rys. 7 przedstawiono również zasilanie komórki obróbkowej energią elektryczną i elektrolitem.

## LITERATURA

- [1] Dąbrowski L.: Podstawy komputerowej symulacji kształtowania elektrochemicznego. Prace Naukowe PW, s. Mechanika, 154, Warszawa 1992.
- [2] Klovov V.V., Filatov E.I., Tikhonov A.S.: The Complex Computer Simulation of the ECM Blades Shaping. Proceedings of 15<sup>th</sup> International Conference on Computer-Aided Production Engineering CAPE'99.
- [3] Kozak J.: Analiza procesu obróbki elektrochemicznej elektrodą drgającą. Mater. V Konf. EM'97 (Electromachining), Bydgoszcz – Golub-Dobrzyń 1997.
- [4] Kozak J.: Kształtowanie powierzchni obróbką elektrochemiczną – bezstykową (ECM). Prace Naukowe PW, s. Mechanika, 41, Warszawa 1976.

## COMPUTER SIMULATION OF ELECTROCHEMICAL MACHINING WITH VIBRATING TOOL ELECTRODE

### Summary

The present paper investigates examples of electrochemical machining with a vibrating tool electrode were presented. The research concerned guidelines of the mathematical and numerical model.

Key words: electrochemical machining, (ECM), computer simulation, vibrating electrode

## ANALIZA SYSTEMÓW STEROWANIA PRZECINAREK ANODOWO - MECHANICZNYCH

Edward Pająk

Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej,  
Zakład Projektowania Technologii,  
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań

W referacie przedstawiono stosowane już w przecinarkach anodowo-mechanicznych oraz będące w sferze badań układy sterowania przecinarek. Przedstawiono również współpracujący z układem sterowania system komputerowego doboru wielkości nastawnych przecinarki.

*Słowa kluczowe:* przecinanie anodowo-mechaniczne, obrabiarki, sterowanie

### 1. WSTĘP

Od przeszło 20 lat w Politechnice Poznańskiej prowadzone są prace dotyczące przecinania anodowo-mechanicznego. Wymiernym efektem tych prac było między innymi uruchomienie produkcji przecinarek zarówno uniwersalnych, jak i specjalnego przeznaczenia. Efektywne wykorzystanie tych urządzeń technologicznych, tzn. uzyskanie wysokiej wydajności przecinania - przy zachowaniu na pożądanym poziomie pozostałych parametrów technologicznych - wymaga:

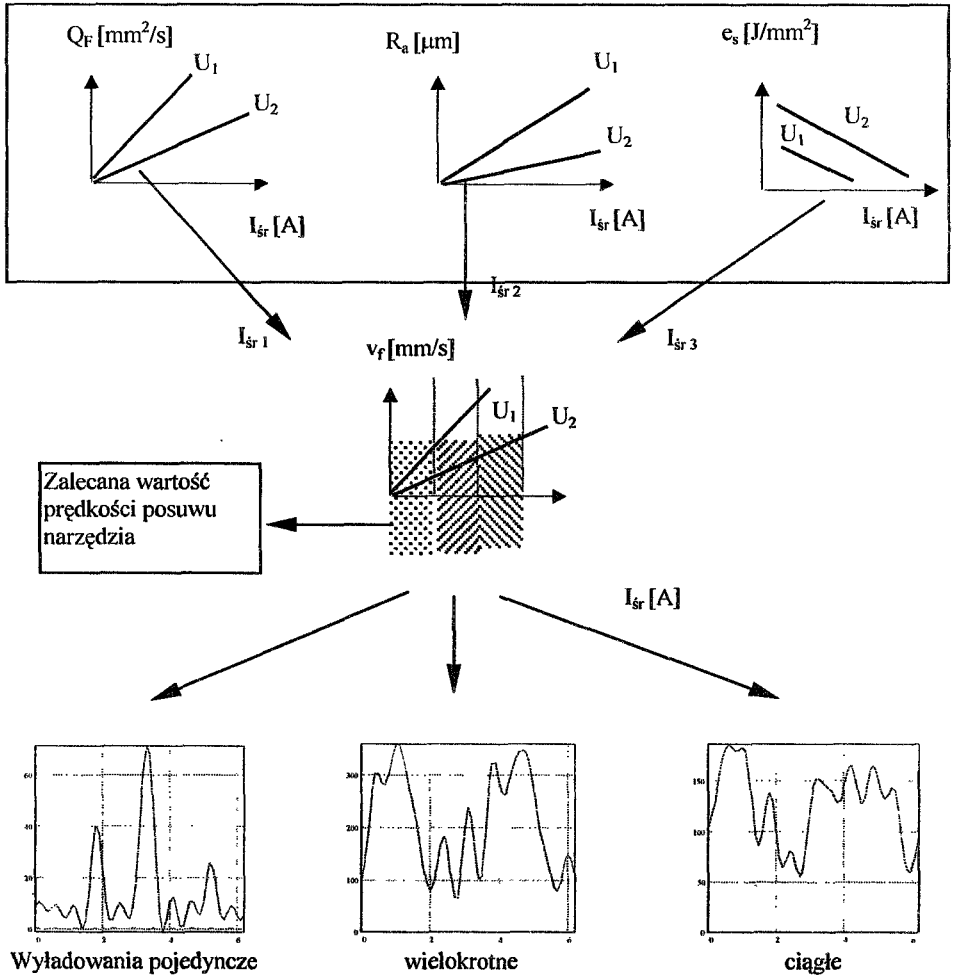
- doboru takich wielkości nastawnych przecinarki, które umożliwią spełnienie określonych wyżej wymagań,
- sterowania przebiegiem procesu w taki sposób, aby dokonać korekty przyjętych wielkości nastawnych w przypadku wystąpienia zakłóceń w przebiegu procesu przecinania.

Istota technologii przecinania anodowo-mechanicznego została już przedstawiona w szeregu publikacjach [3, 5], stąd nie ma potrzeby jej powtarzania. Ważne jest jednak przypomnienie, że o podstawowych parametrach technologicznych procesu decydują dwie główne wielkości nastawne: napięcie prądu  $U$  [V] oraz prędkość posuwu narzędzia  $v_f$  [m/sek.] – rysunek 1.

Na rysunku przedstawiono zależność wydajności przecinania oraz chropowatości powierzchni i sumarycznego zużycia energii w funkcji średniego natężenia prądu technologicznego. Wartość tego parametru zależna jest również od napięcia  $U$ , które jest jedną z podstawowych wielkości nastawnych przecinarki.

Efektom procedury doboru warunków przecinania jest określenie obok napięcia, średniego natężenia prądu, które umożliwiają uzyskanie maksymalnej wydajności przy dopuszczalnych wartościach pozostałych wielkości (chropowatość, zużycie energii). Ze względu na liniową zależność prędkości posuwu i natężenia prądu technologicznego, określonej wartości natężenia prądu odpowiada prędkość posuwu narzędzia.





Rys. 1. Zależności procesu cięcia anodowo-mechanicznego

Wyznaczona w opisany sposób wartość prędkości posuwu jest obok napięcia kolejną wielkością nastawną procesu wprowadzaną do układu sterującego przecinarki.

Wyładowania elektryczne, będące głównym czynnikiem sprawczym usuwania materiału podczas przecinania anodowo-mechanicznego, ze względu na stochastyczny charakter mają zróżnicowaną energię. Jednakże prowadzone badania wykazały, że można je ująć w następujące podstawowe cykle:

- cykl wyładowań pojedynczych - charakteryzujący się stosunkowo niewielką energią wyładowań, co umożliwia przecinanie materiały z niewielką wydajnością lecz stosunkowo korzystną jakością powierzchni po cięciu (obróbka dokładna),
- cykl wyładowań wielokrotnych,
- cykl wyładowań ciągłych o największej energii impulsów. Umożliwia on przecinanie materiału z maksymalną wydajnością lecz i najgorszą jakością powierzchni po cięciu (obróbka wydajna).

Tak więc charakteryzując pożądany cykl impulsów, można określić wymagany obszar efektów obróbki.

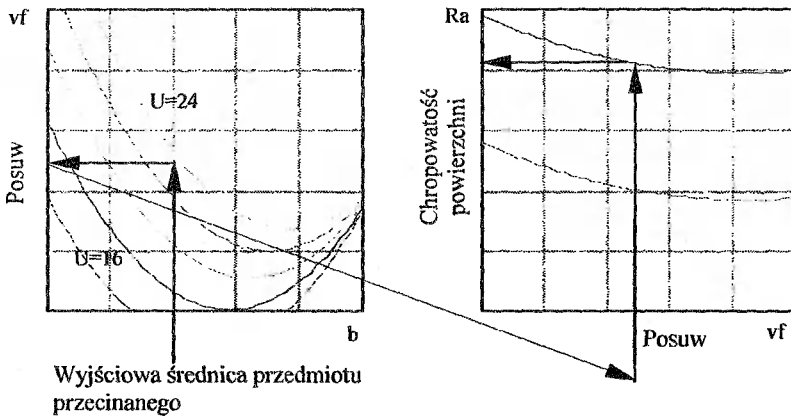
Informacje te stanowią zbiór „danych wyjściowych” przekazywanych do układu sterującego przecinarki.

## 2. STEROWANIE PROCESEM PRZECINANIA ANODOWO-MECHANICZNEGO

### 2.1. SYSTEM KOMPUTEROWEGO WSPOMAGANIA DOBORU WARUNKÓW PRZECINANIA ANODOWO-MECHANICZNEGO

Napięcie zasilania narzędzia i przedmiotu przecinanego  $U$  oraz prędkość posuwu narzędzia  $v_f$ , stanowią (jak przedstawiono poprzednio) podstawowe wielkości nastawne przecinarki. Dobór wartości tych wielkości zależy przede wszystkim od rodzaju materiału przecinanego a także od wymiaru poprzecznego przecinanego materiału.

Szeroki zakres badań, których wyniki opublikowano między innymi w pracy [6] pozwolił na opracowanie modeli matematycznych ujmujących relację między parametrami technologicznymi, a wielkościami nastawnymi. Współczynniki regresji tych modeli (mających postać wielomianu) są zróżnicowane w zależności od rodzaju przecinanego materiału. Na rys. 2 przedstawiono przykładowe wykresy sporządzone na podstawie wspomnianych wyżej modeli.



Rys. 2. Dobór wyjściowych wielkości nastawnych procesu cięcia anodowo-mechanicznego

Dla określonego wymiaru przedmiotu przecinanego „ $b$ ” oraz stosowanego napięcia  $U$ , dobiera się (przykładowo na podstawie wykresu stanowiącego interpretację graficzną modelu matematycznego prędkości posuwu) wartość prędkości posuwu narzędzia. Jest to wielkość od której zależą efekty procesu przecinania. Korzystając z kolejnego wykresu opracowanego na podstawie modelu matematycznego dotyczącego parametru chropowatości powierzchni  $R_a$ , ustalić można dla wyznaczonej uprzednio wartości prędkości posuwu prognozowaną wartość chropowatości powierzchni po przecinaniu.

Tok postępowania związany z doбором wyjściowych wielkości nastawnych można usprawnić przez zastosowanie systemu komputerowego doboru wielkości nastawnych przecinarki anodowo-mechanicznej. System ten zaprezentowany został w pracy [6]. Jego podstawą są modele matematyczne w postaci wielomianów 2 stopnia, których współczynniki regresji zróżnicowane są w zależności od przecinanego materiału. Określając rodzaj materiału przecinanego z tablicy współczynników regresji dobierane są właściwe ich wartości. Podając wymiar przedmiotu przecinanego i proponowaną wartość napięcia (domyślnie przyjmowana jest maksymalna wartość napięcia tzn. 26V), program oblicza maksymalną dla danych warunków wartość prędkości posuwu narzędzia - czyli maksymalną wydajność przecinania. Wyznaczona wartość posuwu umożliwia obliczenie pozostałych parametrów technologicznych (chropowatości powierzchni, zużycia energii elektrycznej, wskaźnika zużycia narzędzia i głębokości strefy wpływów ciepła). W postępowaniu iteracyjnym program określa, czy wartości tych parametrów są korzystniejsze od dopuszczalnych założonych przez technologa. W przypadku nie spełnienia tych wymagań następuje korekta wielkości nastawnych, a więc zmniejszenie wartości napięcia w pierwszej kolejności a następnie prędkości posuwu. Postępowanie korekcyjne zatrzymuje się w momencie, kiedy wszystkie wartości parametrów technologicznych są korzystniejsze od dopuszczalnych.

## 2.2. SYSTEMY STEROWANIA PRZECINARKAMI ANODOWO-MECHANICZNYMI

Proces obróbki anodowo-mechanicznej jest procesem stochastycznym, a próba deterministycznego określania warunków przecinania możliwa jest jedynie na etapie wstępnego; początkowego oszacowania wielkości nastawnych przecinarki (patrz pkt 2.1). W trakcie procesu przecinania zmienne warunki realizacji procesu (długość linii „kontaktu” narzędzie-przedmiot, sposób doprowadzenia elektrolitu do strefy cięcia itp.), stwarzają konieczność korekty przyjętych wstępnie wielkości nastawnych, tak aby w efekcie cięcia uzyskać zakładane efekty technologiczne.

W przecinarkach anodowo-mechanicznych zbudowanych przez zespół Politechniki Poznańskiej lub przy jego współudziale stosowano następujące rodzaje sterowania, które wykorzystywały:

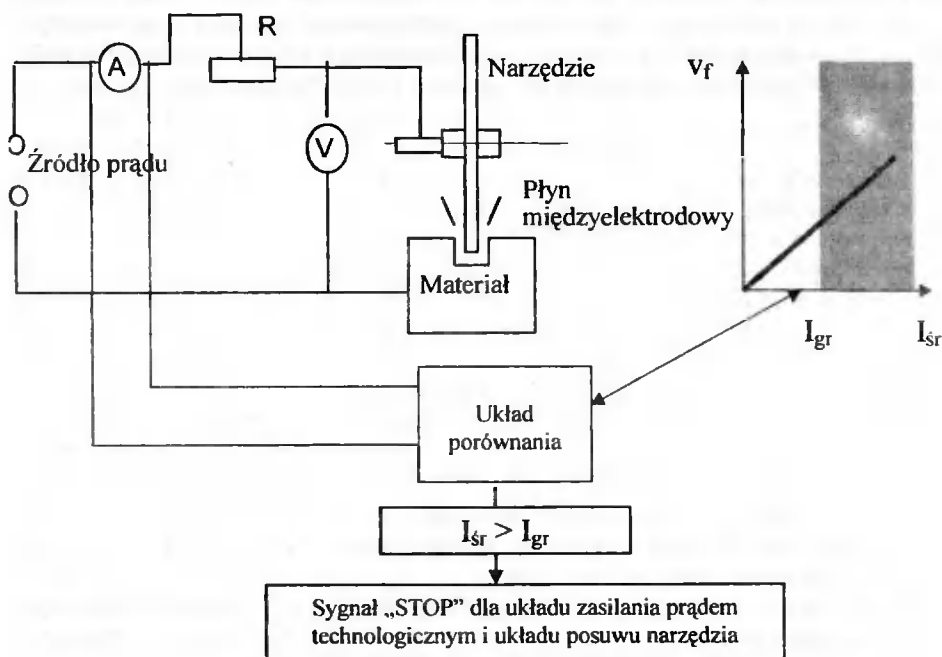
- zabezpieczenie „nadprądowe”,
- zmiany gęstości prądu,

oraz w sferze wstępnych badań wykorzystujące systemy sztucznej inteligencji [2].

Najprostszym układem nie tyle sterowania co zabezpieczającym w pewnym stopniu prawidłowość przebiegu procesu był układ z wyłącznikiem nadprądowym. Wykorzystano w tym przypadku liniową zależność natężenia prądu od prędkości posuwu narzędzia, według której wzrost prędkości posuwu wiązał się ze wzrostem średniego natężenia prądu  $I_{sr}$ . Zgodnie z algorytmem doboru wyjściowych warunków przecinania określano maksymalną wartość posuwu narzędzia i odpowiadającą mu średnią wartość natężenia prądu. Na tak określoną wartość natężenia prądu ustawiano wyłącznik nadprądowy, którego zadaniem było wyłączenie układu zasilania prądu technologicznego przecinarki w przypadku o ile średnia wartość natężenia prądu przekroczyła zakładaną wartość graniczną  $I_{gr}$  (rys.3).

Zaprezentowany układ był jednym z prostszych i zdecydowanie najtańszych układów „sterowania” przecinarki, przy czym jego wadą było brak możliwości dokonania

w trakcie pracy korekty prędkości posuwu narzędzia, przez co zmniejszeniu ulegała wartość średniego natężenia prądu i nie następowało wynikające z przekroczenia nastawy wyłącznika nadprądowego zatrzymanie przecinarki.

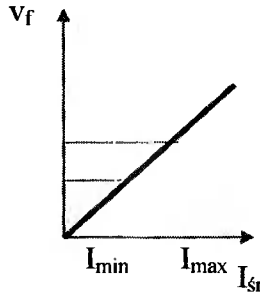


Rys. 3. Układ wyłącznika nadprądowego przecinarki anodowo-mechanicznej

Podjęcie przez zespół problemu przecinania anodowo-mechanicznego utwardzonych szyn kolejowych, a więc elementów o zmiennym przekroju spowodowało konieczność zmiany systemu sterowania prędkością posuwu narzędzia przecinarki. W układzie sterowania przecinarki wprowadzono w takim przypadku obok zalecanej (wynikającej z wstępnego doboru) średniej wartości natężenia prądu, dwie wartości graniczne między którymi winna oscylować rzeczywista wartość prądu technologicznego (rys.4). Zmodyfikowano również układ hydrauliczny przecinarki stosując sterowany elektrycznie regulator przepływu. Dzięki temu stworzono możliwość korekty wartości prędkości posuwu narzędzia.

W przypadku przecinania szyn kolejowych w pierwszym okresie obróbki dokonywano przecinania główki szyny, a więc jej części o dużym stosunkowo przekroju. Aby nie następowało drastyczne zwiększenie natężenia prądu, konieczne było zmniejszenie prędkości posuwu narzędzia. Osiągnięcie obszaru szyjki (a więc najwyższego miejsca szyny) powodowało znaczny spadek natężenia prądu, przez co możliwe było zwiększenie prędkości posuwu narzędzia. Dzięki zastosowaniu takiego układu sterowania (ze zmienną prędkością posuwu narzędzia) możliwe było zminimalizowanie czasu cięcia szyny S60 do 38 sek. - co było czasem prawie 20-krotnie krótszym od uzyskiwanego podczas cięcia tego elementu na konwencjonalnych przecinarkach tarczowych. Badania prowadzone podczas przecinania anodowo-mechanicznego szyn kolejowych zwrócił jednak uwagę na fakt, iż mimo przyjęcia zgodnie z opracowanymi modelami matema-

tycznymi, wielkości nastawnych przecinarki efekt jakościowy procesu przecinania różnił się nawet znacznie od prognozowanego. Różnice dotyczyły szczególnie parametru chropowatości powierzchni i głębokości strefy wpływów ciepła. Podobne rezultaty osiągnano podczas przecinania materiałów o większych wymiarach (rzędu 100 do 120 mm), a wynikało to przede wszystkim z intensyfikacji oddziaływania czynników zakłócających proces. Wynikało to głównie z sukcesywnego zmniejszania ilości podawanego do strefy cięcia elektrolitu w miarę zagłębiania się narzędzia w materiał przecinany.



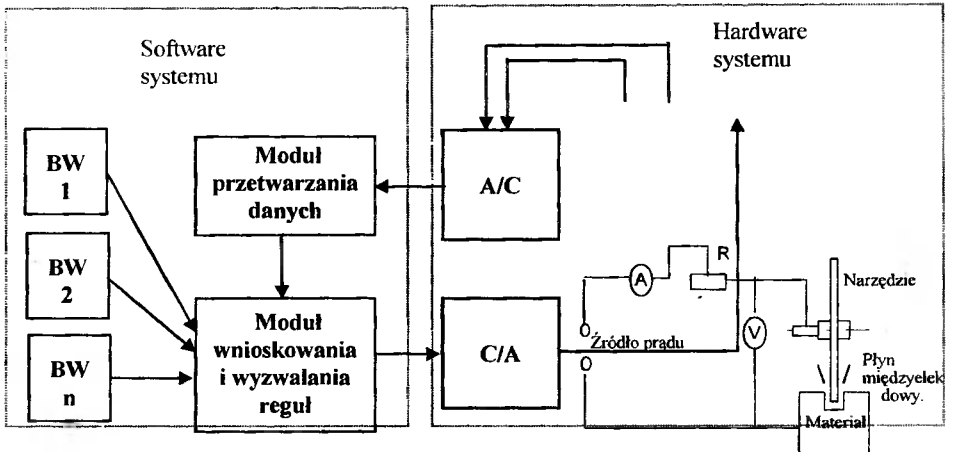
Rys.4. Działanie systemu sterowania przecinarki do szyn kolejowych

Drogą do rozwiązania przedstawionego problemu było:

- zintensyfikowanie doprowadzenia elektrolitu do strefy cięcia (zagadnienie to poruszone było w wielu pracach, np. [1]),
- opracowanie nowej koncepcji układu sterowania, nie wrażliwej na zakłócenia procesu.

Ze względu na tematykę tego referatu przedstawiono jedynie drugie z proponowanych rozwiązań - inteligentny system sterowania przecinarką (rys.5).

W swoich założeniach opracowany system nosi znamiona systemu ekspertowego czasu rzeczywistego.



Rys.5. Schemat inteligentnego systemu sterowania przecinarką anodowo-mechaniczną [2]

Podobieństwo to wynika z faktu występowania zarówno w jednych jak i drugich systemach, procesów pozyskania wiedzy o obiekcie, procesów wnioskowania a także komunikacji zewnętrznej.

Procesy komunikacji zewnętrznej odbywają się poprzez przetworniki A/C w których przetwarzane są informacje o aktualnych warunkach realizacji procesu przecinania reprezentowane przez zmiany natężenia prądu w trakcie obróbki (przykładowe wykresy tych zmian zaprezentowano na rysunku 1). Przetworzone cyfrowo sygnały zmian natężenia prądu przekazywane są do modułu przetwarzania danych. Stanowi on program szybkiej analizy Fouriera FFT dzięki czemu możliwe jest uzyskanie korzystnego z punktu widzenia procedur wnioskowania widma amplitudowego zmian natężenia prądu - nazwanego umownie „widmem obróbki”.

W module wnioskowania następuje porównanie „widma obróbki” z „widmami modelowymi” zawartymi w blokach od BW1 do BW n. Bloki te nazwano stosując pewną analogię do systemów ekspertowych - blokami wiedzy o procesie. Zawierają one między innymi wartości poszczególnych amplitud „widma obróbki”. Stąd więc w prowadzonych w ośrodku poznańskim pracach pojawiły się próby klasyfikowania cykli wyładowań występujących podczas procesu oraz opisanie tych wyładowań procedurami analizy harmonicznej, gdyż to właśnie stanowić miało wspomniane wyżej „widmo modelowe” którego charakterystyka amplitudowa zawarta jest w bazie wiedzy. Równocześnie dla poszczególnych „widm modelowych” określono charakterystykę jakościową powierzchni po cięciu. Uzyskano więc korelację: widmo obróbki - efekt procesu przecinania.

W zależności od efektu porównania „widma obróbki” z „widmem modelowym” następuje lub nie następuje wysłanie sygnału do przetwornika C/A powodującego korektę parametrów przecinania - szczególnie prędkości narzędzia.

Na przedstawionej wyżej koncepcji oparto również kolejną wersję systemu sterowania przecinarek, z tym że klasyfikacja „widma obróbki” do określonego „widma modelowego” następowała przy pomocy sieci neuronowej.

Nadmienić należy, że zaprezentowane w referacie systemy inteligentnego sterowania przecinarką anodowo-mechaniczną zostały przetestowane na stanowisku laboratoryjnym, podczas przecinania przedmiotów o niewielkich średnicach. Celem zweryfikowania tych układów konieczne jest przeprowadzenie cyklu badań na przemysłowych wersjach przecinarek. Przeszkodą w tym względzie jest jednak konieczność przebudowy układu posuwu narzędzia.

Ostatnie badania związane z procesem przecinania anodowo-mechanicznego wskazują, że obszar stosowania tej technologii przesuwają się w kierunku przecinania przedmiotów twardych o dużych średnicach (> 100mm) [1]. W takim przypadku celowe jest stosowanie przecinania anodowo-mechanicznego taśmą (ze względu na łatwiejszy sposób doprowadzenia elektrolitu) i ten przypadek przede wszystkim wymaga opracowania efektywnego systemu sterowania.

## LITERATURA

- [1] Kowalski St., Wieczorowski K.: Prace z zakresu technologii cięcia anodowo-mechanicznego realizowane w Zakładzie Projektowania Technologii Politechniki Poznańskiej. Mater. V Konf. EM'97 (Electromachining), Bydgoszcz – Golub Dobrzyń 1997.
- [2] Pająk E.: Inteligentny system nadzoru procesu przecinania elektrochemiczno-elektroerozyjnego. Materiały Konferencji EM'97, Bydgoszcz – Golub Dobrzyń 1997.

- [3] Pająk E.: Przecinarka anodowo-mechaniczna typ EPAA. Przegląd Techniki Polskiej nr 6/1983.
- [4] Pająk E., Plenzler G.: Automatyczna regulacja posuwu narzędzia przecinarek anodowo-mechanicznych. Mater. II Konf. EM'86 (Electromachining), Bydgoszcz 1986.
- [5] Pająk E., Waszkiewicz L.: Przecinanie materiałów trudnoobrabialnych metodą elektrochemiczno-elektroerozyjną wirującą elektrodą. Mater. IV Konf. EM'94 (Electromachining), Bydgoszcz – Ciechocinek 1994.
- [6] Wieczorowski K., Pająk E., Waszkiewicz L.: Podatność stali stopowych na obróbkę elektrochemiczno-elektroerozyjną wirującą elektrodą. Mater. VII Konf. „Przepływowe maszyny wirnikowe”, Rzeszów 1993.

## ECDM CUTTING-OFF MACHINE TOOL CONTROL SYSTEM ANALYSIS

### Summary

The present paper offers both implemented and researched ECDM cutting-off machine tool control systems as well as computer cutting-off parameter selection system co-operating with the control system.

Key words: electrochemical-discharge cutting, machine tools, control system

## WYBRANE ASPEKTY STOPOWANIA ELEKTRODĄ SZCZOTKOWĄ

Robert Pierzynowski

Wydział Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej,  
Instytut Technologii Maszyn,  
al. Niepodległości 222, 00-663 Warszawa

Obróbka BEDMA (Brush Electrodischarge Mechanical Alloying) stwarza nowe możliwości w zakresie wysokowydajnego stopowania dużych powierzchni krzywoliniowych obrotowymi, elastycznymi elektrodami szczotkowymi. W wyniku wyładowań iskrowych, lokalnego topienia i parowania elektrod oraz dynamicznego transportu masy między elektrodami tworzy się warstwa wierzchnia o charakterystycznej dla tego sposobu obróbki, budowie.

*Słowa kluczowe:* stopowanie elektroiskrowe, elektroda szczotkowa, wydajność obróbki

### 1. WSTĘP

Stopowanie elektroiskrowe jest znane od ponad czterdziestu lat. Przez wiele lat stosowane było głównie do elektroiskrowego utwardzania ostrzy narzędzi skrawających [3, 10]. Zwykle dotyczyło to narzędzi ze stali szybko tnących bądź stopowych, a węgliki spiekane były elektrodą roboczą (anodą) z której materiał jest przenoszony na obrabianą powierzchnię. Wprowadzenie do obróbki na dużą skalę narzędzi z węglików spiekanych, ostrzy ceramicznych, cermetali, regularnego azotku boru itp. oraz coraz powszechniejsze stosowanie na narzędzia ze stali szybko tnących powłok PVD i CVD sprawiło, że zakres zastosowań stopowania elektroiskrowego znacznie się zmniejszył.

Rozwój techniki kreuje jednak coraz to nowsze i trudniejsze do rozwiązania problemy związane z ciągłym wzrostem wymagań odnośnie trwałości elementów maszyn, dopuszczalnych obciążeń, temperatur itp. [1].

Stopowanie elektroiskrowe znajduje obecnie zastosowanie w obróbce:

- tłoków urządzeń do odlewania pod ciśnieniem,
- powierzchni łożysk pomp do podawania skroplonych gazów,
- elementów pomp narażonych na zużycie erozyjne (piasek, zanieczyszczenia),
- powierzchni tłoczników i matryc kuźniczych wykonywanych elektroiskrowo.

Powinno ono w przyszłości umożliwić również tworzenie warstw kompozytowych w tym ceramicznych.

Głównymi ograniczeniami szerszego zastosowania stopowania elektroiskrowego była dotychczas mała wydajność tego procesu, trudności z jej automatyzacją i małe grubości otrzymywanych warstw. Analiza urządzeń stosowanych do klasycznego stopowania elektroiskrowego wykazała, że charakteryzują się one następującymi danymi [8,9]:



- generatory: RC, tranzystorowe lub tyrystorowe,
- napięcie zasilania 220 lub 380 V,
- napięcie robocze 10 do 150 V,
- moc znamionowa 0,25 do 2,5 kW,
- maksymalna energia wyładowania 0,04 do 6 J,
- natężenie prądu roboczego 0,5 do 30 A.

Do stopowania elektroiskrowego najczęściej stosuje się wibratory zasilane z generatora RC – ręcznie przemieszczane po powierzchni stopowanej. W skład typowego układu wchodzi źródło prądu stałego, z którego zasilany jest generator RC o regulowanych wartościach: pojemności i oporności. W obwodzie wyładowania znajduje się kondensator, elektroda robocza i stopowana powierzchnia. Prąd wyładowania iskrowego przepływający przez cewkę wibratora przez zmienne pole magnetyczne generuje drgania wibratora wraz z elektrodą roboczą. Drgania te inicjują wyładowania iskrowe i przeciwdziałają zwarciu elektrod.

W literaturze [2, 8, 9] można znaleźć również wzmianki o próbach zwiększenia wydajności i mechanizacji procesu tej obróbki.

Do stopowania powierzchni cylindrycznych, stożkowych bądź płaskich można stosować obrotowe elektrody tarczowe z elektrodami w postaci pręcików z węglików spiekanych. Tarcza obraca się z prędkościami od kilkuset do dwóch tysięcy obr./min.

Do obróbki powierzchni krzywoliniowych bądź o zmiennej makrogeometrii stosowane są tarcze z przegubowo zamocowanymi elektrodami wykonanymi z materiałów, którymi ma być stopowany obrabiany przedmiot.

Pod wpływem sił masowych elektrody uderzają o obrobioną powierzchnię, generując wyładowania iskrowe, w wyniku których następuje transport masy na stopowaną powierzchnię.

## 2. STOPOWANIE ELEKTROISKROWE ELEKTRODĄ SZCZOTKOWĄ

Aby zwiększyć efektywność procesu zaproponowano nowy sposób stopowania elektroiskrowego oparty na znanych dotąd rozwiązaniach: utwardzania elektroiskrowego oraz elektroerozyjnej obróbki ubytkowej powierzchni przy pomocy obrotowej elektrody szczotkowej, oznaczony symbolem BEDMM (Brush Electrodischarge Mechanical Machining), autorstwa: Nowickiego i Spadło [4, 5, 7].

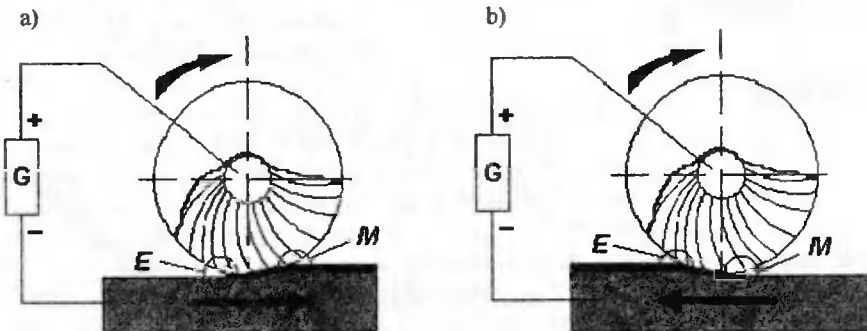
W zaproponowanym rozwiązaniu elektrodami roboczymi są elementy sprężyste (druty) szczotki dociskanej sprężycie do obrabianej powierzchni. Elementy sprężyste szczotki wykonane są z materiału, którym ma być stopowana obrabiana powierzchnia. Wysoka prędkość obrotowa szczotki powoduje, że styk poszczególnych drutów z obrabianą powierzchnią jest bardzo krótki. Wskutek styku elementów szczotki z obrabianą powierzchnią występuje kontaktowa inicjacja wyładowań elektrycznych, które powodują topienie i parowanie anody (drutów szczotki) i katody (przedmiotu obrabianego) oraz przenoszenie materiału na katodę. Stopowanie odbywa się w ośrodku gazu obojętnego (argonu), który umożliwia długotrwały proces przenoszenia metalu na powierzchnię katody (przeciwdziała utlenianiu się powierzchni) i tworzenie nowej WW. Sprężysty docisk drutów szczotki do stopowanej powierzchni daje możliwość obróbki powierzchni o zróżnicowanych kształtach i zmiennej makrogeometrii. Obróbka ta może być również automatyzowana przy pomocy względnie prostych środków technicznych.

Warunki stopowania w obróbce BEDMA są korzystniejsze niż w przypadku użycia elektrody przecikowej. Decydujący wpływ odgrywają warunki topnienia materiału katody i anody oraz ilości odprowadzanego ciepła. Druty łatwiej ulegają stopieniu i trudniej jest o odprowadzenie ciepła niż w elementach przedmiotu obrabianego, zapewnia to dobre warunki przenoszenia materiału na obrabianą powierzchnię. Wszystko to, w połączeniu z geometrią szczotki i możliwością dopasowania jej kształtu i położenia do obrabianej powierzchni - pod wpływem zadanej siły lub ugięcia - umożliwia obróbkę powierzchni o złożonych, niepowtarzalnych (zmiennych) kształtach.

Część drutów oddziałuje na powierzchnię poprzez wyładowania elektryczne i opisany powyżej proces przenoszenia masy z anody na katodę i cieplno-chemiczną modyfikację warstwy wierzchniej. Między częścią drutów a obrabianą powierzchnią występuje styk mechaniczny i przepływ prądu bez wyładowań. Ruch styczny drutów oraz ich docisk do powierzchni powoduje mechaniczną obróbkę powierzchni przy równoczesnym przepływie prądu przez pola styku. Takie oddziaływanie nazywane jest obróbką elektromechaniczną, w wyniku której następuje wygładzanie wierzchołków chropowatości utworzonej uprzednio w wyniku wyładowań iskrowych.

Istotną zaletą tego sposobu stopowania jest możliwość zasilania układu roboczego ze źródeł prądu stałego, gdyż nie występuje w tym przypadku konieczność generowania drgań elektrody roboczej, a zwarciom zapobiega dyskretny charakter szczotki i jej ruch obrotowy z dużymi prędkościami.

Prędkość posuwu nie wpływa w istotny sposób na wydajność obróbki. Ważny jest natomiast jej kierunek. Na rysunku 1 przedstawiono układ przeciwbieżny, w którym powierzchnia najpierw jest stopowana (w strefie E), a następnie poddawana (w strefie M) obróbce mechanicznej (szczotkowaniu). Stosowanie takiego kierunku posuwu zapewnia uzyskanie powierzchni błyszczącej o kolorze jasnego grafitu.



Rys. 1. Schemat a) przeciwbieżnego, b) współbieżnego stopowania w procesie BEDMA (E – strefa oddziaływań elektrycznych, M – strefa oddziaływań mechanicznych)

Obserwacje wizualne wykazały, że strefa wyładowań (E) występuje w obszarze, w którym elementy sprężyste przestają kontaktować się ze stopowaną powierzchnią. Potwierdza to tezę, że przy  $U < 100$  V inicjacja wyładowań powstaje w wyniku rozwarcia styku elektrycznego.

Podczas obróbki z posuwem o kierunku zgodnym z kierunkiem prędkości głównej strefa wyładowań iskrowych E jest poza obszarem oddziaływań mechanicznych. Powierzchnia po obróbce ma strukturę geometryczną losową typową dla obróbki elektro-

iskrowej, o wyglądzie głęboko matowym. Związane jest to z brakiem wygładzającego oddziaływania drutów szczotki na powierzchni po stopowaniu, kondensacją par metali na obrabianej powierzchni i osadzaniem bardzo drobnych cząstek roztopionego metalu.

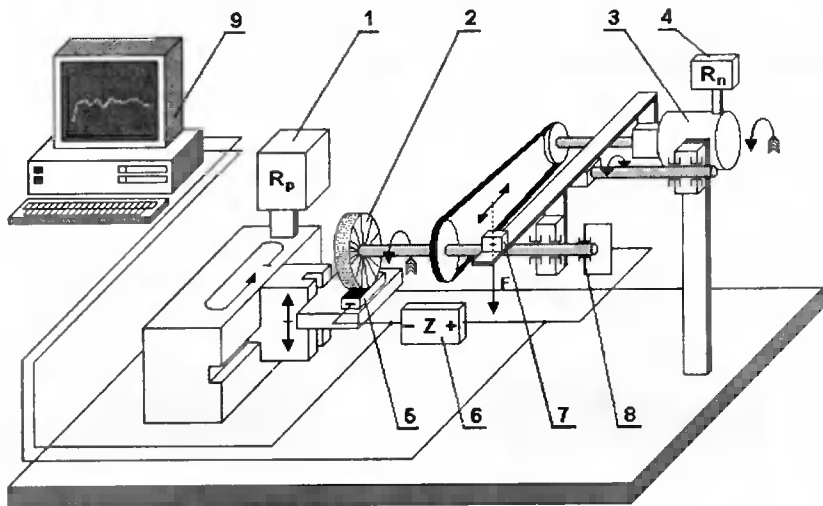
### 3. STOSOWANE ŹRÓDŁA ZASILANIA

Przed przystąpieniem do systematycznych badań nad stopowaniem dyskretną elektrodą obrotową istniała konieczność zaprojektowania i wykonania stanowiska badawczego (rys. 2). Umożliwia ono badanie procesu obróbki przy sterowanych, w możliwie szerokich zakresach:

- prędkości obrotowej elektrody szczotkowej,
- prędkości posuwu przedmiotu obrabianego,
- nacisków elektrody na przedmiot lub ugięcia elementów sprężystych szczotki,
- parametrów elektrycznych ( $U$ ,  $I$ ,  $E$ ,  $t_i$ ,  $t_p$ )

Oprócz tego stanowisko to umożliwia:

- stosowanie różnych oszrodków (różne średnice i materiały) oraz szybką ich wymianę,
- stosowanie różnych ośrodków gazowych oraz cieczy,
- stosownie różnych źródeł zasilania,
- rejestrację przebiegów sygnałów prądowych i napięciowych.

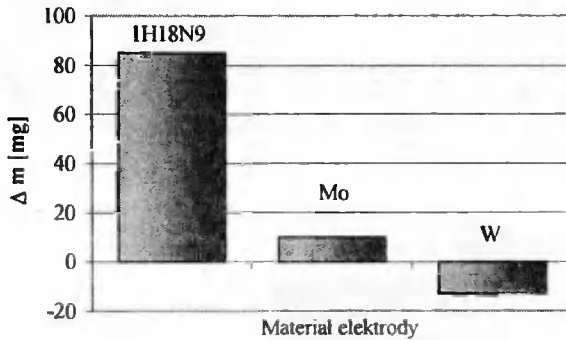


Rys. 2. Schemat stanowiska do badań BEDMA: 1 – układ sterowania posuwu stolika, 2 – elektroda robocza (anoda), 3 – silnik, 4 – regulacja prędkości obrotowej szczotki, 5 – element obrabiany (katoda), 6 – układ zasilania, 7 – regulacja siły nacisku szczotki, 8 – komutator, 9 – układ rejestrujący

Komora robocza, do której doprowadzono argon wykonana została ze szkła organicznego (ze szczelnym połączeniem). Podczas obróbki „na twardych parametrach” napelniano ją częściowo wodą w celu zwiększenia pojemności cieplnej układu.

Do badań stosowano typowe szczotki obrotowe (o wymiarach:  $\varnothing 80 \times 20 \times \varnothing_{\text{drutu}}$  lub  $90 \times 20 \times \varnothing_{\text{drutu}}$ ) przeznaczone do czyszczenia powierzchni metalowych. Elementy sprę-

zyste wykonano: ze stali 1H18N9, molibdenu, wolframu, stali St 3 oraz mosiądzu. Upakowanie drutów na powierzchni roboczej (zewnątrznej) wynosiło około  $150/\text{cm}^2$ . Materiałem obrabianym była stal 45 hartowana.



Rys. 3. Wydajność obróbki dla różnych materiałów elektrod: 1H18N9, ( $T = 1830$  K); Mo ( $T = 2888$  K); W ( $T = 3673$  K). Generator RC:  $RC = 3,4$  msek.,  $U = 260$  V,  $F_N = 2$  N,  $V_c = 376,8$  m/min,  $d = 0,2$  mm

Z przeprowadzonych badań wynika, że w porównaniu do stopowania elektrodą ze stali 1H18N9 wydajność stopowania molibdenem jest prawie dziesięciokrotnie mniejsza, a przy stopowaniu elektrodą wolframową (rys. 3) występuje ubytek katody (próbki). Nie znaczy to jednak, że w ostatnim przypadku nie występuje efekt stopowania. Wskutek wyładowań iskrowych dochodzi do topnienia i wyrzucania materiału z powierzchni obu elektrod, ale ubytek materiału (stali) z powierzchni katody jest większy niż masa anody (wolframu) przeniesiona na nią w stanie ciekłym. Wyniki badań stanu WW po stopowaniu potwierdzają tą tezę.

Do badań BEDMA stosowano dostępne generatory:

- generator prądu stałego o parametrach:  $U = 0 \div 30$  V,  $I_{\max} = 1500$  A,
- generator RC stanowiący wyposażenie drążarki elektroiskrowej EDA 35,
- generator tranzystorowy stanowiący wyposażenie drążarki elektroiskrowej EDEA 25 (przeznaczony do obróbki zgrubnej),
- generator RLC stanowiący wyposażenie drążarki elektroiskrowej EDEA 25 (przeznaczony do obróbki gładkościowej).

Są to profesjonalne generatory stosowane do obróbki elektroiskrowej, która jest najbliższa procesom stopowania elektroiskrowego. Wyniki tych badań nie mogą być podstawą do porównań efektywności stopowania przy pomocy poszczególnych generatorów (rys. 4), jednak mogą być wskazówką, które generatory powinny być obiektem szczegółowych badań i ich modyfikacji dla potrzeb stopowania.

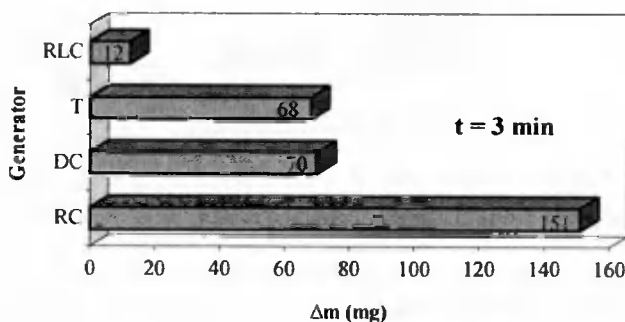
Badania generatora RC wykonano stosując jako ośrodek argon oraz elektrodę roboczą z elementami sprężystymi wykonanymi ze stali 1H18N9 o średnicy  $d = 0,2$  mm.

We wstępnych badaniach stopowania przy „najtwardszych” parametrach obróbki, tj. dla:  $RC = 3,4$  msek. i  $U = 360$  V (a więc przy stosunkowo dużych energiach wyładowania), otrzymano wydajność równą  $\Delta m = 150$  mg/3 min. Następowo jednak wówczas silnie nagrzewanie drutów szczotki (do koloru ciemnego żaru) i próbek (do koloru niebieskiego).

Generator prądu stałego umożliwił uzyskanie napięć w zakresie  $U = 0 \div 30$  V; zาดawalające wyniki obróbki otrzymano dla napięć 6 do 12 V, dla napięć poniżej 6 V

wydajności były bliskie zeru, natomiast przy  $U > 14$  V wydajności były znacznie większe (570 mg), następowało jednak przegrzewanie powierzchni stopowanej, topienie i przywieranie fragmentów drutów elektrody szczotkowej do niej.

Generator impulsów prostokątnych umożliwiał efektywne stopowanie przy stosowaniu impulsów o napięciu  $U = 100$  V, natężeniu prądu  $I = 32$  A. Przy natężeniach prądu w impulsie rzędu 64 A następowało bardzo silne nagrzewanie drutów szczotki oraz topienie i przywieranie jej fragmentów do obrabianej powierzchni. Przy niższych natężeniach impulsów prądu wydajność obróbki była wielokrotnie mniejsza niż otrzymywana przy stosowaniu generatorów DC i RC.



Rys. 4. Wyniki badań porównawczych wydajności stopowania przy zastosowaniu generatorów: RC, DC, tranzystorowego oraz RLC. Anoda-1H18N9,  $d = 0,2$  mm,  $F_N = 2,4$  N

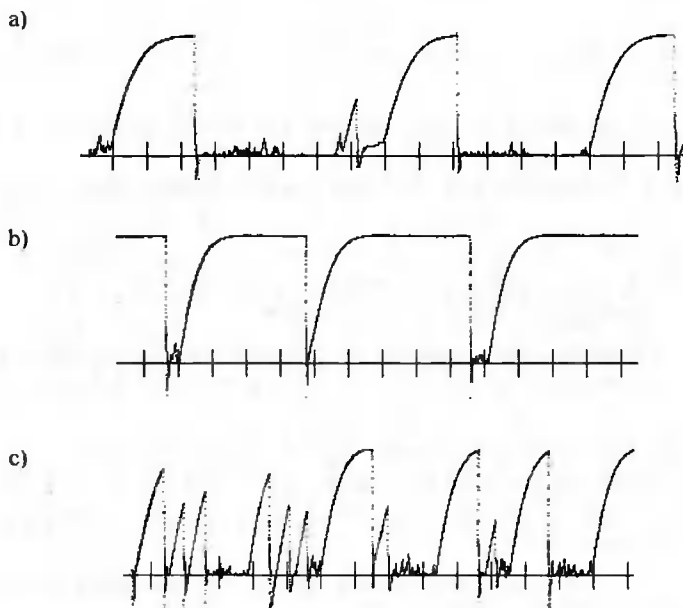
Badania wydajności obróbki przy zastosowaniu generatora RLC wykazały, że tylko w zakresie najtwardszych parametrów występuje niewielki przyrost masy katody, przy niższych energiach wydajność obróbki jest bliska zeru.

Generatory RLC przeznaczone są do obróbki gładkościowej. Generowane przez nie w procesie obróbki wyładowania iskrowe charakteryzują się niskimi energiemi, natomiast częstotliwości wyładowań są wielokrotnie wyższe niż w przypadku stosowania generatora RC. Podczas obróbki elektroiskrowej, nawet wyładowania o bardzo małej energii powodują istotny ubytek materiału, natomiast przy stopowaniu elektroiskrowym istnieje minimalna energia wyładowań przy której występuje efektywny transport masy między elektrodami w ośrodku gazowym. W przypadku stopowania elektroiskrowego roztopiony i wyrzucony z anody metal musi w postaci płynnej dotrzeć do katody i utworzyć ze stopionym na niej metalem nową WW.

#### 4. ANALIZA WYŁADOWAŃ W PROCESIE BEDMA

Do analizy wyładowań iskrowych, zwarć oraz przepływu prądu przez styk elektrod w warunkach braku przewodzenia zastosowano zapis cyfrowy napięcia i natężenia prądu w obwodzie wyładowań. Analiza taka jest szczególnie istotna dla stopowania elektroiskrowego, gdyż występują w tym przypadku różnorodne stany, trudne do zidentyfikowania innymi metodami.

Do analizy tej zastosowano oscyloskop cyfrowy INFINIUM firmy Hewlett Packard o czasie próbkowania 100 kSa/sek.



Rys. 5. Charakterystyczne przebiegi napięciowe (zasilanie z generatora RC) dla stopowania elektroiskrowego: a) stan zwarć, b) stan jałowy, c) typowe wyładowania

Wstępne badania zmian napięcia i natężenia prądu w obwodzie wyładowań wykazały, że występują trzy typowe stany:

- zwarcia (obróbka elektromechaniczna) ze sporadycznymi wyładowaniami iskrowymi (rys. 5a)
- braku przewodzenia ze sporadycznymi wyładowaniami iskrowymi (rys. 5b), tzw. stan „jałowy”.
- wyładowań iskrowych o różnych wartościach napięć i energii wyładowań ze sporadycznymi stanami zwarć i braku przewodzenia (rys. 5c).

Stan pierwszy występuje przy dużych naciskach i średnicach drutu. Jest on typowy dla obróbki elektromechanicznej. Dominują wówczas procesy usuwania materiału wskutek procesów mikroskrawania przy niewielkim udziale przenoszenia masy wskutek wyładowań iskrowych. Przez czysty metaliczny styk drut/powierzchnia obrabiana, mogą płynąć prądy o bardzo wysokich natężeniach, szczególnie przy stosowaniu generatora DC.

Stan drugi jest typowy dla obróbki w powietrzu lub przy długich czasach obróbki w atmosferze obojętnej przy niskich naciskach. Utworzona w początkowym okresie stopowania WW zawiera tlenki i azotki. Charakteryzuje się przy tym niską przewodnością w wyniku czego wyładowania iskrowe mają małą energię lub w ogóle nie występują, nie obserwuje się również w tym przypadku efektu przyrostu masy katody.

Podczas stopowania w obojętnym ośrodku, np. argonie przy właściwie dobranym obciążeniu występują wyładowania iskrowe o częstotliwości kilku kHz typowy obraz zmian napięcia dla tego stanu przedstawia rys. 5c.

Ocena tych wyładowań jest przedmiotem dalszych badań.

## LITERATURA

- [1] Burakowski T., Wierzchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. WNT, Warszawa 1995.
- [2] Kowalenko W., Werchoturov A.: Łazernoe i elektroerozionnoe uproczenie materiałów. IZD. Nauka. Moskwa 1986.
- [3] Lazarenko B.: Elektroiskrovaja obrabotka metalov v vode i elektrolitach. Moskwa 1958.
- [4] Nowicki B., Pierzynowski R., Spadło S.: Elektroerozyjne wytwarzanie warstw stopowych na powierzchniach krzywoliniowych. Mat. Konf. EM'97 (Electromachining), Bydgoszcz - Golub Dobrzyń 1997.
- [5] Nowicki B., Pierzynowski R., Spadło S.: Sposób wytwarzania warstw stopowych na powierzchniach przedmiotów przy pomocy wyładowań elektrycznych. Wniosek pat. P.320 071.
- [6] Nowicki B., Pierzynowski R., Spadło S.: The Electrodischarge – Based Surface Alloying Process Using Brush Electrode. Proc. of ISEM XII, Aachen 1998.
- [7] Nowicki B., Spadło S.: Brush Electro Discharge Mechanical Machining. Proc. of ISEM XI, Lausanne 1995.
- [8] Praca zbiorowa pod red. J. Petrov. Elektroiskrove legirovanie metalicznych poverchnostoj. Kiszinew, Sztijnca 1985.
- [9] Samsonow G. i inni.: Elektroiskrovoje legirovanie metalicznych poverchnostoj. Naukowa dumka. Kijów 1976.
- [10] Zołotych B. N.: Elektroiskrowoj kontaktnyj sposob uprocnienia metaliceskich poverchnostej M. L. Gosenergiizdat, Moskwa 1951.

## SOME INVESTIGATION OF BRUSH ELECTRODE ALLOYING

## Summary

The authors of the present paper have created a new free-form surface alloying method (BEDMA – Brush Electrodischarge Mechanical Alloying). The machining working electrode is made of alloy steels or materials which can be applied as alloy additions for steel. The method presented results in an effective machining of large-size free-form surfaces, while the alloying layer depth ranges from tens to hundreds micrometers.

Key words: electrodischarge alloying, brush electrode, machining efficiency

## URZĄDZENIA DO PRECYZYJNEGO ELEKTROCHEMICZNEGO DRAŻENIA ŁOPATEK SILNIKÓW LOTNICZYCH

Adam Ruszaj<sup>1</sup>, Maria Chuchro<sup>1</sup>, Zbigniew Chuchro<sup>1</sup>,  
Jan Czekaj<sup>1</sup>, Mikołaj Krehlik<sup>1</sup>, Wit Woda<sup>1</sup>, Maria Zybura-Skrabalak<sup>1</sup>,  
Szczepan Białek<sup>2</sup>, Władysław Kniewski<sup>2</sup>, Antoni MALEC<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instytut Obróbki Skrawaniem,  
Pracownia Obróbki Elektrochemicznej,  
ul. Wrocławska 37a, 30-011 Kraków

<sup>2</sup>Wytwórnia Sprzętu Komunikacyjnego, PZL RZESZÓW S.A.,  
ul. Hetmańska 120, 35-078 Rzeszów

Przedstawiono dwie nowe obrabiarki do elektrochemicznej obróbki łopatek silników lotniczych produkowanych w WSK RZESZÓW. Scharakteryzowano również ich oryginalne urządzenia zasilająco-sterujące umożliwiające zastosowanie prądu impulsowego oraz system kontrolno pomiarowy wraz z stanowiskiem pomiarowym BPHS, przeznaczonym do pomiaru profilu pióra oraz profilu półki łopatki.

*Słowa kluczowe:* obróbka elektrochemiczna, obróbka łopatek silników przepływowych, obrabiarki elektrochemiczne

### 1. WSTĘP

W celu podniesienia dokładności i niezawodności obrabiarek elektrochemicznych stosowanych w WSK Rzeszów podjęto wspólnie z IOS Kraków prace badawczo – rozwojowe. Opracowano i wykonano nowe obrabiarki umożliwiające zwiększenie dokładności obróbki, zmniejszenie liczby braków oraz skrócenie przestojów spowodowanych awariami eksploatowanych dotychczas maszyn.

Przy opracowywaniu obrabiarek wykorzystano wyniki badań wpływu parametrów obróbki na proces rozwarzania elektrochemicznego [2,3] oraz wyniki badań obrabiarek dotychczas pracujących w WSK [1].

W celu określenia źródeł niedokładności obróbki elektrochemicznej związanych z obrabiarką przeprowadzono analizę błędów uwzględniając:

- sztywność korpusu,
- układ napędu posuwu elektrod,
- układ zasilania szczeliny prądem elektrycznym i pracę układu sterowania,
- stabilizację właściwości fizykochemicznych elektrolitu,
- pomiar piór łopatek,
- wykonanie elektrod.



Wyniki przeprowadzonych badań wykorzystano przy konstruowaniu nowych obrabiarek, opracowywaniu technologii oraz systemu kontrolno-pomiarowego. Wykonano dwie obrabiarki:

- kasetową (ECM 59Ł),
- komorową (ECK-40/2x4CNC).

## 2. NOWE DRAŻARKI ELEKTROCHEMICZNE DO OBRÓBK ŁOPATEK

### 2.1. DRAŻARKA ECM 50 Ł

Obrabiarka ta zbudowana jest w układzie poziomym i umożliwia równoczesne dwustronne drażenie łopatek silników lotniczych. Część obrabiarkowa – rys. 1, składa się z następujących zespołów: korpusu, płyty nośnej stołu, dwóch głowic z agregatami napędowymi przyrządu obróbkowego, kasetowego przyrządu obróbkowego.

#### **Korpus**

Korpus wykonany jest jako odlew żeliwny. Dolna część korpusu przymocowana jest do stopy wykonanej z ceowników. Poprzez przestrzeń między ceownikami oraz przestrzeń w nodze korpusu prowadzone są rury i węże doprowadzające i odprowadzające media w okolice strefy obróbki. Przestrzeń ta zamknięta są łatwymi do demontowania osłonami. Górną część korpusu stanowi wanna, która jest zabezpieczona od wewnątrz antykorozyjnie i wyłożona masą odporną na działanie wodnych roztworów NaCl i NaNO<sub>3</sub> i jednocześnie odporną na mechaniczne uszkodzenia, które mogą być spowodowane nieostrożnym posługiwaniem się narzędziami ślusarskimi. Na górnej części korpusu znajdują się powierzchnie przylgowe umożliwiające zamocowanie płyty roboczej stołu.

#### **Płyta robocza stołu**

Płyta robocza stołu przeznaczona jest do ustawienia i zamocowania na niej dwu przeciwbieżnych głowic oraz przyrządu obróbkowego. Płyta wykonana jest z materiału odpornego na korozję, a jej sztywność zapewnia wymagane dokładności geometryczne pomiędzy głowicami i przyrządem obróbkowym. Mocowana jest do dna wanny korpusu i jego obrzeży.

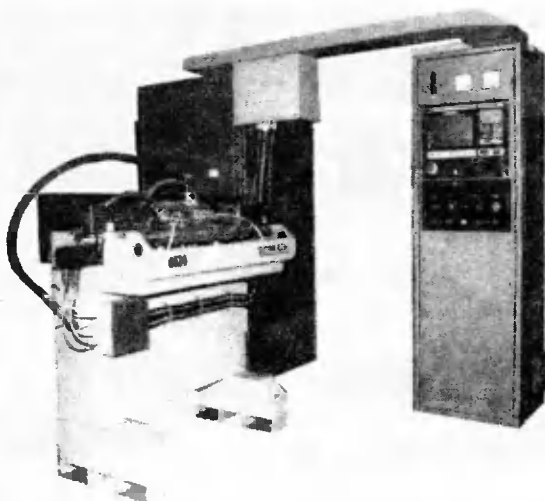
#### **Głowica**

Głowica jest zespołem, którego zadaniem jest nadanie ruchów ustawczych i roboczych elektrodzie - narzędziu. Ruch roboczy jest posuwem liniowym poziomym. Głowica składa się z korpusu, do którego zamocowano prowadnice, w których ułożyskowany jest suwak. Przesuw roboczy suwaka wynosi 50 mm. Cała głowica jest zabezpieczona osłoną i mieszkciem przed agresywnymi oparami.

#### **Agregat napędowy**

Składnikami agregatu napędowego są:

- silnik,
- koła zębate wewnętrzne,
- przekładnia falowa,
- wspornik,
- koło pasowe.



Rys. 1. Część obrabiarkowa drążarki elektrochemicznej ECM 50Ł do dwustronnego drążenia łopatek turbin

### Przyrząd kasetowy

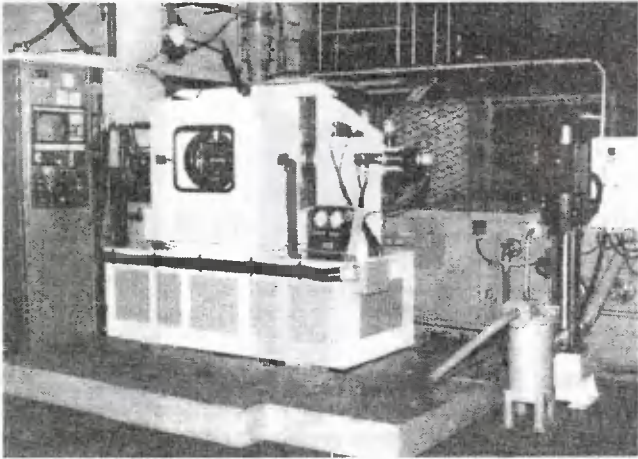
Obróbkowy przyrząd kasetowy, w którym realizowany jest proces obróbki należy do wyposażenia technologicznego drążarki. Elektrolit doprowadzany jest do przyrządu z centralnego układu obiegu elektrolitu. Proces drążenia może być realizowany w dwóch wariantach. W pierwszym głowice przesuwają się przeciwnie ( $\alpha = 180^\circ$ ), w drugim kąta przesuwu głowicy  $\alpha$  może być mniejszy od  $180^\circ$ .

## 2.2. DRAŻARKA ECKA-40/2x4CNC

W drążarce ECKA-40/2x4CNC - rysunek 2, proces jest realizowany w komorze roboczej. Zbudowana jest ona z następujących zespołów:

- spawany korpus, który wraz z korpusami głowic i belką górną tworzą zamkniętą ramę, gwarantującą dużą sztywność układu,
- dwie głowice z suwakami i płytami narzędziowymi,
- zespoły napędowe każdej głowicy, stół roboczy z wanną,
- komora robocza z otwieranymi drzwiami z przodu i tyłu obrabiarki.

Dwa suwaki o skoku 200 mm zamontowane są w taki sposób, że płyty narzędziowe (pod elektrody) są ustawione pod kątem  $130^\circ$ . Komora robocza stanowi umieszczoną między głowicami całkowicie zamkniętą przestrzeń z dostępem przez otwierane drzwi. Suwaki napędzane są przez przekładnie toczne, a te z kolei przez silniki i przekładnie falowe. Z końcówkami przekładni tocznych sprzężone są przetworniki obrotowo-impulsowe, które służą do pozycjonowania w układzie CNC PRONUM. Napędy pozwalają na kontrolowany układem CNC ruch z prędkościami w zakresie od 0,75 mm/min do 1000 mm/min.



Rys. 2. Drążarka elektrochemiczna ECKA - 40/2x4CNC do dwustronnego drążenia łopatek turbin

Zastosowanie systemu CNC PRONUM umożliwia programowanie dowolnych cykli obróbki stosownie do wymagań technologii, w tym:

- dowolnych ruchów elektrod w zakresie 200 mm,
- wartości napięcia prądu roboczego, zsynchronizowanie załączania i wyłączenia napięcia i elektrolitu,
- dowolne ustalenie baz obrabiarki i zera programu,
- wprowadzenie korekcji ustawienia długości elektrod,
- ręcznej korekcji posuwu i napięcia w czasie cyklu obróbki, edycji programów obróbki i ich przechowywanie w pamięci.

### 3. URZĄDZENIE ZASILAJĄCO-STERUJĄCE

W wyniku opracowania i wykonania dwóch wersji stanowisk obróbkowych przeznaczonych do pracy w odmiennych układach kinematycznych i technologicznych niezbędnym było opracowanie i wykonanie dwóch urządzeń zasilająco-sterujących. Należy zaznaczyć, że o ile różnice konstrukcyjne stanowisk obróbkowych są zasadnicze, o tyle urządzenia zasilająco-sterujące są bardzo podobne. Takie rozwiązanie umożliwiło przyspieszenie etapu prób i badań poszczególnych podzespołów.

Urządzenie zasilająco-sterujące składa się z:

- zespołu zasilacza prądowego spełniającego funkcję źródła prądu dla obwodu roboczego obrabiarki elektrochemicznej,
- zespołu kontrolno-sterującego zapewniającego realizację procesu technologicznego dla założonych wartości parametrów oraz przerwanie procesu w sytuacjach awaryjnych.

#### 3.1. ZESPÓŁ ZASILACZA PRĄDOWEGO

Podstawą założeń i projektu zasilacza prądowego były określone wymagania techniczno-technologiczne. Przy opracowywaniu zasilacza bazowano na zespołach prostownikowych firmy Breutford. Uwzględniono również doświadczenia w tym zakresie

IOS Kraków, Politechniki Warszawskiej i WSK Rzeszów. Badania prowadzone zarówno w IOS Kraków jak i Politechnice Warszawskiej wykazały, że jednym ze sposobów zwiększenia dokładności obróbki elektrochemicznej jest prowadzenie procesu przy zastosowaniu prądu impulsowego. Przeprowadzona analiza wykazała, że na kształt powierzchni (odzworowanie kształtu elektrody) wpływa oprócz cech charakterystycznych obrabiarki, parametrów obróbki, również kształt impulsów prądu. W badaniach w WSK Rzeszów stwierdzono, że zastosowanie prądu impulsowego pozwala zwiększyć anodową gęstość prądu w porównaniu z obróbką prądem stałym w szczególności przy ograniczonych możliwościach zmian ciśnienia elektrolitu. Wykonane zespoły zasilaczy prądowych zarówno do obrabiarki kasetowej jak i komorowej umożliwiają stosowanie prądu impulsowego.

### 3.2. ZESPÓŁ KONTROLNO-STERUJĄCY

Budowę zespołu kontrolno-sterującego oparto na systemie sterowania CNC PRO-NUM, który zapewnia programowanie dowolnego cyklu pracy obrabiarki, w tym:

- regulację napięcia wyjściowego w zakresie 0÷24 V co 0,01 V,
- zmianę napięcia roboczego w funkcji odległości wysuwu elektrod,
- zmianę prędkości posuwu w funkcji odległości wysuwu elektrod,
- zakres prędkości posuwów 0,075÷1000 mm/min,
- różne prędkości posuwów każdej z elektrod z równoczesnym dojazdem do punktów końcowych,
- pamięć programu 64 kB,
- wykrywanie zwarć statycznych,
- wykrywanie zwarć dynamicznych.

Porównanie charakterystyki zespołu zasilacza prądowego dla obydwóch obrabiarek przedstawia tablica 1.

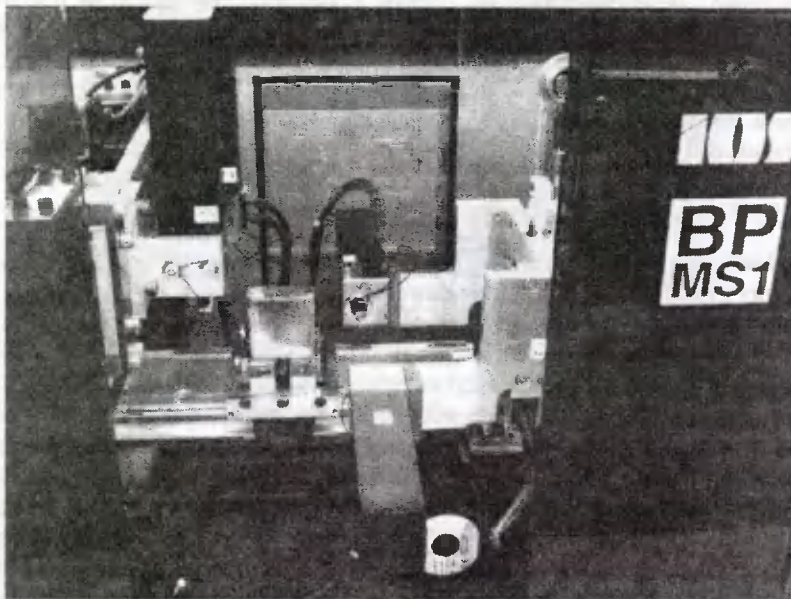
Tablica 1. Charakterystyki zespołu zasilacza prądowego dla obrabiarki kasetowej i komorowej

Parametr	ECM-50Ł	ECKA-40/2x4CNC
Stabilizowane napięcie robocze	0÷24 V	0÷24 V
Maksymalny prąd roboczy jednej głowicy	2 kA	4 kA
Maksymalny prąd roboczy (dla obu głowic)	4 kA	8 kA
Układ ograniczenia prądu, nastawiany skokowo	co 200 A	co 400 A
Układ porównywania napięcia roboczego z napięciem zadaniem	tak	tak
Układ wykrywania zwarć statycznych	tak	tak
Układ wykrywania zwarć dynamicznych	tak	tak
Układ szybkiego wyłączenia (wyłączenia prądu roboczego, zanim dojdzie do pełnego zwarcia elektroda-detal	tak	tak
Programowany układ kontroli, zliczania i wyłączenia impulsów zwarciovych	tak	tak

Obydwie obrabiarki zostały włączone w zmodernizowane układy obiegu elektrolitu, które zapewniają wymaganą stabilizację właściwości fizycznych elektrolitu [1, 4].

#### 4. SYSTEM KONTROLNO POMIAROWY

Opracowano i wykonano stanowisko pomiarowe BPMS1 (rys. 3) przeznaczone do pomiaru profilów pióra oraz półki.



Rys. 3. Stanowisko pomiarowe BPMS1 do pomiaru profilu łopatki

Standardowe karty IOS do współpracy z systemami pomiarowymi Heidenhaina, karty sterowników napędów silników krokowych, kartę sterowań napędami własnymi czujników pomiarowych i kartę komunikacji z komputerem IBM PC wykonane w standardzie „podwójnej Eurocard” zabudowano w znormalizowanej kasecie 19”. Do analizy metrologicznej i graficznej profilu zastosowano pakiet PROFIL stosowany w maszynach pomiarowych MP produkcji IOS, który zmodyfikowano w trakcie prób w celu zwiększenia efektywności pomiarów.

W celu zapewnienia pełnej automatyzacji i niezbędnej dokładności pomiaru na łopatce i półce zastosowano osiem niezależnych systemów napędowych i pomiarowych. W celu zapewnienia efektywnej i niezawodnej pracy urządzenia wyposażono je w gotowe podzespoły renomowanych firm: stoliki z prowadnicami firmy AUTOMATION (Niemcy) oraz systemy pomiarowe Heidenhaina. Urządzenie spełniło wymagania stawiane przez wydziały produkcyjne WSK RZESZÓW.

Czas pomiaru jednego przekroju profilu (w zależności od wymiaru pióra) wynosi 10÷20 sek. Niepewność pomiaru przy rozdzielczości układów pomiarowych 1  $\mu$ m wynosi:

- dla profilu łopatki (grzbiet i koryto) w granicach  $\pm 0,005$  mm w części środkowej do  $\pm 0,015$  mm przy krawędziach w odległości 1,5 mm od wewnętrznej powierzchni ramki;
- dla profilu półki  $\pm 0,010$  mm w części środkowej do  $\pm 0,020$  mm przy krawędzi w odległości 1,5 mm od wewnętrznej powierzchni ramki.

## 5. PODSUMOWANIE

Dokładność obróbki elektrochemicznej zależy od zmian warunków procesu roztworzenia. Dlatego też ważna jest stabilizacja napięcia wyjściowego zasilacza obrabiarki elektrochemicznej, jak również poziom rozwiązań technicznych układu napędowego elektrod zapewniającego odpowiednią stabilizację prędkości ich przesuwu.

Nowe obrabiarki dają możliwość dokładnego wykonania półek łopatek dzięki skósnemu ustawieniu suwaków i elektrod ( $\alpha < 180^\circ$ ) oraz umożliwiają zmiany parametrów w funkcji drogi. Na obrabiarce ECM 50Ł łopatki są obrabiane pod kątem  $150^\circ$ , na obrabiarce ECKA-40/2x4CNC pod kątem  $130^\circ$ . Zastosowanie prądu impulsowego i kąta przesuwu głowic  $\alpha < 180^\circ$  umożliwiło zmniejszenie liczby korekcji elektrod.

## LITERATURA

- [1] Chuchro M. i in.: Modernizacja procesu obróbki elektrochemicznej łopatek silników przepływowych w WSK – RZESZÓW. Mater. VI Konf. EM'2000 (Electromachining), ATR, Bydgoszcz-Wenecja 2000.
- [2] Ruszaj A.: Badania w celu podniesienia dokładności kształtowania elementów na obrabiarkach elektrochemicznych. Mater. Konf. „Maszyny i urządzenia technologiczne - podstawy projektowania, budowy i eksploatacji”, Miedzeszyn 1993.
- [3] Ruszaj A.: Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi. Wyd. IOS, Kraków 1999.
- [4] Ruszaj A. i in.: Opracowanie technologii elektrochemicznej drążenia precyzyjnych elementów, w tym elementów silników lotniczych. Sprawozdanie z Projektu Celowego KBN Nr 7 T07D 018 96 C/2881, Kraków 1998.

## MACHINE-TOOLS FOR PRECISE ELECTROCHEMICAL SINKING OF AIRPLANE ENGINE BLADES

### Summary

Accuracy of electrochemical machining of turbine blades depends on many factors: level of electrolyte properties, interelectrode voltage and velocity of electrode displacement stabilization, quality of control system, rigidity of machine tool body etc. In order to increase the accuracy of turbine blades the new machine tools have been built, and introduced for production in WSK – RZESZÓW. Production test proved that new machine tools make it possible to increase significantly turbine blade accuracy.

Key words: electrochemical machining, turbo-jet bucket machining, electrochemical machine-tool

## PODZIĘKOWANIE

Autorzy dziękują Komitetowi Badań Naukowych za dofinansowanie projektu celowego nr 7T07D 018 96 C/2881, Dyrekcjom WSK Rzeszów i IOS Kraków za pomoc i stworzenie dobrych warunków do realizacji projektu oraz pozostałym kolegom za udział w realizacji projektu.



## ANALIZA DOKŁADNOŚCI POZYCJONOWANIA W OBRABIARKACH ELEKTROEROZYJNYCH STEROWANYCH NUMERYCZNIE

Grzegorz Siudyła

Instytut Obróbki Skrawaniem,  
Pracownia Obróbki Elektrochemicznej,  
ul. Wrocławska 37a, 30-011 Kraków

Analizę dokładności pozycjonowania przeprowadzono w oparciu o wyniki badań dla dwóch typów drażarek i jednej wycinarki drutowej. Badano wpływ sposobu pomiaru pozycji (licznik kroków, linał), korekcji oraz położenia osi optycznej interferometru laserowego względem środka stołu na dokładność pozycjonowania. Za pomocą interferometru laserowego mierzono odchyłki dokładności, powtarzalności, wartości zwrotnej pozycjonowania za pomocą interferometru laserowego.

*Słowa kluczowe:* dokładność, pozycjonowanie, obrabiarki elektroerozyjne

### 1. KONSTRUKCJE UKŁADÓW POZYCJONOWANIA

Przez układ pozycjonowania należy rozumieć tę część układu sterowania przesuwami w osiach, która realizuje pomiar, zapamiętywanie i wyświetlanie pozycji bieżącej oraz przesuwu do zadanej współrzędnej lub zadanego położenia narzędzia (elektrody, drutu) względem przedmiotu obrabianego. Podstawowymi elementami układu są: silniki krokowe i liczniki kroków lub przetworniki optoelektroniczne (obrotowe lub linały) i liczniki impulsów, wyświetlacze współrzędnych oraz programy komputerowe.

Konstrukcja układu pozycjonowania jest uzależniona w dużym stopniu od konstrukcji serwomechanizmu. W serwomechanizmach z silnikiem krokowym stosuje się dwa warianty pozycjonowania. Jeden polega na obliczaniu współrzędnej członu wykonawczego w oparciu o liczbę kroków silnika mierzoną na członie napędowym za pomocą licznika kroków. Drugi wariant polega na pomiarze współrzędnej za pomocą linałów na członie wykonawczym lub przetworników obrotowych na dowolnym członie napędowym. Według literatury [2] pomiar na członie wykonawczym jest korzystniejszy niż na członie napędowym.

W serwomechanizmach z innymi silnikami - prądu stałego lub zmiennego - możliwe jest zastosowanie tylko wariantu drugiego. Stosowane obecnie w obrabiarkach silniki prądu zmiennego wraz z odpowiednimi sterownikami są lepsze od silników krokowych, gdyż umożliwiają sterowanie przesuwami z większą rozdzielczością i prędkością. Rozdzielczość pozycjonowania jest ograniczona tylko rozdzielczością linału (od 0,01 do



1  $\mu\text{m}$ ). W przypadku serwomechanizmów z silnikami krokowymi rozdzielczość jest ograniczona liczbą kroków na obrót (1000), a prędkość, prędkością „start - stopową” podzieloną przez dwa (360/2 [obr/min]).

Istotnym rozwiązaniem w układzie pozycjonowania są funkcje korygujące, które umożliwiają poprawienie dokładności pozycjonowania, przez wprowadzenie do algorytmów obliczania pozycji specjalnych współczynników. Jak ogólnie wiadomo korektę przeprowadza się za pomocą interferometru laserowego, którym mierzy się odchyłki między pozycjami rzeczywistymi (zmierzonymi interferometrem) a zadanymi z pulpitu obrabiarki i zrealizowanymi przez jej serwomechanizm. Jako wynik pomiaru otrzymuje się wydruk i wykres odchyłek w funkcji współrzędnej badanej osi. Jeżeli dla kilkakrotnych przejazdów w obu kierunkach, wzdłuż badanej osi, wyniki są powtarzalne, wówczas można zmniejszyć wartości odchyłek. W tym celu, korzystając z wykresu lub wydruku, należy znaleźć wartości współczynników i wpisać je do funkcji korygujących.

Jakość korekty pozycjonowania zależy od funkcji korygujących. Najbardziej złożone funkcje, tzw. tabele współczynników umożliwiają zmniejszenie odchyłek w punktach pomiarowych prawie do zera. Część współczynników tabeli obraca poszczególne odcinki wykresu o takie kąty, że wszystkie odcinki leżą na osi odciętych. Pozostałe współczynniki eliminują odchyłki osiowej wartości zwrotnej.

Prostsze funkcje korygujące mają dwa lub jeden współczynnik dla każdej z osi. Jeden współczynnik obraca cały wykres, a drugi zmniejsza odchyłkę osiowej wartości zwrotnej o jej wartość średnią dla całego wykresu.

## 2. BADANIA DOKŁADNOŚCI POZYCJONOWANIA

### 2.1. OBIEKTY BADAŃ

Badania zrealizowano dla dwóch drążarek: EDIOS 16 CNC i EDED 40 CNC oraz jednej wycinarki EWEB 40 CNC [5]. Serwomechanizmy drążarek w osiach X, Y, Z, a wycinarki w osiach X, Y były napędzane motoreduktorami tego samego typu, firmy Berger-Lahr z silnikami krokowymi.

We wszystkich obrabiarkach do korekty pozycjonowania wykorzystano najprostszą funkcję korygującą. Każdą oś korygowano za pomocą jednego współczynnika, który zmniejszał kąt pochylenia całego wykresu względem osi poziomej.

Drążarka EDED 40 CNC jest zmodernizowaną obrabiarką typu EDEA 40, przystosowaną do celów badawczych. Zmieniono głowicę na nową z motoreduktorem Berger-Lahr, ale bez linałów. W stole krzyżowym wymieniono motoreduktory oraz zainstalowano linały w osiach X i Y. Nowy zespół zasilająco-sterujący posiada dwa programy do sterowania przesuwami w osiach X, Y, Z. Jeden program wykorzystywał licznik kroków do sterowania przesuwami w osiach X, Y, Z, drugi - linały do sterowania osiami X i Y oraz licznik kroków do sterowania osią Z.

Drążarka EDIOS 16 CNC jest całkowicie nowa i przeznaczona do sprzedaży. Obrabiarka nie posiada linałów. Przesuwamy w osiach: X, Y, Z są sterowane za pomocą licznika kroków.

Wycinarka EWEB 40 CNC jest obrabiarką produkcyjną, piętnastoletnią, po modernizacji. Posiada linały w osiach X i Y oraz dwa programy do sterowania przesuwami

w osiach X i Y. Jeden program steruje przesuwami za pomocą licznika kroków, drugi - za pomocą liniałów. Badania zrealizowano z wykorzystaniem obu programów.

## 2.2. SPOSÓB POMIARU

Badania zrealizowano w Instytucie Obróbki Skrawaniem za pomocą interferometru laserowego firmy Hewlett Packard, typ 5518A. Interferometr ten posiada niezależny układ pomiarowy, który kompensuje błędy spowodowane zmianą warunków otoczenia, tzn.: temperatury, ciśnienie i wilgotność. Katalogowy błąd interferometru z układem kompensacyjnym wynosi  $\pm 0,5 \mu\text{m}$ .

Pomiary interferometrem laserowym polegały na porównaniu wartości przesułów zadanych w osiach: X, Y lub Z z wartościami przesułów zmierzonych za pomocą interferometru laserowego. Różnicę między wartością zmierzoną, a zadaną nazwano odchyłką dokładności pozycjonowania w punkcie pomiarowym. Odchyłki mierzono w sześciu lub pięciu punktach pomiarowych zależnie od długości odcinka pomiarowego. Długość odcinka pomiarowego dobierano kilka centymetrów krótszą od całkowitej długości przesuwu w badanej osi. Wykonano pomiary główne i dodatkowe.

Pierwsze z nich polegały na znalezieniu wartości współczynników korygujących w badanych osiach przesułów oraz określeniu dokładności, powtarzalności i osiowych wartości zwrotnych pozycjonowania [3] dla przyjętych współczynników korygujących.

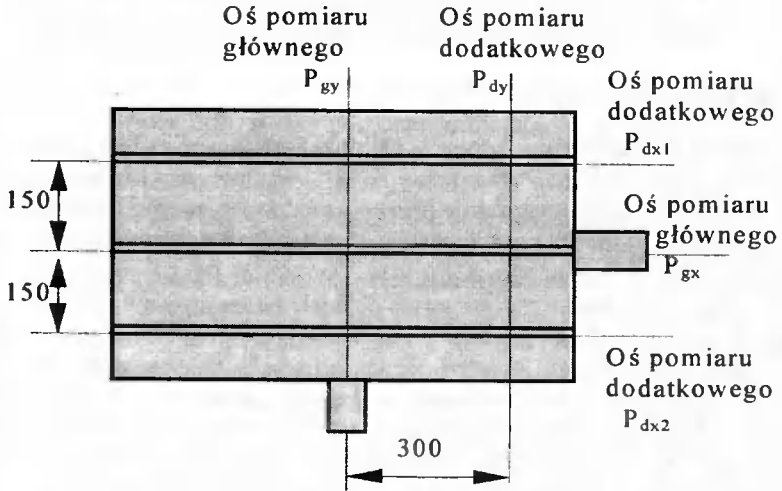
Dokładność, powtarzalność i osiowe wartości zwrotne pozycjonowania określono na podstawie pomiarów. Dla każdego odcinka pomiarowego (osi) wykonano trzy serie pomiarów w obu kierunkach, tj.:  $3 \times 2 \times 6 = 36$  odczytów lub dla krótszego odcinka (120 mm)  $3 \times 2 \times 5 = 30$  odczytów. Ilość punktów i serii pomiarowych dobrano zgodnie z zaleceniami zawartymi w projekcie normy PrPN-ISO 230-2 [4]. W czasie pomiarów głównych oś optyczna interferometru była ustawiona w ten sposób, że przechodziła w pobliżu środka stołu.

Dla sprawdzenie wpływu położenia osi optycznej interferometru laserowego na dokładność pozycjonowania w osiach X i Y wykonano pomiary dodatkowe, ustawiając oś optyczną w pobliżu krawędzi stołu. Pomiary dodatkowe ograniczono do kilku wybranych położen osi optycznej oraz jednej serii pomiarowej w każdym z wybranych położen.

## 2.3. DRAŻARKA EDED 40 CNC

Pomiary główne wykonano w osiach X, Y i Z z zastosowaniem obu programów sterowania bez korekty i z korektą. Wyniki pomiarów przedstawia tablica 1. Wielkości:  $A$ ,  $R\uparrow$ ,  $R\downarrow$ ,  $R$ ,  $U$  zostały obliczone statystycznie zgodnie z projektem normy PrPN-ISO 230-2.

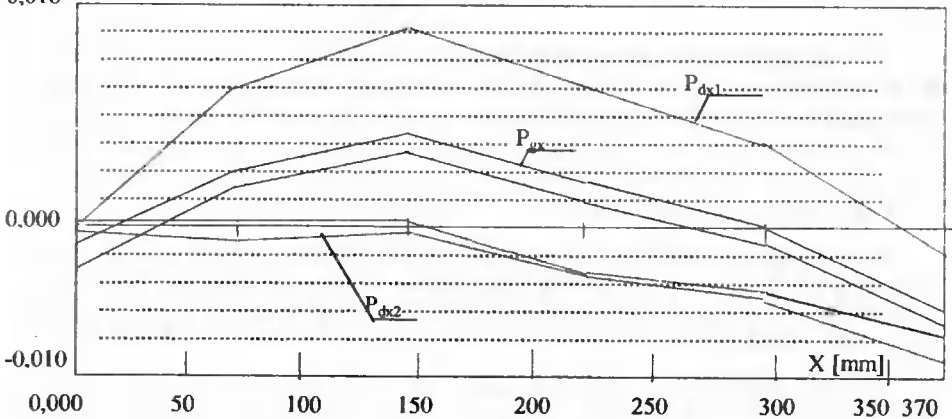
Pomiary dodatkowe wykonano w osiach X i Y, dla stołu sterowanego za pomocą liniałów, po korekcie. Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie rozmieszczenie osi optycznych interferometru laserowego względem środka stołu - podczas pomiarów głównych i dodatkowych.



Rys. 1. Rozmieszczenie osi optycznych interferometru laserowego na stole drążarki podczas pomiarów głównych -  $P_{gx}$  i  $P_{gy}$  oraz dodatkowych -  $P_{dx1}$ ,  $P_{dx2}$  i  $P_{dy}$ .

Na rys. 2 przedstawiono wykresy odchyłek położenia stołu w funkcji współrzędnej osi X. Jak widać wyniki pomiarów dodatkowych  $P_{dx1}$ ,  $P_{dx2}$  w przypadku osi X znacznie odbiegają od wyników pomiarów głównych, uzyskanych w środku stołu.

Odchyłka  $\Delta X$  [mm]  
0,016



Rys. 2. Wykresy odchyłek dokładności pozycjonowania osi X w drążarce EDED 40 CNC z liniami i korektą (+0.000035m/1m) w osiach optycznych:  $P_{gx}$ ,  $P_{dx1}$ ,  $P_{dx2}$

W przypadku osi Y różnica była pomijalna zarówno ze względu na kształt wykresu, jak i wartości odchyłek. Wyniki zamieszczone są w pracy [5].

Tablica 1. Zestawienie wyników pomiarów dokładności pozycjonowania drążarki typu EDED 40 CNC w osiach przesuwów: X, Y, Z.

Długość pomiarowa [mm]	X = 370			Y = 220				Z = 220
	bez liniału	z liniałem		bez liniału		z liniałem		bez liniału
Współczynnik korygujący K	0	0	3,5E-5	0	2E-4	0	-5E-5	0
Ilość pomiarów	36	12	36	12	36	12	36	36
Dokładność dwukierunkowa A [mm] (wg ISO)	0,012	0,017	0,017	0,061	0,016	0,025	0,010	0,008
Powtarzalność jednokierunkowa R↑ [mm] (wg ISO)	0,002		0,002		0,003		0,003	0,002
Powtarzalność jednokierunkowa R↓ [mm] (wg ISO)	0,001		0,002		0,004		0,002	0,001
Powtarzalność dwukierunkowa R [mm] (wg ISO)	0,001		0,005		0,003		0,002	0,001
Maksymalny luz nawrotny U [mm] (wg ISO)	0,007		0,003		0,006		0,004	0,001

Na podstawie uzyskanych wyników przedstawionych w tablicy 1 i na wykresach można stwierdzić, że dokładności pozycjonowania dla poszczególnych osi różnią się między sobą jakościowo i ilościowo.

W przypadku osi X:

- najlepsza dokładność pozycjonowania jest dla osi sterowanej za pomocą liczników kroków - korekta jest wówczas praktycznie niepotrzebna,
- wprowadzenie liniałów pogorszyło dokładność pozycjonowania, która zależy od położenia osi optycznej interferometru laserowego względem środka stołu (rys. 2).

W przypadku osi Y:

- sterowanie położeniem stołu za pomocą liniałów jest o 153 % dokładniejsze niż bez liniałów,
- wprowadzenie współczynników korygujących wyraźnie poprawia dokładności pozycjonowania zarówno w przypadku układu sterowanego licznikiem kroków – 207 %, jak i liniałami – 89 %,
- dokładność pozycjonowania praktycznie nie zależy od położenia osi optycznej interferometru laserowego względem środka stołu.

W przypadku osi Z sterowanie położeniem płyty narzędziowej jest możliwe tylko za pomocą licznika kroków silnika krokowego. Dokładność pozycjonowania w osi Z jest poprawna i lepsza niż w pozostałych dwóch osiach

## 2.4. DRAŻARKA EDIOS 16 CNC

Pomiary główne wykonano w osiach X, Y i Z z zastosowaniem programu z licznikiem kroków. Wyniki pomiarów są przedstawione w tabelicy 2. Wielkości: A, R $\uparrow$ , R $\downarrow$ , R, U zostały wyznaczone w identyczny sposób jak w przypadku drążarki EDED 40 CNC.

Ponadto wykonano jeden pomiar dodatkowy w osi X w odległości 110 mm od środka stołu. Wyniki pomiaru dodatkowego nie odbiegają od wyników pomiaru głównego uzyskanych w środku stołu.

Na podstawie wyników zawartych w tabelicy 2 można stwierdzić, że dokładności pozycjonowania dla poszczególnych osi nie różnią się między sobą w sposób znaczący (jak w drążarce EDED 40 CNC).

W przypadku osi X wprowadzenie współczynnika korygującego poprawiło o 344 % dokładność pozycjonowania.

W przypadku osi Y, zmiana odchyłki w funkcji współrzędnej jest nieliniowa, co wyklucza możliwość korekty dokładności za pomocą przyjętych funkcji korygujących. Odchyłka jest mniejsza od tolerancji zalecanej w projekcie normy PrPN ISO 11090-1.

W przypadku osi Z wprowadzenie współczynnika korygującego poprawiło o 83 % dokładność pozycjonowania.

Tabela 2. Zestawienie wyników pomiarów dokładności pozycjonowania drążarki typu EDIOS 16 CNC w osiach przesuwów: X, Y, Z

Długość pomiarowa [mm]	X = 220		Y = 120	Z = 120	
Współcz. korekcji K	0	1,9E-4	0	0	7E-5
Ilość pomiarów	12	36	30	10	30
Dokładność dwukierunkowa A [mm] (wg ISO)	0,045	0,012	0,009	0,016	0,007
Powtarzalność jednokierunkowa R $\uparrow$ [mm] (wg ISO)		0,008	0,002		0,003
Powtarzalność jednokierunkowa R $\downarrow$ [mm] (wg ISO)		0,007	0,002		0,003
Powtarzalność dwukierunkowa R [mm] (wg ISO)		0,007	0,002		0,003
Maksymalny luz nawrotny U [mm] (wg ISO)		0,003	0,002		0,002

## 2.5. WYCINARKA EWEB 40 CNC

Pomiary główne wykonano w osiach X, Y, a dodatkowe w osi X [1].

Pierwsze z nich wykonano z zastosowaniem obu programów sterowania bez korekty i z korektą. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabelicy 3.

Drugie (dodatkowe) wykonano w osi X dla stołu sterowanego za pomocą liniałów, po korekcie. Oś optyczna znajdowała się w odległości 90 mm od środka stołu w kierunku stanowiska operatora. Wyniki pomiarów dodatkowych nie odbiegają w istotny sposób od wyników pomiarów głównych - uzyskanych w środku stołu.

Na podstawie wyników zawartych w tabelicy 3 można stwierdzić, że:

- wprowadzenie sterowania za pomocą liniałów poprawia dokładność pozycjonowania w obu osiach - X 32 %, Y 85 %, Z 83 %

- wprowadzenie prawidłowo dobranych współczynników korekty do obu układów sterowania poprawia dokładność pozycjonowania w obu osiach, dla X: 52 % z liniałami, 43 % bez liniałów; dla Y: 63 % z liniałami, 77 % bez liniałów,

Tablica 3. Zestawienie wyników pomiarów dokładności pozycjonowania wycinarki typu EWEB 40 CNC w osiach przesuwów: X, Y

Długość pomiarowa [mm]	X = 450				Y = 200			
	bez liniału		z liniałem		bez liniału		z liniałem	
Program sterujący	0	-1,4E-4	0	-1,3E-4	0	5E-5	0	5E-5
Współcz. korekcji K	0	-1,4E-4	0	-1,3E-4	0	5E-5	0	5E-5
Ilość pomiarów	12	36	12	36	12	36	12	36
Dokładność dwukierunkowa A [mm] (wg ISO)	0,099	0,056	0,067	0,032	0,220	0,053	0,033	0,012
Powtarzalność jednokierunkowa R↑ [mm] (wg ISO)		0,033		0,019		0,006		0,005
Powtarzalność jednokierunkowa R↓ [mm] (wg ISO)		0,038		0,027		0,004		0,007
Powtarzalność dwukierunkowa R [mm] (wg ISO)		0,033		0,023		0,004		0,005
Maksymalny luz nawrotny U [mm]		0,011		0,004		0,051		0,006

### 3. WNIOSKI

1. Najistotniejszy wpływ na dokładność pozycjonowania ma dokładność geometryczna i zużycie eksploatacyjne stołu krzyżowego. Dopiero, gdy stół ma poprawną geometrię można wówczas zwiększyć dokładność pozycjonowania stosując – zamiast liczników kroków - korektę pozycjonowania i liniały.
2. Dokładność i powtarzalność pozycjonowania suwaków w głowicach drążarek (oś Z) jest znacznie lepsza niż stołów krzyżowych. Ponadto ciężar własny suwaka na prowadnicach tocznych powoduje samoczynne kasowanie luzu w mechanizmie. Dlatego stosowanie liniałów w osi Z nie jest konieczne. Należy natomiast stosować korektę pozycjonowania osi Z.

### LITERATURA

- [1] ISO/DIS 14137.: Machine tools - Test conditions for wire electrical discharge machines (wire EDM) - Terminology and testing of the accuracy.
- [2] Mierzejewski J.: Serwomechanizmy obrabiarek sterowanych numerycznie. PWT, Warszawa 1977.

- [3] PrPN-ISO 11090-1.: Obrabiarki. Warunki odbioru drążarek elektroerozyjnych (EDM). Terminologia i sprawdzanie dokładności. Drążarki jednokolumnowe (ze stołem krzyżowym i stołem nieruchomym).
- [4] PrPN-ISO 230-2.: Przepisy badania obrabiarek. Wyznaczanie dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi sterowanych numerycznie.
- [5] Siudyła G. Zachorowski J, Krzywda T.: Opracowanie i wdrożenie funkcji korekcji pozycjonowania w drążarkach i wycinarkach elektroerozyjnych sterowanych numerycznie. Prace IOS, Kraków 1999.

## POSITIONING ACCURACY ANALYSIS IN NUMERICALLY- CONTROLLED ED-MACHINES

### Summary

Positioning accuracy was analysed for two die-sinking and one wire electro-discharge machines. The research investigated the impact of the position measurement method with the step counter and with linear encoders as well as of correction of positioning deviation and cross-slide table quality on the total accuracy. The laser interferometer defined accuracy and repeatability deviations as well as the reversal value of positioning.

**Key words:** accuracy, positioning, electro-discharge machine tool

## PROJEKT ZASTOSOWANIA STEROWANIA ROZMYTEGO DO DRAŻAREK ELEKTROEROZYJNYCH TYPU EDIOS

Andrzej Stankiewicz

Instytut Obróbki Skrawaniem,  
Pracownia Obróbki Elektrochemicznej,  
ul. Wrocławska 37a, 30-011 Kraków

Logika zbiorów rozmytych jest narzędziem przydatnym do sterowania procesami o dużych zakłóceniach. Drażenie elektroerozyjne jest takim właśnie procesem z podwodu stochastycznego charakteru wyładowań. W referacie opisano proces projektowania regulatora rozmytego wykorzystywanego do sterowania drażarkami typu EDIOS.

*Słowa kluczowe:* drażenie elektroerozyjne, EDM, sterowanie rozmyte

### 1. DRAŻENIE ELEKTROEROZYJNE A STEROWANIE ROZMYTE

Sterowanie ruchem elektrody w obróbce elektroerozyjnej jest zagadnieniem trudnym, gdyż proces drażenia zależy od licznych wzajemnie powiązanych czynników. Ponadto nie istnieje całościowy opis zjawiska w formie zależności funkcyjnych. Dodatkową przeszkodę stanowi stochastyczny charakter wyładowań iskrowych w szczelinie międzyelektrodowej. W tej sytuacji układy regulacji typu PID nie dają zadowalających wyników, gdyż pracują z dużym marginesem błędów.

Część czynników, mimo wywierania istotnego wpływu na przebieg procesu nie jest kontrolowana, gdyż nie ma możliwości ich pomiaru w trakcie drażenia. Do czynników takich należą, m. in.: stopień zjonizowania szczeliny międzyelektrodowej oraz zawartość i rozkład zanieczyszczeń. Te ostatnie, gromadząc się w szczelinie zaburzają przebieg procesu do tego stopnia, że drażenie praktycznie ulega zatrzymaniu. Pokonanie trudności zależy od doświadczenia technologa projektującego proces. W tym celu: w elektrodach wprowadza się otwory ułatwiające ewakuację produktów erozji ze szczeliny, elektrodzie nadaje się dodatkowe ruchy (okresowe wycofywanie wzdłuż trajektorii drażenia, ruch translacyjny), stosuje się obróbkę kilkoma elektrodami. Dalszy postęp w obróbce elektroerozyjnej wiąże się z uproszczeniem technologii drażenia

Rozmyty system sterowania jest systemem ekspertowym czasu rzeczywistego, implementującym działania operatora lub ekspertyzy inżynierów procesu. Sterowanie rozmyte umożliwia rozwiązywanie złożonych problemów w krótkim czasie, gdyż wiedza o procesie i strategiach sterowania jest wyrażana w sposób naturalny jako reguły: sytuacja-działanie, a nie za pomocą równań różniczkowych. Wiedza ta musi być pozyskiwana, kodowana, testowana i poprawiana.



Widząc potencjalne duże korzyści, jakie może przynieść zastosowanie sterowania rozmytego do drążenia elektroerozyjnego, w Instytucie Obróbki Skrawaniem (IOS) w Krakowie podjęto prace nad tym zagadnieniem. Celem jest opracowanie systemu sterowania wybranymi parametrami drążenia elektroerozyjnego w oparciu o zasady logiki rozmytej - *fuzzy logic*. Wynikiem będzie układ zmieniający automatycznie niektóre z nastawionych parametrów obróbki tak, aby pokonane zostały zakłócenia powstające w trakcie drążenia elektroerozyjnego. Oczekuje się, iż wprowadzenie sterowania rozmytego do drążenia nie tylko uprości technologię, ale także przyczyni się do zwiększenia wydajności obróbki. Szczególnie istotne jest wyeliminowanie z procesu wszelkich zaburzeń, których pojawienie się może spowodować uszkodzenie obrabianego przedmiotu, gdyż wyniki z tego powodu straty finansowe są duże, ponieważ drążenie jest na ogół jedną z końcowych operacji obróbczych.

Jak wynika z publikowanych danych sterowanie rozmyte przynosi znaczne efekty przy drążeniu głębokim, tj. w trudnych warunkach obróbki. Czas drążenia ulega skróceniu przeciętnie o 20 % do 30 %.

Przewiduje się, że sterowanie rozmyte znajdzie zastosowanie w wytwarzanych w kraju drążarkach elektroerozyjnych, w szczególności konstruowanych w IOS (oznaczanych symbolem EDIOS).

## 2. STEROWANIE ROZMYTE

### 2.1. ZASADY OGÓLNE

Idea sterowania rozmytego oparta jest na teorii zbiorów rozmytych, którą w latach pięćdziesiątych naszego wieku sformułował Zadeh z University of California. Logika rozmyta (*fuzzy logic*) różni się zasadniczo od tradycyjnej logiki Boole'a, która operuje ostrymi pojęciami prawdy i nieprawdy. Logika rozmyta zbliżona jest do sytuacji, których dostarcza nam życie, gdzie prawda i nieprawda wzajemnie się przenikają, w których należy odpowiadać na pytanie: w jakim stopniu dane stwierdzenie jest prawdziwe? Teoria Zadeha pozwala uściślać i przetwarzać pojęcia niepewne.

Ogólny schemat regulatora rozmytego przedstawiono na rysunku 1.

Proces projektowania regulatora rozmytego obejmuje następujące etapy zawierające poniższe grupy czynności:

Etap I:

- określenie wejść do układu sterowania,
- dokonanie ich lingwistycznego rozdziału, czyli tzw. rozmywania (*fuzzyfication*) na odpowiednie stany, np.: niski, średni, wysoki, lub bardzo niekorzystny, niekorzystny, obojętny, pozytywny, lub ujemny, zerowy, dodatni, itp.,
- ustalenie dla każdego stanu funkcji przynależności (*membership function*), np.: trójkąt, trapez, prostokąt, krzywa dzwonowa, itp.

Etap II:

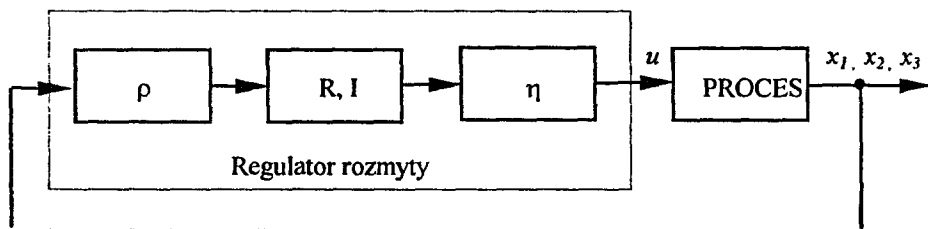
- określenie wyjść z układu sterowania,
- dokonanie lingwistycznego rozdziału wyjść,
- ustalenie funkcji przynależności dla wielkości wyjściowych.

Etap III:

- określenie funkcji odwzorowania danych wejściowych w wielkości wyjściowe w postaci wyrażen: „Jeżeli ....., to.....”, czyli ustalenie zbioru reguł sterowania (*compositional rules of inference*).

Etap IV:

- określenie metody przekształcania wartości „rozmytych” w „ostre”, czyli tzw. wyostrzanie (*defuzzyfication*).



Rys. 1. Schemat regulatora rozmytego w pętli sprzężenia zwrotnego:  $\rho$  - operacja rozmywania wejść (*fuzzyfication*), R - relacja wiążąca wejścia z wyjściem. I - operacja wnioskowania rozmytego,  $\eta$  - operacja wyostrzenia wyjściowego (*defuzzyfication*) [12]

Zmienna lingwistyczna (*linguistic variable*) jest to zmienna, której wartościami są zdania w języku naturalnym utożsamiane z określonymi zbiorami rozmytymi. Zbiór rozmyty jest zbiorem parametrów  $t \in T \{ \mu(t), t \}$ , gdzie  $\mu: T \rightarrow [0, 1]$  jest funkcją przynależności, która każdemu elementowi  $t \in T$  przyporządkowuje stopień przynależności do zbioru rozmytego, czyli liczbę z przedziału  $[0, 1]$ : od nieprzynależności ( $\mu(t)=0$ ), przez przynależność częściową ( $0 < \mu(t) < 1$ ), do całkowitej przynależności ( $\mu(t)=1$ ). Kształt funkcji przynależności określa projektant na podstawie doświadczenia; przy czym stopień przynależności należy interpretować jako stopień prawdy, a nie jako prawdopodobieństwo. Podobnie zbiór reguł sterowania oparty jest najczęściej na ogólnych prawach procesu i zasadach postępowania doświadczonego operatora.

## 2.2. PROPONOWANE ROZWIĄZANIE

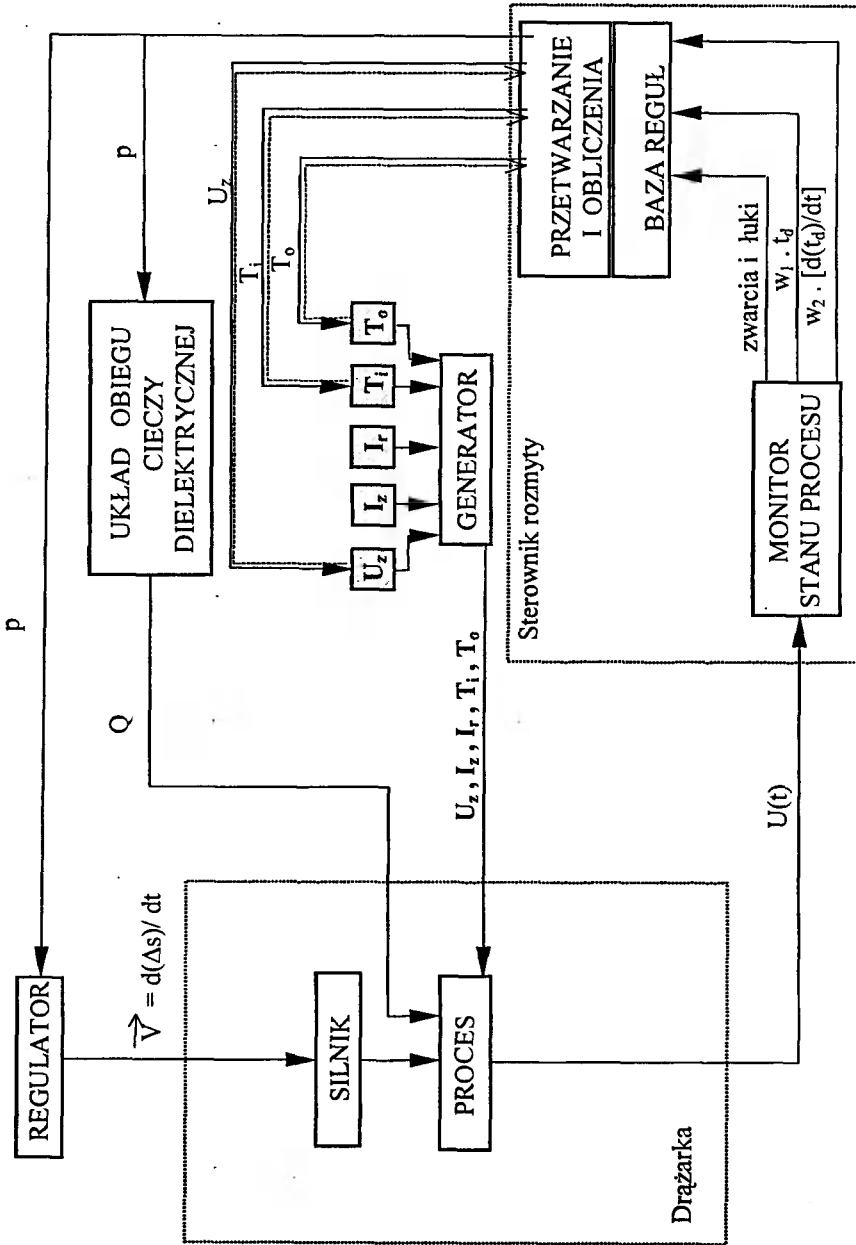
Na rys. 2 przedstawiono schemat blokowy prototypowej wersji układu sterowania rozmytego drążarką elektroerozyjną.

Dotychczasowy układ sterowania obejmuje część znajdującą się z lewej strony rysunku. Silniki napędzające głowicę otrzymują sygnały z zespołu napędu, który określa współrzędne punktu docelowego oraz prędkość ruchu. Sygnały te wypracowywane są w zespole napędu na podstawie napływających informacji:

- o aktualnym położeniu elektrody względem przedmiotu obrabianego (pomiar za pomocą liniiów optoelektrycznych),
- o współrzędnych docelowego punktu na zadanej trajektorii ruchu,
- o różnicy napięcia  $\Delta U$  pomiędzy napięciem zadanim  $U_z$  a średnim napięciem w szczelinie międzyelektrodowej U.

Równocześnie do szczeliny międzyelektrodowej transmitowane są z generatora sygnały elektryczne o parametrach:

- wartość napięcia zadanego  $U_z$ ,



Rys. 2. Schemat blokowy prototypowej wersji układu sterowania rozmytego drążarka elektroerozyjną

- natężenie prądu zapłonowego w impulsie  $I_z$ ,
- natężenie prądu roboczego  $I_r$ ,
- czas trwania impulsu roboczego  $t_i$ ,
- czas przerwy pomiędzy impulsami  $t_o$ .

Nowy układ rozszerzono o elementy sterowania rozmytego (znajdując się po prawej stronie rysunku), na które składają się:

- monitor stanu procesu,
- zespół przetwarzania danych i obliczeń,
- regulator rozmyty.

Zadania tych elementów określają ich nazwy.

Regulator rozmyty wymaga: budowy urządzenia do pozyskiwania wiedzy przebiegu procesu, kodowania i zapamiętywania zebranych danych, opracowania algorytmów sterowania i opartych na nich programów obliczeniowych oraz wykonania układu sterującego drążarką według przyjętych algorytmów.

W prowadzonych w IOS pracach: zdefiniowano stosowane określenia i znaczenia, wykonano i uruchomiono doświadczalne stanowisko do monitorowania parametrów wyładowań elektrycznych podczas drażenia elektroerozyjnego, które umożliwiła próbkowanie napięcia w odstępach co 2  $\mu$ sek. Pojedynczy rekord zapisywany jest w formie numerycznej i graficznej. Wielkości wejściowe powiązane z wielkością wyjściową zależnościami lingwistycznymi. Sprawdzono poprawność przyjętych reguł wnioskowania rozmytego oraz opracowano ogólny algorytm sterowania pracą drążarki.

## ALGORYTM STEROWANIA ROZMYTEGO

Nastawione parametry drażenia na początku procesu przekazywane są nie tylko do generatora - tak jak dzieje się to obecnie - ale równocześnie następuje ich przesłanie do układu obliczeniowego. Tę jednorazową czynność zaznaczono na schemacie (rys. 2) liniami przerywanymi.

Specjalny układ do monitorowania parametrów wyładowań elektrycznych okresowo zbiera i zapamiętuje w postaci cyfrowej przebieg napięcia  $U(t)$  w szczelinie między-elektrodowej. Na tej podstawie, w układzie obliczeniowym wyznaczone zostaną wskaźniki stanu szczeliny, którymi są: współczynnik wypełnienia impulsami szkodliwymi  $\Phi_s = (\sum t_{ca} + \sum t_{cz}) / \sum t_c$  (suma czasu impulsów łukowych  $t_{ca}$  i czasu impulsów zwarcio-  
wych  $t_{cz}$ , podzielona przez sumę czasu wszystkich cykli wyładowań  $t_c$ ) stanowiący informację o ogólnej poprawności przebiegu wyładowań, czas opóźnienia wyładowania  $t_d$  oraz kierunek (przyrost lub zmniejszanie się) i prędkość zmian opóźnienia wyładowania  $d(t_d)/dt$ . Informacje te przekazywane są do regulatora rozmytego jako wielkości wejściowe. Sygnał o poprawności przebiegu wyładowań jest nadrzędny względem dwóch pozostałych sygnałów. Wielkości wejściowe, dla ułatwienia obliczeń, zostają znormalizowane za pomocą odpowiednich współczynników:  $w_1, w_2, w_3$ .

Wielkością wyjściową z regulatora są sygnały do sterowania napięciem zadaniem  $U_z$ . Po wyczerpaniu możliwości regulacji, tj. po osiągnięciu przez napięcie założonych wartości skrajnych, zmienia się inne parametry obróbki.

Zgodnie z potrzebami sterowania rozmytego wielkości wejściowe i wyjściowe rozdzielono lingwistycznie. Dla czasu opóźnienia wyładowania  $t_d$  przyjęto pięć stanów. Prędkość zmian opóźnienia wyładowania  $d(t_d)/dt$  oraz napięcie zadane  $U_z$  rozdzielono na trzy stany. Następnie ustalono kształt funkcji przynależności. We wszystkich przypadkach założono trójkątny rozkład funkcji, a w stanach skrajnych rozkład trapezowy.

Dalszą czynnością było określenie zbioru reguł sterowania, które ujęto w formie tablic wiążących wielkości wejściowe z wielkościami wyjściowymi (ze względu na objętość pracy nie zamieszczono ich).

Utworzony algorytm sterowania rozmytego sprawdzono wstępnie, wykonując obliczenia w punktach charakterystycznych. Przykłady obliczeń wykazały poprawność przyjętego algorytmu. Wyliczone zmiany napięcia były zgodne z oczekiwanymi tendencjami. Przy wyostrzaniu rozmytej wielkości wyjściowej zastosowano dwie metody: metodę środka ciężkości oraz metodę wysokości. Nieznaczne różnice wyników pomiędzy obiema metodami spowodowały, iż do realizacji przyjęto metodę wysokości, gdyż jest ona znacznie prostsza i szybsza.

### ALGORYTM STEROWANIA PRACĄ DRAŻARKI

Pracę drążarki oparto o sygnał wyliczony w układzie sterowania rozmytego. Zmienne są:

- napięcie zadane  $U_z$  - w pierwszej kolejności,
- czas trwania impulsu  $T_i$  albo czas przerwy pomiędzy impulsami  $I_n$  - w przypadku osiągnięcia przez napięcie założonych wartości granicznych.

Po osiągnięciu dolnej wartości granicznej napięcia wydłuża się czas impulsu  $T_i$ . Po osiągnięciu górnej wartości granicznej tego parametru, zwiększa się czas przerwy pomiędzy impulsami  $T_o$ , ale nie więcej niż o jeden stopień (lub skracany czas trwania impulsu).

Jeżeli wzrost napięcia i wydłużenie czasu przerwy pomiędzy impulsami nie przyniesie zadowalających wyników, wówczas nastąpi przepłukanie szczeliny międzyelektrodowej. Sygnał do włączenia płukania  $p$  przesłany zostanie równocześnie do regulatora oraz układu obiegu cieczy dielektrycznej. Płukanie jest realizowane przez:

- 1) Otwarcie zaworu,
- 2) Wycofanie elektrody z położenia roboczego na zadaną odległość  $H_u$ ,
- 3) Postój elektrody w położeniu odsuniętym przez zadany czas  $t_{pl}$ ,
- 4) Zamknięcie zaworu,
- 5) Dosunięcie elektrody do położenia roboczego.

Szczegóły sterowania ujęto w algorytmie. Mimo zmian czasu impulsu i czasu przerwy, w żadnym przypadku czas impulsu nie ulega skróceniu poniżej wartości nastawionej na początku zabiegu.

### 3. ZAKRES DALSZYCH PRAC

Dalsze prace nad systemem sterowania rozmytego wymagają: dopracowania układu do monitorowania parametrów wyładowań elektrycznych, opracowania komputerowego programu obliczania wielkości wyjściowej w postaci znormalizowanej wartości napięcia zadanego  $U_z$  według przyjętego algorytmu sterowania. Ponadto wskazane jest wykonanie generatora reagującego na sygnały otrzymywane na wyjściu ze sterowania rozmytego, przeprowadzenie prób drążenia i ich weryfikacja, oraz wprowadzenie zmian w systemie, zgodnie z wnioskami z badań.

## LITERATURA

- [1] Balazinski M., Bellerose M., Czogała E.: Wybór i modyfikacja parametrów skrawania w procesach obróbczych z użyciem systemu wspomaganego podejmowania decyzji wykorzystującego zbiory rozmyte (FDDS). Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej – seria: Mechanika 116, Gliwice 1994.
- [2] Behrens A., Witzak M. P.: An Hierarchical Process Control System for Highly Efficient Electro-Discharge Machining. Proceedings of 12<sup>th</sup> International Symposium for Electromachining (ISEM), Aachen 1998.
- [3] Będzak M., Daca W.: Fuzzy Control - nowa perspektywa w technice regulacji. Pomiary, Automatyka, Kontrola, t. 39, nr 12, 1993.
- [4] Boccadoro M., Dauw D.F.: About the application of fuzzy controllers in high-performance die-sinking EDM machines. Proceedings of ISEM IX, Lozanna 1995.
- [5] Czechanowski R.: Wykonanie i przebadanie prototypu przemysłowego dwuparametrowego układu AC do drążarki EDED 40. Prace Instytutu Obróbki Skrawaniem, seria: Sprawozdania, symbol 1.01.1d / 05.1.6, Kraków 1980.
- [6] Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M.: Wprowadzenie do sterowania rozmytego. WNT, Warszawa 1996.
- [7] Kobayashi K.: The Present and Future Developments of EDM and ECM. Proceedings of ISEM IX, Lozanna 1995.
- [8] Liebeskind A.: Badanie procesu erozji elektrycznej w celu ustalenia sygnałów sterujących i wielkości sterowalnych. Prace Instytutu Obróbki Skrawaniem seria: Sprawozdania, symbol 1.11.02 / 05.1.4, Kraków 1983.
- [9] Mielnicki W., Stankiewicz A., R. Czechanowski, J. Słomczyński: Badania procesu drążenia elektroerozyjnego z doświadczalnym systemem sterowania opartym na logice rozmytej. Opracowanie założeń do doświadczalnego systemu sterowania. Prace Instytutu Obróbki Skrawaniem, seria: Sprawozdania, symbol DS.93-3.1, Kraków 1998.
- [10] Mielnicki W., Stankiewicz A., R. Czechanowski, J. Słomczyński: Badania procesu drążenia elektroerozyjnego z doświadczalnym systemem sterowania opartym na logice rozmytej. Skompletowanie i przetestowanie stanowiska do monitorowania parametrów wylądowań elektrycznych charakteryzujących jakość procesu. Badania i ustalenie algorytmów sterujących wielkościami wejściowymi w celu optymalizacji procesu. Prace Instytutu Obróbki Skrawaniem, seria: Sprawozdania, symbol DS.93-3.1, Kraków 1999.
- [11] Milecki A.: Wykorzystanie logiki rozmytej w technice sterowania. Pomiary, Automatyka, Kontrola, t. 40, nr 7, 1994.
- [12] Ocoś K., Kluska J.: Logika rozmyta w sterowaniu. Mechanik 8/9, 1994.
- [13] Rutkowska P., Piliński M., Rutkowski L.: Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte. PWN, Warszawa-Łódź 1997.
- [14] Tarng Y.S., Tseng C.M., Chung L.K.: A Fuzzy Pulse Discrimination System for Electrical Discharge Machining. International Journal of Machine Tools & Manufacture, t. 37, nr 4, 1997.
- [15] Yan M.T., Liao Y.S.: Adaptive Control of WEDM Process Using the Fuzzy Control Strategy. Proceedings of ISEM IX, Lozanna 1995.

## FUZZY LOGIC CONTROL APPLICATION TO THE EDIOS-TYPE EDM MACHINE TOOLS

### Summary

Fuzzy logic remains useful for high-disturbance process control; EDM can be applied here due to its stochastic spark discharges. The present paper investigates fuzzy logic regulator designing for EDIOS-type EDM machine tool control.

**Key words:** EDM sinking, fuzzy logic control

## DEKOHEZJA WĘGLIKÓW SPIEKANYCH W STREFIE SKRAWANIA PODCZAS OBRÓBK ELEKTROCHEMICZNO-ŚCIERNEJ

Stanisław Zaborski, Henryk Żebrowski

Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej,  
Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji,  
ul. Łukasiewicza 3/5, 50-371 Wrocław

Omówiono modele propagacji pęknięć w węglkach spiekanych. Dokonano pomiaru współczynnika  $K_{C(HV)}$ , odporności na powierzchniowe pękanie węglków spiekanych. Pomiaru te realizowano w elektrolitach: pasywnym i aktywnym. Zidentyfikowano pęknięcia i przelomy w węglkach spiekanych po szlifowaniu elektrochemicznym.

*Słowa kluczowe:* węglki spiekane, mikroszczeliny, pękanie materiału, szlifowanie elektrochemiczne

### 1. WSTĘP

Dotychczasowe badania obróbki węglków spiekanych metodą elektrochemiczno – ścierną dotyczą głównie efektów technologicznych: wydajności objętościowej, struktury geometrycznej obrobionej powierzchni i zużycia nasypu narzędzi ściernych (katod). W znacznie mniejszym stopniu badane są właściwości fizyczne warstwy wierzchniej obrobionej powierzchni [13]. Najmniej zbadanym zagadnieniem jest dekohezja węglków spiekanych w strefie skrawania podczas szlifowania elektrochemicznego. Wskazuje na to analiza literatury, w której brak wyników badań na ten temat. Można jednak spotkać informacje o wielu zaletach obróbek erozyjnych [4, 6, 10], które dotychczas nie są w pełni wykorzystane. Poznanie zagadnienia dekohezji obrabianego materiału jest celem prezentowanego artykułu, co może przyczynić się do dalszego rozwoju tej technologii.

### 2. ZAGADNIENIA PĘKNIĘĆ W MATERIAŁACH KRUCHYCH

Węglki spiekane, jak wiadomo, należą do materiałów kruchych. Zarodkowanie pęknięć w takich materiałach jest opisane przez wielu autorów [2, 11]. Rozpatrują oni różne hipotezy tworzenia się mikropęknięć [8, 9]. Najwięcej z nich przyjmuje jako początek pęknięcia powstanie lokalnych koncentracji naprężeń, wywołanych na ogół śpiętrzeniem dyslokacji. Gdy naprężenie styczne przekroczy naprężenia krytyczne dla



danego metalu, to następuje wówczas ruch dyslokacji, który powoduje rozrywanie wiązań chemicznych w metalu i zapoczątkowanie propagacji pęknięć [5, 15].

Podany przez Zenera jeden z pierwszych wskaźników zarodkowania pęknięć oparty jest na modelu dyslokacyjnym odkształceń sprężystych i plastycznych [2]. Na dyslokację czołową o wektorze Burgersa  $\bar{b}$  oddziałują krytyczne naprężenia określone wzorem:

$$\sigma_r = \frac{2\gamma}{np} \quad (1)$$

gdzie:

- $\gamma$  - efektywna energia powierzchniowa,
- $n$  - ilość spiętrzonych dyslokacji,
- $p$  - równowagowe położenie atomów.

Zwiększenie tego naprężenia może powodować pokonanie przeszkody, albo też dalsze spiętrzenie dyslokacji umożliwiające ich koalescencję, w wyniku której powstaje zarodek pęknięcia zapoczątkowany dyslokacją o wielokrotnym wektorze Burgersa.

Węglik spiekane posiadają, jak wiadomo, strukturę nieregularną, a poszczególne fazy (WC, Co) mają właściwości fizyczne znacznie różniące się między sobą [1]. Dla materiałów o strukturze nieregularnej jedną z przyczyn powstawania pęknięć jest anizotropia rozszerzalności liniowej, powiązana z naprężeniami własnymi w węglkach spiekanych

$$\sigma_i = (a_m - \bar{a})E\Delta T \quad (2)$$

gdzie:

- $a_m$  - maksymalna rozszerzalność liniowa,
- $\bar{a}$  - średnia rozszerzalność liniowa,
- $E$  - moduł sprężystości podłużnej,
- $\Delta T$  - przyrost temperatury.

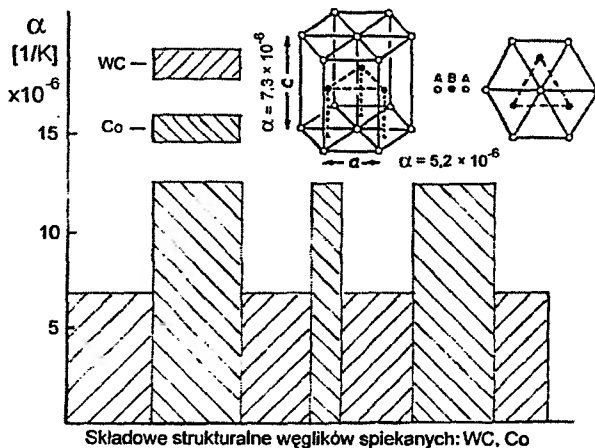
Na rysunku 1 przedstawiono diagram zawierający wartości rozszerzalności liniowej  $\alpha$  dla poszczególnych faz węgliku spiekane go typu WC-Co.

W ciałach krystalicznych współczynnik rozszerzalności liniowej  $\alpha$  zależy od kierunków sieciowych komórki elementarnej. Jest to szczególnie widoczne dla fazy WC (rys. 1). W kierunku stałej sieciowej  $a$ ,  $\alpha = 5,2 \times 10^{-6}$  1/K zaś dla kierunku stałej sieciowej  $c$ ,  $\alpha = 7,3 \times 10^{-6}$  1/K. Występuje więc około 30% różnica w wartości rozszerzalności liniowej dla różnych kierunków tej samej komórki elementarnej. Ma to niewątpliwie istotny wpływ na zarodkowanie mikropeęknięć w tym materiale. Równocześnie wyjaśnia to wrażliwość węglków spiekanych na gwałtowne zmiany temperatury podczas ich obróbki.

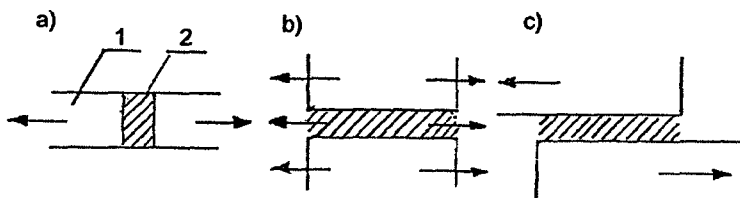
Ziarna węgliku wolframu (WC) w węglu spiekany m mogą być połączone z osnową kobaltową na kilka sposobów (rys. 2).

Połączenia te mają istotny wpływ na zachowanie się węglków spiekanych pod obciążeniem i wartość współczynników sprężystości ( $E$  i  $G$ ). Obciążenia w węglu spiekany m typu WC-Co przenoszone są na trzy sposoby: po ziarnach węgliku wolframu, spoiwie kobaltowym oraz po kobalcie, w którym jest rozpuszczony węgiel wolframu. Wzmocnienie osnowy kobaltowej zachodzi wskutek: utwardzenia zgmiotem, wystąpienia trójosiowego stanu naprężeń i dyslokacyjnego odpychania od krystalitów WC. Wartości odkształcenia plastycznego ziaren WC są bardzo małe. Natomiast równoległe odkształcenie składników o różnych własnościach stałych sprężystości  $E_{WC}$  i  $E_{Co}$  pro-

wadzi do niesprężystych zachowań materiału. W konsekwencji tego, że  $E_{WC}/E_{Co} = 4$ , w węgliku spiekany powstają mikropęknięcia, co prowadzi do osłabienia wiązań chemicznych, a tym samym do zmniejszenia, spójności w warstwie powierzchniowej. Jest to zjawisko korzystne w zdejmowaniu nadkładu obróbkowego.



Rys. 1. Wartości współczynnika rozszerzalności liniowej  $\alpha$  dla węglików spiekanych typu WC-Co



Rys. 2. Sposoby połączenia ziaren WC z fazą kobaltową w węgliku spiekany G20:  
a) połączenie stykowe, b) składniki równoległej warstwy, c) na zakładkę  
1 - ziarno WC, 2 - kobalt

Pod wpływem oddziaływania ziaren ściernych na materiał warstwy skrawanej następuje mechaniczne jej oddzielenie i przetworzenie na produkty procesu. Ten złożony proces zachodzi w materiale obrabianym w wyniku szybko rosnących naprężeń własnych oraz odkształceń sprężystych i plastycznych. Towarzyszą temu zachodzące zjawiska jak: pasywacja powierzchni anody, zewnętrzne tarcie kinetyczne, wydzielanie gazów, wydzielanie ciepła, dyfuzja, tribosorbpcja, dekohezja warstwy powierzchniowej, tarcie wewnętrzne, zużycie nasypu ściernego i wyładowania elektryczne.

Pod wpływem nacisku ziarn ściernych na materiał warstwy skrawanej pojawiają się najpierw odkształcenia sprężyste tego materiału, a po przekroczeniu odpowiedniej granicy tych odkształceń, dochodzi do odkształcenia trwałego, spowodowanego zjawiskiem poślizgu, tzn. zaburzeniem spójności międzycząsteczkowej, a następnie utraty spójności przez ścięcie. W zależności od udziału czynnika mechanicznego i elektro-

chemicznego wpływ poszczególnych zjawisk na utratę spójności warstwy skrawanej będzie różny.

Odształcenie plastyczne w polikryształach przebiega w formie zlokalizowanej (pasma zlokalizowanego odształcenia). Niektóre z utworzonych pasm rozciągają się przez wiele ziarn, zachowując swój początkowy kierunek.

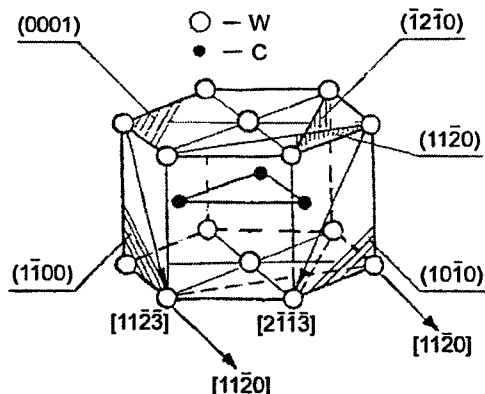
Proces odształcania węglików spiekanych i jego lokalizacja pozostaje w ścisłym związku z budową krystalograficzną. Składniki strukturalne węgla spiekane (WC, Co) mają sieci heksagonalne (tab. 1).

Tablica 1. Typy sieci krystalicznej w węglkach spiekanych

Nazwa pierwiastka lub związku	Typ sieci krystalicznej	Stosunek parametrów sieci $c/a$
Co	A3	$c/a < 1,633$
WC	B <sub>h</sub>	$c/a \ll 1,633$

W metalach o sieci heksagonalnej rodzaj i intensywność przebiegających procesów odształcania plastycznego oraz dekohezji w znacznym stopniu zależy od stosunku parametrów stałych sieciowych ( $c/a$ ). Wyróżnić można trzy przypadki:  $c/a \geq 1,633$ ; drugi,  $c/a < 1,633$  i trzeci  $c/a \ll 1,633$ . W omawianych badaniach występował drugi i trzeci przypadek (tab. 1). Metale o stosunku parametru sieci  $c/a < 1,633$  mają na ogół niezłą plastyczność (dotyczy to kobaltu). Natomiast faza WC ma ten stosunek znacznie mniejszy (trzeci przypadek) i jest mało plastyczna.

Na rysunku 3 przedstawiono komórkę elementarną węgla wolframu, głównego składnika węglków spiekanych.



Rys. 3. Komórka elementarna węgla wolframu z kierunkami i systemami poślizgów

Dane z tej struktury to:  $W \rightarrow (0,0,0)$ ,  $C \rightarrow (1/3, 2/3, 1/3)$ ,  $a = 2,906 \text{ \AA}$ ,  $c = 2,837 \text{ \AA}$ ,  $c/a = 0,976$ . Komórka elementarna WC stanowi prosty układ heksagonalny (rys. 3) o uporządkowanej strukturze.

Płaszczyzna przyzmy ( $10\bar{1}0$ ) w sieci krystalicznej charakteryzuje się biegunowością. Może ona bowiem składać się z atomów W lub atomów C, przy czym odległość między powierzchnią węglikową i powierzchnią wolframową ( $10\bar{1}0$ ) przedstawia się periodycznie 0,839 Å i 1,687 Å. Przy tym, w pierwszym przypadku każdy z atomów W ma cztery bliżej obsadzone atomy C, a w drugim przypadku tylko dwa. Faza węglkowa WC charakteryzuje się małą skłonnością do deformacji plastycznej, ze względu na małą liczbę możliwych systemów poślizgu (tab. 2).

Dla różnych sposobów odkształcania mogą tworzyć się różne niejednorodności strukturalne, takie jak pasma przecięcia oraz pasma poślizgu wtórnego. Przy dużych obciążeniach zewnętrznych pasma poślizgu są grube i mogą przechodzić w pasma ścinania. Dodatkowy wpływ na powstanie pęknięć w węglkach spiekanych mają takie czynniki jak: stosowanie aktywnych elektrolitów, gwałtowne zmiany temperatury i nawodorowanie podczas obróbki. Wszystkie te czynniki powodują, że pęknięcia w węglkach spiekanych są generowane przez mechanizm analogiczny do mechanizmu zaproponowanego przez Cottrella dla zarodków pęknięć w metalach o sieci przestrzennej centrowanej [3].

Tablica 2. Płaszczyzny i kierunki poślizgów w Co i WC

Rodzaj struktury materiału	Nazwa płaszczyzny	Płaszczyzna poślizgu	Kierunek poślizgu	Liczba możliwych wariantów poślizgu
Co	bazowa	(0001)	$\langle 1\bar{1}\bar{2}0 \rangle$	3
	pryzmatyczna	(1100)	$\langle 1\bar{1}\bar{2}0 \rangle$	3
	piramidalna	( $10\bar{1}0$ )	$\langle 1\bar{1}\bar{2}0 \rangle$	3
		( $\bar{1}\bar{1}01$ )	$\langle 1\bar{1}\bar{2}0 \rangle$	
		(1011)	$\langle 1\bar{1}\bar{2}0 \rangle$	6
WC	bazowa	(0001)	$\langle 1\bar{1}\bar{2}0 \rangle$	3
	pryzmatyczna	( $10\bar{1}0$ )	$\langle 1\bar{1}\bar{2}0 \rangle$	3
	piramidalna	( $10\bar{1}0$ )	$\langle 1\bar{1}\bar{2}3 \rangle$	4
		(1011)	$\langle 1\bar{1}\bar{2}3 \rangle$	3

W przypadku fazy WC, gdy nastąpi oddziaływanie dyslokacyjne może powstać pęknięcie. Lokalizację takiego pęknięcia na poszczególnych płaszczyznach zapisać można:

a) dla pęknięcia na ( $\bar{1}\bar{2}10$ )

$$\frac{1}{6}[\bar{2}1\bar{1}3] + \frac{1}{6}[\bar{1}1\bar{2}3] = \frac{1}{6}[\bar{1}\bar{2}\bar{1}0] \quad (3)$$

b) dla pęknięcia na ( $10\bar{1}0$ )

$$\frac{1}{6}[\bar{2}\bar{1}13] + \frac{1}{6}[\bar{1}\bar{1}\bar{2}3] = \frac{1}{6}[10\bar{1}0] \quad (4)$$

Dyslokacje te są półutwardzone i można oczekiwać, że pod działaniem przyłożonych naprężeń wystąpi koalescencja dyslokacji krawędziowych, tworzą pęknięcie klinowe.

### 3. POMIARY WSPÓŁCZYNNIKA ODPORNOŚCI NA POWIERZCHNIOWE PĘKANIE

O podatności węglików spiekanych na kruche pęknięcie w danym środowisku informuje wartość współczynnika odporności na kruche pęknięcie  $K_C$  (HV). Znając wartość tego współczynnika można ocenić wytrzymałość tego materiału na kruche pęknięcie

$$R_m = \frac{K_C(HV)}{\sqrt{\pi l}} \quad (5)$$

gdzie:

$l$  - długość powstałej szczeliny.

Pomiary krytycznego współczynnika odporności na powierzchniowe pęknięcie przeprowadzono metodą wciskania penetratora Vickersa w powierzchnię badanego materiału. Jest to metoda oparta na koncepcji Palmqvista [12].

Dokonywano pomiaru długości pęknięć na węgliku spiekany G20 powstałych przy wciskaniu penetratora Vickersa. Penetrator ten miał kształt foremnego czworokątowego ostrosłupa diamentowego o kącie wierzchołkowym  $\beta=136^\circ$ . Stanowiło to podstawę do wyznaczenia odporności na powierzchniowe pęknięcie węglików spiekanych.

Pęknięcia spełniające warunek:  $0,25 \leq l/d \leq 2,5$  i  $e/d > 1,3$  są typowymi pęknięciami Palmqvista [7], gdzie  $l$  - długość pęknięcia,  $d$  - połowa przekątnej odcisku penetratora Vickersa,  $e$  - połowa długości pęknięcia i przekątnej odcisku. Są to pęknięcia o kształcie promieniowym i można do nich zastosować wzór

$$\frac{K_c \phi}{H\sqrt{d}} \left( \frac{H}{E\phi} \right)^{0,4} = 0,035 \left( \frac{1}{d} \right)^{-1/2} \quad (6)$$

w którym:

$K_c$  - współczynnik odporności na powierzchniowe pęknięcie,

$H$  - twardość materiału,

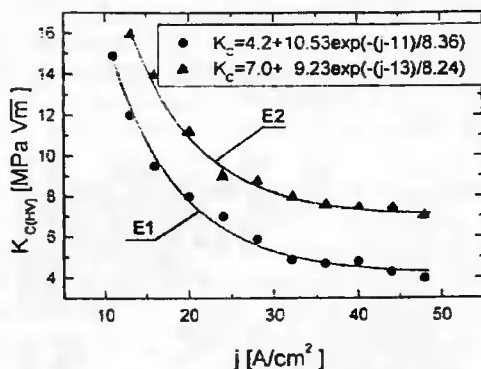
$E$  - moduł sprężystości podłużnej,

$\phi$  - współczynnik związany z własnościami wytrzymałościowymi materiału ( $\phi = 3$ ).

Próbki do badań współczynnika odporności na powierzchniowe pęknięcie były szlifowane elektrochemicznie na szlifierce elektrochemicznej ESCB-40 w środowisku dwóch rodzajów elektrolitów: E1 - elektrolitu aktywnego na bazie NaCl z dodatkami, E2 - elektrolitu pasywnego na bazie NaNO<sub>3</sub> z dodatkami. Stosowano następujące parametry: napięcie międzykatodowe  $U = 2 \div 12$  V, siła docisku materiału obrabianego do ściernicy (katody)  $F_y = 10 \div 60$  N, prędkość ściernicy (katody)  $v_c = 30$  m/s, wydatek elektrolitu  $Q_c = 8$  l/min. Katodą była ściernica diamentowa o wymiarach ziarna 125/100 [14].

Po szlifowaniu elektrochemicznym powierzchnie próbek polerowano na szlifierko-polerce Roto-System firmy Struers pastą diamentową typu DP-A o wielkości ziaren diamentowych 7  $\mu$ m. Zastosowano różne obciążenia penetratora Vickersa:  $F = 490,5$  N,  $F = 981$  N i  $F = 1472$  N.

Z przeprowadzonych pomiarów współczynnika odporności na powierzchniowe pękanie  $K_{C(HV)}$  sporządzono tablice zbiorcze wartości tego współczynnika. Na podstawie tych danych wykonano wykres zależności tego współczynnika od gęstości prądu anodowego dla dwóch różnych elektrolitów (rys. 4).

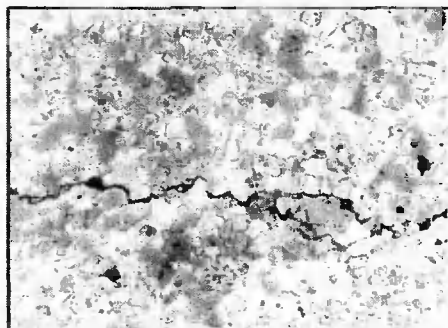


Rys. 4. Zależność współczynnika odporności na powierzchniowe pękanie  $K_{C(HV)}$  od gęstości prądu anodowego dla różnych elektrolitów: E1 – elektrolit aktywny, E2 – elektrolit pasywny

Zwiększenie gęstości prądu anodowego podczas szlifowania elektrochemicznego powoduje zmniejszenie wartości współczynnika  $K_{C(HV)}$ . Łatwiej następuje oddzielenie nadkładu obróbkowego, zwiększa się bowiem fragmentacja fazy węglkowej [9]. Wartości tego współczynnika zmniejszyły się najbardziej w elektrolicie E1.

#### 4. IDENTYFIKACJA PĘKNIĘĆ NA OBROBIONYCH POWIERZCHNIACH WĘGLIKÓW SPIEKANYCH

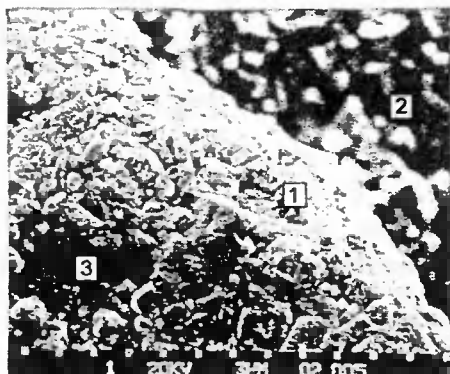
Wykrycie pęknięć na powierzchni obrobionych węglików spiekanych wymagało wykonania zglądów metalograficznych. Na rys. 5 przedstawiono zgląd metalograficzny węgla spiekane G20 po szlifowaniu elektrochemicznym w elektrolicie E1 przy  $U = 12V$ ,  $F_y = 60 N$ ,  $v_c = 30 m/s$  i  $Q_c = 8 l/min$ .



Rys. 5. Mikrostruktura powierzchni węgla spiekane G20 z widocznym wzdłużnym pęknięciem ( $\times 1500$ )

Obserwacja tego zglądu pod mikroskopem stereoskopowym pozwoliła ustalić, że jest to pęknięcie mieszane, tzn. przeważa pęknięcie międzykrystaliczne, lecz występuje także pęknięcie transkrystaliczne – rozdzielcze. Pęknięcie takie przebiega przez ziarna węgla wolframu WC. Znaczny wpływ na nie ma selektywne roztrawianie fazy kobaltowej, o czym świadczy pęknięcie międzykrystaliczne.

Na rysunku 6 pokazano przełom węgla spiekanego G20, który powstał po szlifowaniu elektrochemicznym przy tych samych parametrach, jak na rysunku 5, ale przy polaryzacji katodowej przy  $U = -10$  V.



Rys. 6. Przełom węgla spiekanego G20: 1-przełom mieszany, 2-przełom międzykrystaliczny, 3-pory, tzw. pustki (x3000)

Usuwanie warstwy pasywnej przez ziarna ściernie i odsłanianie nowej powierzchni realnie - czystej, ułatwia wnikanie wodoru atomowego do warstwy powierzchniowej obrabianego węgla.

Po wniknięciu wodoru do tej warstwy i powstaniu mikroszczeliny na jej powierzchniach zachodzi adsorbcja wodoru, co powoduje zmniejszenie energii powierzchniowej. Zjawisko to sprzyja dalszej propagacji pęknięcia, aż do powstania przełomu.

Obserwacja przełomów przy pomocy mikroskopu stereoskopowego potwierdziły wcześniejsze obserwacje na mikroskopie skaningowym. Wykazano, że jest to przełom mieszany (1) i występuje na bocznej ścianie – rysunek 6. W przełomie tym dominuje pęknięcie międzykrystaliczne. Występują też pęknięcia transkrystaliczne, tzw. rozdzielcze, prowadzące do wystąpienia przełomu łupliwego o jasnej i gładkiej powierzchni krystalicznej wzdłuż płaszczyzny poślizgu  $(1\bar{1}00)$ . Na obserwowanym przełomie występuje również struktura włóknista, co świadczy o efekcie łączenia się mikropęknięć w poszczególnych ziarnach. Na dnie tej szczeliny występuje przełom międzykrystaliczny 2 z widocznymi całymi ziarnami fazy WC.

## 5. PODSUMOWANIE

Podczas szlifowania elektrochemicznego węglików spiekanych tworzą się przy niektórych parametrach obróbki warunki prowadzące do powstawania mikropęknięć na obrabianej powierzchni. Może to doprowadzić do wystąpienia dekohezji na powierzch-

ni szlifowanej. Powstawanie pierwszych mikropełnięć (szczelin) jest wynikiem skupienia się swobodnych dyslokacji na przeszkodach. Przeszkodami dla ruchu dyslokacji w węglkach spiekanych są najczęściej różnego rodzaju defekty strukturalne, takie jak: niektóre granice ziarn, przecięcia płaszczyzn poślizgu oraz obce wtrącenia. Istotny wpływ na powstanie dekohezji wywiera selektywne roztworzenie spoiwa kobaltowego i nawodorowanie obrabianego węgla.

Miara odporności na powierzchniowe pęknięcie w węglkach spiekanych może być współczynnik odporności na powierzchniowe pęknięcie  $K_{C(HV)}$ . Wartości tego współczynnika dla węglków spiekanych G20 są większe dla elektrolitu pasywnego (E2) niż aktywnego (E1).

Na powierzchni węglków spiekanych, po szlifowaniu elektrochemicznym mogą tworzyć się pęknięcia prowadzące do powstania przełomów. Zależy to głównie od wartości napięcia międzyelektrodowego i rodzaju stosowanego elektrolitu. Powstające pęknięcia o charakterze międzykrystalicznym spowodowane są głównie selektywnym wytrawianiem fazy kobaltowej. Natomiast tworzenie się pęknięć transkrystalicznych i powstanie przełomów silnie zależy od stopnia nawodorowania.

## LITERATURA

- [1] Baženov F.M., Bojčman G.S., Karpačev G.D.: Tverdye splavy. Metallurgija, Moskva 1978.
- [2] Čerepanov P.G.: Mechanika chrupkogo rozrušenija. Izd. Nauka, Moskva 1974.
- [3] Cottrell A.H.: Dislocations and Plastic Flow in Crystals. Oxford, Clarendon Press, 1963.
- [4] Dąbrowski L.: Podstawy komputerowej symulacji kształtowania elektrochemicznego. Prace Nauk. PW., Mechanika 154, Warszawa 1992.
- [5] Hull D.: Dyslokacje. Warszawa, PWN 1982.
- [6] Kozak I., Marciniak M.: Kierunki zastępowania obróbki wiórowej obróbką ścierną oraz erozyjną. Mechanik 2, 1991.
- [7] Nihara K., Morena R., Hasselman D.P.: Evaluation of  $K_{IC}$  of Brittle Solids by the Indentation Method with low Gack-to-indent Ratios, Journal of Materials Science Letters, No 1, 1982.
- [8] Nott F.D.: Osnovy mechaniki razrušenija. Metallurgija, Moskva 1987.
- [9] Panasyuk V.V.: Mechanika pęknięcia. Podstawy matematyczne i wstęp do badań doświadczalnych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1996.
- [10] Ruszaj A.: Procesy obróbek elektrochemicznej i elektroerozyjnej w różnych odmiannach kinematycznych. PIOS, seria: Zeszyty Naukowe 76, Kraków 1989.
- [11] Slepjan I.L.: Mechanika treščin. Sudostroenie, Leningrad 1990.
- [12] Szutkowska M.: Rola współczynnika intensywności naprężeń krytycznych przy określaniu własności wytrzymałościowych węglków spiekanych. Mechanik 11, 1984.



- [13] Zaborski S.: Stan fizyczny powierzchni z węglików spiekanych G20 po szlifowaniu elektrochemicznym. Prace Nauk. Inst. Technol. i Automat. PWr., 74, Seria: Konferencje 34, Wrocław 1999.
- [14] Zaborski S.: Ściernica do szlifowania elektrochemicznego. Patent RP nr 283082 1992.
- [15] Zaborski S., Żebrowski H.: Fragmentacja węglików spiekanych typu WC-Co podczas obróbki elektrochemiczno-ścierniej. Materiały XXII Naukowej Szkoły Obróbki Ścierniej, Gdańsk-Jurata 1999.

## DECOHESION OF SINTERED CARBIDES IN THE CUTTING ZONE DUE TO ELECTROCHEMICAL AND ABRASIVE MACHINING

### Summary

The present paper reports on crack propagation models in sintered carbides. There were taken measurements of the  $K_{C(HV)}$  coefficient of the sintered carbides resistance to surface cracking both in passive and active electrolytes. The research identified cracks and fractures in sintered carbides due to electrochemical grinding.

Key words: sintered carbides, micro-cracks, material cracking, electrochemical grinding

## STRUKTURA GEOMETRYCZNA POWIERZCHNI W PROCESIE OBRÓBKI ELEKTROCHEMICZNEJ

Maria Zybura-Skrabalak, Adam Ruszaj

Institut Obróbki Skrawaniem,  
Pracownia Obróbki Elektrochemicznej,  
ul. Wrocławska 37a, 30-011 Kraków

Obróbka elektrochemiczna nie wprowadza zmian w warstwie wierzchniej obrabianego przedmiotu. Powierzchnia po obróbce charakteryzuje się stosunkowo małą chropowatością i nie posiada mikropęknięć oraz innych defektów. Może być ona stosowana jako obróbka wykańczająca w operacjach wygładzania i usuwania defektów warstwy wierzchniej. Większa elastyczność wykorzystania tej metody jest w przypadku zastosowania elektrody uniwersalnej. Przemieszczenia elektrody mogą być sterowane w 3 – 5 osiach. W referacie omówiono wyniki badań obróbki uniwersalną prostopadłościenną elektrodą.

*Słowa kluczowe:* obróbka elektrochemiczna, uniwersalna elektroda, struktura geometryczna powierzchni

### 1. WSTĘP

Cechy warstwy wierzchniej, tzn. struktura i właściwości - nadawane jej w wyniku obróbki zależą przede wszystkim od rodzaju zjawisk, w wyniku których usuwany jest naddatek i kształtowana warstwa wierzchnia. Stosowanie różnorodnych obróbek powierzchniowych, które konstituują technologiczną warstwę wierzchnią w obrabianym elemencie staje się coraz bardziej efektywne. Odpowiednio dobrana metoda obróbki wykańczającej umożliwia utworzenie warstwy wierzchniej o wymaganych właściwościach, co zwiększa żywotność i niezawodność obrabianego elementu, a zarazem obniża materiałochłonność.

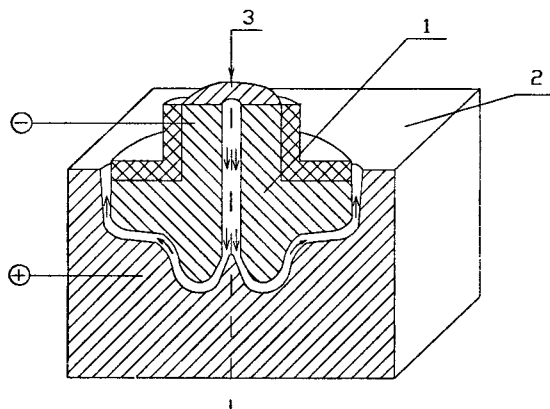
Szczególnie miejsce wśród obróbek wykańczających znajduje obróbka elektrochemiczna. Wynika to z faktu, że nie zmienia ona istotnie struktury, składu chemicznego i nie wprowadza dodatkowych naprężeń do warstwy wierzchniej obrabianego materiału. Umożliwia to efektywne i ekonomiczne wykorzystanie obróbki elektrochemicznej jako obróbki wykańczającej w tych przypadkach, gdy konieczne jest szybkie zmniejszenie chropowatości oraz częściowe lub całkowite usunięcie warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego wstępnie innymi metodami.

Wygładzanie elektrochemiczne może być zastosowane po zgrubnej obróbce elektroerozyjnej lub frezowaniu. Z uwagi na zasadniczo różne zjawiska towarzyszące usuwaniu naddatku obróbkowego w przypadku ECM (roztwarzanie elektrochemiczne) i EDM (parowanie, topienie i rozrywanie materiału w stanie stałym na skutek naprężeń powstających w wyniku gradientu temperatury podczas wyładowań elektrycznych),

otrzymujemy zasadniczo różny stan warstwy wierzchniej przedmiotów obrabianych tymi metodami. W przypadku obróbki EDM stali występują dwie podstawowe grupy zjawisk, kształtujące właściwości warstwy wierzchniej. Są to zjawiska związane z procesami cieplnymi i z nawęglaniem (nie występują w przypadku realizacji procesu w wodzie). Grubość poszczególnych stref warstwy wierzchniej po drażeniu elektroerozyjnym oraz ich właściwości wynikające ze struktury i składu materiału zależą istotnie od parametrów impulsów elektrycznych (energia impulsu, czas impulsu, czas przerwy). Z tego względu, aby uzyskać warstwę wierzchnią o wymaganych właściwościach należy odpowiednio dobierać parametry procesu w czasie obróbki wykańczającej. Tak więc, właściwości warstwy wierzchniej danego wyrobu można zmieniać, usuwając kolejne strefy warstwy wierzchniej ukształtowanej w procesie EDM. W warstwie wierzchniej po obróbce EDM powstają również naprężenia własne.

## 2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Na rysunku 1 przedstawiono schemat drażenia elektrochemicznego.

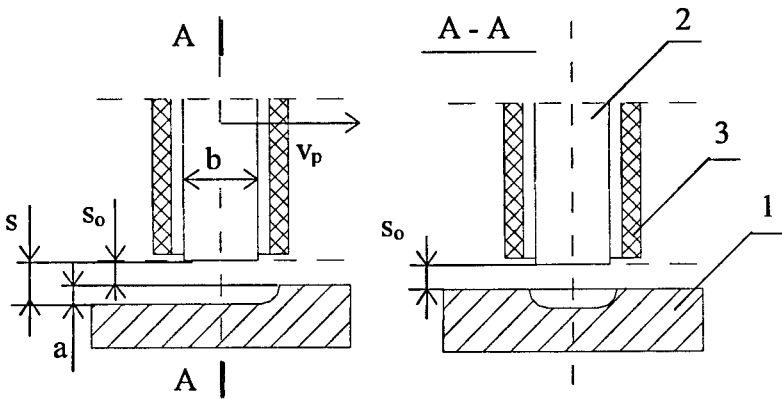


Rys. 1. Schemat drażenia elektrochemicznego: 1 – elektroda robocza, 2 – przedmiot obrabiany, 3 – otwór doprowadzający elektrolit do szczeliny międzyelektrodowej

W klasycznym drażeniu zwykle cały materiał wnętrza roboczej matrycy, kokili czy formy usuwany jest w wyniku procesu odwzorowania kształtu elektrody roboczej w materiale obrabianym. W procesie obróbki etapowi przenoszenia jonów przez granicę rozdziału faz towarzyszy przenoszenie masy. W procesie roztwarzania elektrochemicznego tworzące się produkty reakcji usuwane są od powierzchni elektrody. Etap przenoszenia masy opisuje się trzema mechanizmami - dyfuzji, migracji i konwekcji. Prąd elektryczny przepływa przez szczelinę w wyniku migracji jonów spowodowanej przez siłę pola elektrycznego albo dyfuzję jonów wywołaną przez gradient stężenia jonów. Przepływowi prądu elektrycznego towarzyszy wydzielanie się ciepła Joule'a. Z powodu inercji procesu transportu wzdłuż linii przepływu elektrolitu pojawia się losowy rozkład produktów reakcji roztwarzania (wodoru, wodorotlenków), temperatury elektrolitu i elektrycznej przewodności właściwej. Maksymalna temperatura elektrolitu wynosi



Powierzchnia uniwersalnej elektrody jest znacznie mniejsza od powierzchni obrabianej. Tak więc, obszar, w którym prowadzony jest proces obróbki jest mały. Możliwe jest wówczas prowadzenie procesu roztwarzania w ustalonych warunkach (temperatura, przepływ elektrolitu, stężenie wodoru i produktów roztwarzania itp.), nawet przy obróbce przedmiotów o dużych powierzchniach. Jest to bardzo ważne z punktu widzenia właściwości powierzchni. Należy także podkreślić, że elastyczność procesu obróbki uniwersalną elektrodą jest znacznie większa niż w przypadku klasycznego drażenia, a wydajność obróbki jest znacznie mniejsza. Nie jest to jednak ważne, jeżeli proces obróbki jest wykorzystywany jako operacja obróbki wykańczającej. Należy podkreślić, że i w tym przypadku możliwe jest prowadzenie procesu obróbkowego z większą lokalną gęstością prądu roboczego niż przy drażeniu klasycznym. Dotychczas w literaturze szeroko omawiany jest problem chropowatości powierzchni po drażeniu klasycznym i przy zasilaniu szczeliny międzyelektrodowej prądem impulsowym [4, 7, 8, 11]. Natomiast problem wpływu parametrów procesu obróbki na chropowatość powierzchni obrabianej przy zastosowaniu elektrody uniwersalnej jest rozważany tylko dla niektórych przypadków, głównie z wykorzystaniem elektrody kulistej. Celem badań przedstawionych w tym referacie jest zebranie dodatkowych danych niezbędnych do projektowania procesu technologicznego obróbki z wykorzystaniem uniwersalnych elektrod.



Rys. 3. Schemat obróbki elektrochemicznej z zastosowaniem uniwersalnej prostokątnej elektrody przemieszczanej ponad powierzchnią obrabianą:  $v_p$  – prędkość przesuwu uniwersalnej elektrody, 1 – przedmiot obrabiany, 2 – uniwersalna elektroda, 3 – dysza dostarczająca elektrolit do szczeliny roboczej,  $s_0$  – grubość początkowej szczeliny roboczej,  $s$  – grubość szczeliny roboczej po czasie  $t$ ,  $b$  – wymiar elektrody

Na rysunku 3 przedstawiono schemat procesu obróbki, dla którego prowadzono badania. Uniwersalna prostokątowa elektroda (2) jest przesuwana ponad powierzchnią obrabianą (1). Elektrolit do przestrzeni roboczej dostarczany jest przez specjalne dysze (2). W czasie pojedynczego przejścia elektrody usuwany jest nadatek o grubości  $a$ :

$$a = s - s_0 \quad (1)$$

Czas pojedynczego przejścia elektrody  $t$  jest obliczany według zależności:

$$t = \frac{b}{v_p} \quad (2)$$

Grubość szczeliny międzyelektrodowej  $s$  jest określana według zależności:

$$s = \sqrt{Bt + s_0^2} \quad (3)$$

Z zależności (3) wynika, że grubość szczeliny międzyelektrodowej po pojedynczym przejściu elektrody zmniejsza się, kiedy wzrasta prędkość przesuwu elektrody uniwersalnej ponad powierzchnią obrabianą, albo zmniejsza się wartość  $B$ .

Biorąc pod uwagę zależności (2) i (3), zależność (1) można zapisać w postaci:

$$a = \sqrt{Bt + s_0^2} - s_0 \quad (4)$$

gdzie:

$B = 2\eta k_v \kappa(U - E)$  - stała dla procesu obróbki,

$\eta k_v$  - współczynnik obrabialności elektrochemicznej obrabianego materiału,

$\kappa$  - właściwa przewodność elektryczna elektrolitu,

$U$  - napięcie robocze,

$E$  - spadek potencjału w warstwach przyelektrodowych,

$a$  - grubość nadatku materiału usuwanego w czasie pojedynczego przejścia,

$b$  - długość elektrody,

$s_0$  - grubość początkowej szczeliny międzyelektrodowej,

$s$  - grubość szczeliny międzyelektrodowej po pojedynczym przejściu elektrody,

$t$  - czas obróbki.

Średnią gęstość prądu  $j$  dla obrabianej powierzchni oblicza się na podstawie zależności:

$$j = \kappa \text{grad} U = \frac{\kappa(U - E)}{s_m} \quad (5)$$

gdzie:

$s_m$  - średnia grubość szczeliny międzyelektrodowej:  $0,5(s + s_0)$ .

Z przedstawionych powyżej zależności wynika, że wraz ze wzrostem właściwej przewodności elektrycznej elektrolitu  $\kappa$ , napięcia międzyelektrodowego  $U$  i prędkości przemieszczania się elektrody uniwersalnej  $v_p$  wzrasta średnia gęstość prądu  $j$ , a tym samym powinna zmniejszać się chropowatość powierzchni. Grubość nadatku usuwanego materiału dla wybranych parametrów procesu oblicza się z zależności (4).

W celu sprawdzenia powyższych rozważań przeprowadzono badania doświadczalne.

### 3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

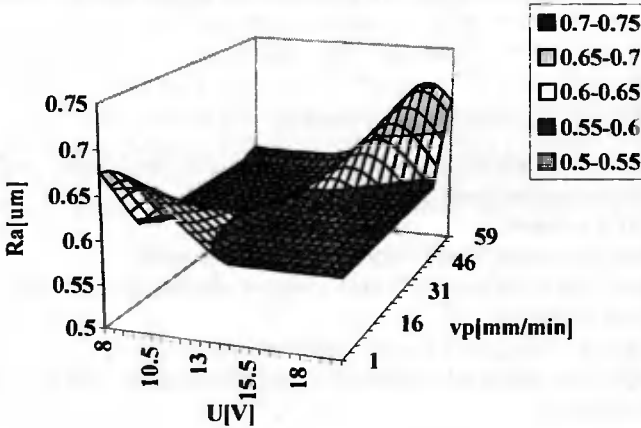
W wyniku analizy zjawisk występujących w szczelinie międzyelektrodowej do badań wybrano następujące czynniki:

**Czynniki badane:**  $v_p$  - prędkość przesuwu elektrody roboczej,  $v_p = 1 \div 59$  mm/min,  $U$  - napięcie międzyelektrodowe,  $U = 8 \div 20$  V,  $T_e$  - temperatura elektrolitu,  $T_e = 20 \div 40$  °C,  $s_0$  - grubość początkowej szczeliny międzyelektrodowej,  $s_0 = 0,1 \div 1,3$  mm

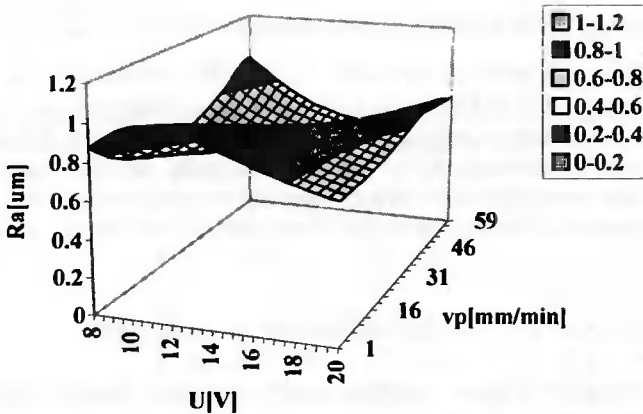
**Czynniki wyników:**  $R_a$ ,  $R_z$  - parametry chropowatości powierzchni,  $a$  - grubość usuwanego materiału w czasie pojedynczego przejścia elektrody,  $j$  - średnia gęstość prądu.  
**Czynniki stałe:**  $p_e$  - ciśnienie wejściowe elektrolitu,  $p_e = 1$  MPa,  $b$  - wymiary elektrody,  $b = 5$  mm, materiał elektrody: miedź Cu, materiał przedmiotu obrabianego: stal NC6,  $C_e$  - stężenie wodnego roztworu  $\text{NaNO}_3$ ,  $C_e = 15\%$ .

Wyniki badań przedstawiono w przypadku stosowania jako funkcji obiektu badań sieci neuronowych, ponieważ dają znacznie mniejsze błędy aproksymacji niż obliczenia wykonane z wykorzystaniem równań regresji.

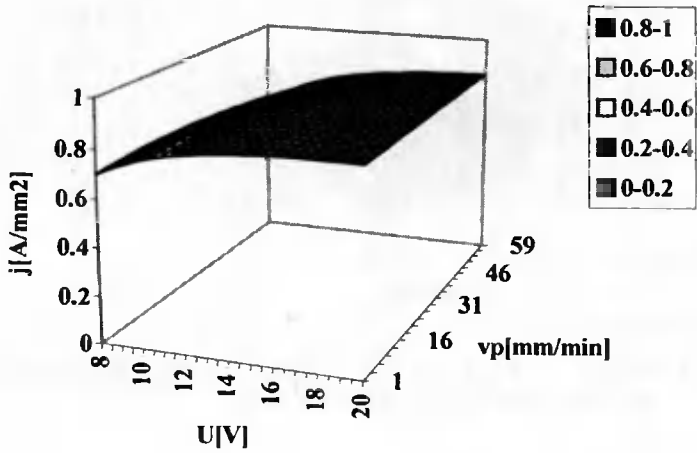
Z analizy wyników badań doświadczalnych wynika, że czynniki badane mają istotny wpływ na wartości czynników wynikowych  $R_a$ , a i j. Wybrane zależności przedstawiono na rysunkach 4 do 9.



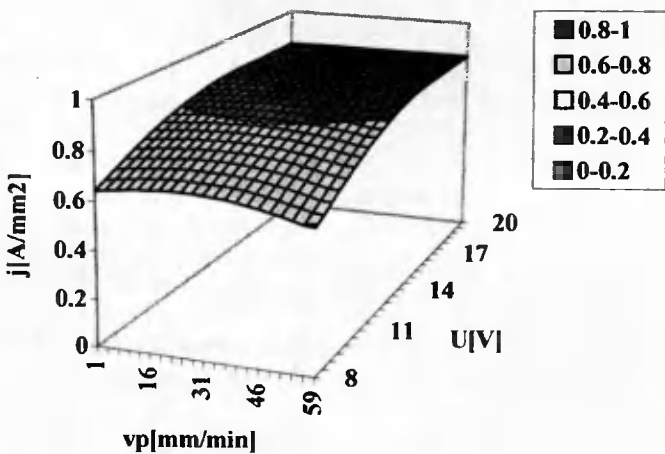
Rys. 4. Zależność  $R_a = f(U, v_p)$  dla:  $T_c = 30$  °C,  $s_o = 0.1$  mm, w przypadku stosowania jako funkcji obiektu badań sieci neuronowej



Rys. 5. Zależność  $R_a = f(U, v_p)$  dla:  $T_c = 40$  °C,  $s_o = 0.1$  mm  $R_a = f(U, v_p)$ , w przypadku stosowania jako funkcji obiektu badań sieci neuronowej

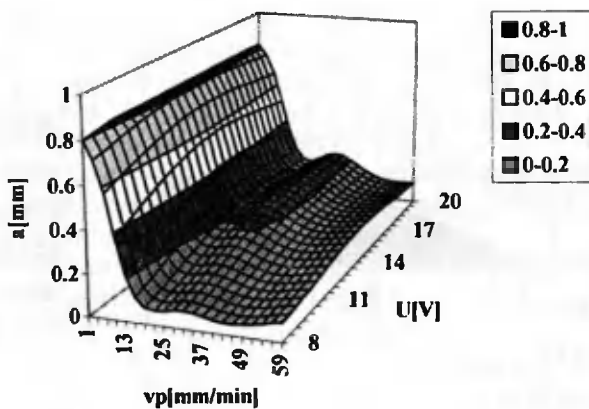


Rys. 6. Zależność  $j = f(U, v_p)$  dla:  $T_c = 30$  °C,  $s_o = 0,1$  mm, w przypadku stosowania jako funkcji obiektu badań sieci neuronowej

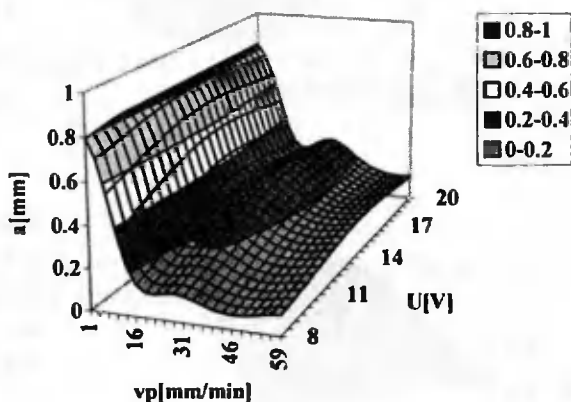


Rys. 7. Zależność  $j = f(U, v_p)$  dla:  $T_c = 40$  °C,  $s_o = 0,1$  mm, w przypadku stosowania jako funkcji obiektu badań sieci neuronowej





Rys. 8. Zależność  $a = f(v_p, U)$  dla:  $T_e = 30\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $s_0 = 0,1\text{ mm}$ , w przypadku stosowania jako funkcji obiektu badań sieci neuronowej



Rys. 9. Zależność  $a = f(v_p, U)$  dla:  $T_e = 40\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $s_0 = 0,1\text{ mm}$ , w przypadku stosowania jako funkcji obiektu badań sieci neuronowej

W rozważanych przypadkach  $R_a$  zmienia się nieznacznie  $R_a = 0,5 \div 1,1\text{ }\mu\text{m}$  (rys. 4 i 5). W przypadku klasycznego drażenia dla różnych parametrów procesu  $R_a = 0,5 \div 10\text{ }\mu\text{m}$  [8].

Na rys. 4 i 5 znajdują się obszary, w których  $R_a$  jest stałe. Znaczny wzrost  $R_a$  występuje tylko w przypadku szczeliny międzyelektrodowej o małej grubości, tj. dla małych wartości  $U$  albo dużych  $v_p$ . Najczęściej jednak w czasie klasycznego drażenia maleje  $R_a$  wraz ze wzrostem gęstości prądu. Z rysunków 4-7 wynika, że nie zawsze tak jest, gdyż dużą rolę odgrywają także warunki hydrodynamiczne. W przypadku, gdy one nie są optymalne nie ma możliwości zmniejszenia  $R_a$  przez wzrost gęstości prądu. W rozważanym przypadku bardzo trudno jest utrzymać optymalne warunki hydrodynamiczne w szczelinie międzyelektrodowej. Dlatego też nie ma prostej zależności pomiędzy wartościami  $j$  a  $R_a$  (rys. 4 do 7).

Z kolei grubość usuwanego naddatku materiału istotnie zależy od parametrów procesu (rys. 8 i 9). Grubość naddatku usuwanego materiału  $a$  zmienia się w zakresie  $0,8 \div 0,1$  mm. Największa grubość usuwanego naddatku materiału jest dla  $v_p \cong 1 \div 20$  mm/min. Z rysunków 4-9 wynika, że nie ma istotnej zależności pomiędzy grubością usuwanego naddatku materiału  $a$  i chropowatością  $R_a$  a średnią gęstością prądu  $j$ . Grubość naddatku usuwanego materiału zależy głównie od czasu obróbki  $t$  (5).

Wyniki przedstawionych badań doświadczalnych pokazały, że możliwe jest wykorzystanie procesu obróbki elektrochemicznej z uniwersalną elektrodą prostopadłościenną, jako obróbki wykańczającej. Należy zaznaczyć, że w tym przypadku warunki obróbki elektrochemicznej są bardziej jednorodne niż w przypadku klasycznego drążenia i nie zależą od wymiarów obrabianej powierzchni.

Różnica obliczonych wartości gęstości prądu  $j$  i grubości usuwanego naddatku  $a$  według zależności (4) (5) i zmierzonych w czasie doświadczeń wynosi  $5 \div 30$  %. Różnice te wynikają z faktu, że nie ma możliwości wprowadzenia do obliczeń rzeczywistych wartości właściwej przewodności elektrycznej elektrolitu  $\kappa$  oraz współczynnika obrabialności elektrochemicznej obrabianego materiału  $\eta_{kv}$ .

#### 4. PODSUMOWANIE

Proces obróbki elektrochemicznej może być stosowany w przypadku, kiedy wymagana jest wysoka jakość warstwy wierzchniej. Możliwe jest to dzięki temu, że w czasie procesu obróbki elektrochemicznej nie są wprowadzone dodatkowe zmiany do warstwy wierzchniej materiału obrabianego. Struktura metalograficzna warstwy wierzchniej jest taka sama jak materiału rodzimego. Powierzchnia obrabiana jest jednorodna i bez mikropęknięć. Proces obróbki elektrochemicznej może być realizowany w następujący sposób:

- klasyczne drążenie (rys. 1) przy zasilaniu szczeliny roboczej prądem stałym,  $R_a = 1 \div 10$   $\mu\text{m}$ .
- drążenie (rys. 1) przy zasilaniu szczeliny roboczej prądem impulsowym,  $R_a = 0,5 \div 1,5$   $\mu\text{m}$ ,
- obróbka z zastosowaniem uniwersalnej płaskiej elektrody,  $R_a = 0,5 \div 1,5$   $\mu\text{m}$ .

W przypadku drążenia klasycznego i przy zasilaniu szczeliny prądem impulsowym konieczne jest przeprowadzenie optymalizacji parametrów procesu obróbki dla każdej stosowanej kształtowej elektrody roboczej. Ten sposób obróbki charakteryzuje się bardzo małą elastycznością, ponieważ dla każdego obrabianego kształtu konieczne jest zaprojektowanie i wykonanie specjalnej elektrody roboczej, a także przeprowadzenie procedury optymalizacji.

Obróbka z wykorzystaniem płaskiej uniwersalnej elektrody charakteryzuje się dużą elastycznością, gdyż ta sama elektroda może być stosowana do obróbki różnych kształtów. Także procedura optymalizacji parametrów procesu jest dużo łatwiejsza. W tym przypadku konieczna jest tylko zmiana programu sterującego. Jednak w przypadku obróbki powierzchni o złożonych kształtach przemieszczanie się elektrody powinno być sterowane w 3 - 5 osiach.

## LITERATURA

- [1] Chetty O.V., Radhakrishnan, V.: „Study on the Influence of Grain Size in Electrochemical Machining”. *Int. Journal of Machine Tool Design and Research*, 21(1981)1.
- [2] Davydov A.D., Kozak J.: *Vysokoskorostnoe elektrochimizheskoje formoobrazovanie*. Izd. Nauka, Moskva 1990.
- [3] Dąbrowski L.: Podstawy komputerowej symulacji kształtowania elektrochemicznego. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika* 154, 1992.
- [4] Kozak J., Davydov A.D.: Dwa osnovnych aspekta problemy povyszenija tocznosti elektrochimizheskoj razmernoj obrabotki pri perechode k impulsnym reżimam. *Elektrochimija*, 19(1983)7.
- [5] König W., Lindenlauf P.: *Surface Generation in Electrochemical Machining*. CIRP, t. 27/1, 1978.
- [6] McGeough J.A.: *Principles of Electrochemical Machining*. Chapman and Hall, London 1974.
- [7] Ruszaj A.: Investigation on the Process of Electrochemical Sinking Taking into Account the Randomness of Phenomena Occurring in the Machining Area. *Wear*, 147(1991)1.
- [8] Ruszaj A.: Procesy obróbek elektrochemicznej i elektroerozyjnej w różnych odmianach kinematycznych. *Prace IOS, seria Zeszyty Naukowe* 76, Kraków 1989.
- [9] Ruszaj A., Czekaj J., Rosiek J., Novak A., Zybura-Skrabalak M.: Investigations on the Process of Electrochemical Sinking with a Shaped Electrode. *Processing of Advanced Materials*, No 3, 1993.
- [10] Ruszaj A., Zybura - Skrabalak M., Chuchro M.: The Unconventional Methods of Curvilinear Surface Machining. *Proceed. of the Thirty - second International MATADOR Conference*, ed. by A. K. Kochhar, UMIST, Manchester, UK 1997.
- [11] Zajdman G.N.: Elektrochimizheskaja razmernaja obrabotka. *Problemy i reszenija. Elektr. Obrab. Mater.* 4, 1991.

## SURFACE GEOMETRICAL STRUCTURE AS A RESULT OF ELECTROCHEMICAL MACHINING

### Summary

The electrochemical machining does not change surface layer properties. The post-machining surface remains relatively smooth and is free from micro-cracks or other defects; such treatment can be applied for finishing; smoothing and removal of surface layer defects. Electrochemical machining with universal electrodes offers a higher flexibility. Electrode manoeuvres can be 3-to-5-axe controlled. The present paper covers the machining with a flat rectangular universal electrode.

Key words: electrochemical machining, universal electrode, surface geometrical structure

ISSN 0208-6395