

Sebastian SKOCZYPIEC<sup>1</sup>  
Adam RUSZAJ<sup>1</sup>  
Marcin GRABOWSKI<sup>1</sup>

## **ELEKTROCHEMICZNA INTENSYFIKACJA PROCESU MIKROSKRAWANIA**

W artykule przedstawiono koncepcję elektrochemicznej intensyfikacji procesu mikroskawania. Wprowadzenie oddziaływań elektrochemicznych w warstwie powierzchniowej przedmiotu obrabianego umożliwia zmniejszenie wytrzymałości oraz twardości usuwanego materiału, co w efekcie powoduje obniżenie sił skrawania i zmniejszenie deformacji narzędzia oraz przedmiotu obrabianego. Prowadzi to do poprawy wskaźników technologicznych obróbki, umożliwiając rozszerzenie operacji mikroobróbki mechanicznej na wykonywanie struktur 3D m.in. operacjami mikrotoczenia, mikrowiercenia czy mikrofrezowania.

### **1. WPROWADZENIE**

Wytwarzanie elementów mikromechanizmów, prototypowych elementów dla Mikro-Elektro-Mechanicznych Systemów (MEMS), oprzyrządowania i narzędzi do mikroskawania, mikro-odlewania i mikro-obróbki plastycznej to bardzo dynamicznie rozwijający się obszar w ubytkowych i przyrostowych metodach wytwarzania. Szczególne miejsce w mikro - technologii zajmuje mikroskawanie oraz metody niekonwencjonalne tj. mikro-obróbka elektrochemiczna (ElectroChemical Micro Machining - ECMM) oraz mikro-obróbka elektroerozyjna (ElectroDischarge Mikro Machining - EDM). Wiąże się to z ich wysoką efektywnością techniczno - ekonomiczną przy wytwarzaniu struktur mikrogeometrycznych w elementach maszyn, MEMS, oprzyrządowania i narzędzi oraz na etapie projektowania i testowania nowych mikrosystemów MEMS (wykonawstwo prototypów przy możliwie małych nakładach finansowych). Bieżące prace koncentrują się przede wszystkim nad rozwojem tych metod w kierunku kształtowania dowolnych struktur trójwymiarowych [2], [6-7], [12-14]. W przypadku metod niekonwencjonalnych, podstawową barierą rozwoju jest niezadowalająca dokładność procesu (mikroobróbka elektrochemiczna) lub niska wydajność procesu (mikroobróbka elektroerozyjna). Z kolei, jednym z podstawowych problemów mikroskawania jest wzrost siły skrawania wraz ze

---

<sup>1</sup> Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, Politechnika Krakowska

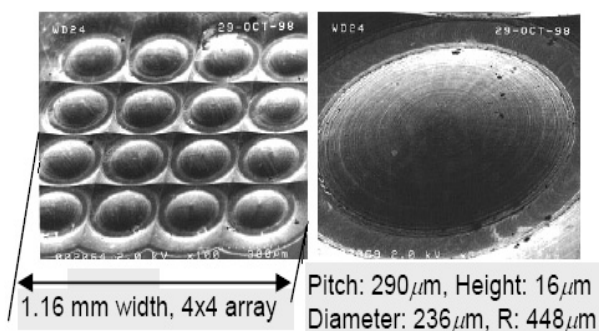
zmniejszeniem rozmiarów przedmiotu obrabianego, tzw. efekt skali, co znacznie utrudnia prowadzenie obróbki elementów o wymiarach  $<50\mu\text{m}$  [14].

Jednym z efektywnych sposobów zmniejszenia sił występujących podczas obróbki skrawaniem jest jednoczesne, tzn. w jednym zabiegu obróbkowym, wprzęgnięcie w strefę oddziaływania na obrabiany materiał różnych lub w różny sposób wytworzonych form energii. Taki sposób obróbki nazywany jest procesem hybrydowym [9]. Przykładem takiego procesu może być stosowana już w przemyśle obróbka skrawaniem wspomagana drganiem ultradźwiękowymi.

W artykule przedstawiona zostanie koncepcja procesu hybrydowego, polegająca na elektrochemicznej intensyfikacji procesu mikroskrawania. Wprowadzenie oddziaływań elektrochemicznych w warstwie powierzchniowej przedmiotu prowadzi do poprawy wskaźników technologicznych obróbki, umożliwiając rozszerzenie operacji mikroobróbki mechanicznej na wykonywanie struktur 3D między innymi operacjami mikrotoczenia, mikrowiercenia czy mikrofrezowania.

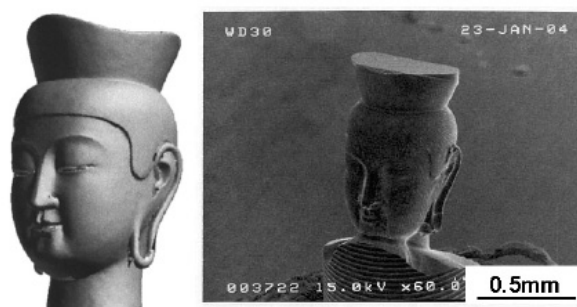
## 2. CHARAKTERYSTYKA PROCESU MIRKOSKRAWANIA

Ze względu na wysoką elastyczność operacje mikroskrawania (rys. 1 i 2) są najczęściej używane do kształtowania skomplikowanych powierzchni trójwymiarowych walcowych (mikrotoczenie) i coraz częściej swobodnych (tzw. free form surfaces - mikrofrezowanie). Jak wcześniej wspomniano, jednym z podstawowych problemów mikroskrawania jest wzrost siły skrawania wraz ze zmniejszeniem grubości usuwanego nadkładu (rys. 3), co ze względu na duże prawdopodobieństwo odkształcenia lub zniszczenia narzędzia oraz przedmiotu, znacznie utrudnia prowadzenie obróbki elementów o wymiarach  $<50\mu\text{m}$ . Dlatego też, mikroskrawanie jest przede wszystkim stosowane do obróbki materiałów nieżelaznych takich jak stopy aluminium, miedzi oraz tworzywa sztuczne przy wykorzystaniu narzędzi z monokrystalicznymi ostrzami diamentu.



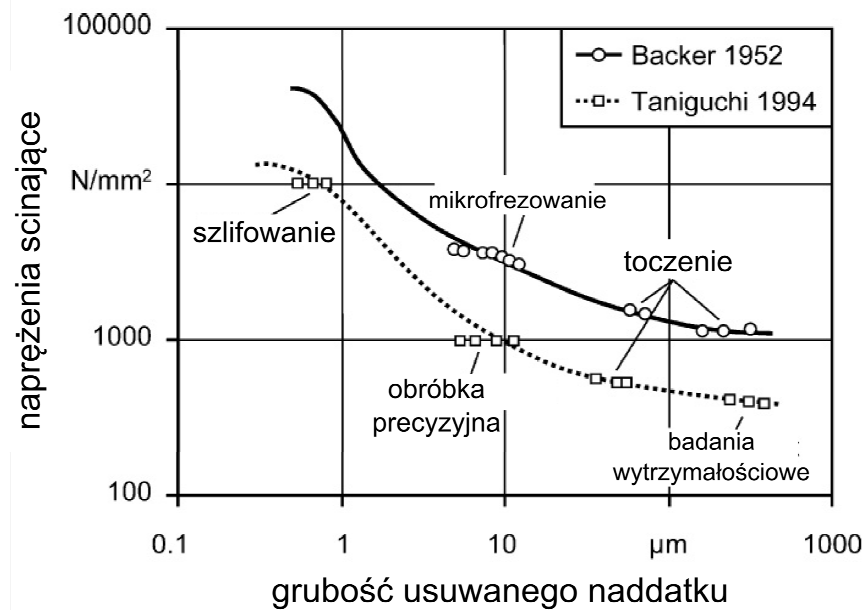
Rys. 1. Przykład zastosowania mikroskrawania do wytwarzania powierzchni swobodnych - matryca soczewek wykonana z krzemu [6]

Fig. 1. Micro-lens array of silicon [6]



Rys. 2. Przykład możliwości 5 osiowego mikrofrezowania [6]

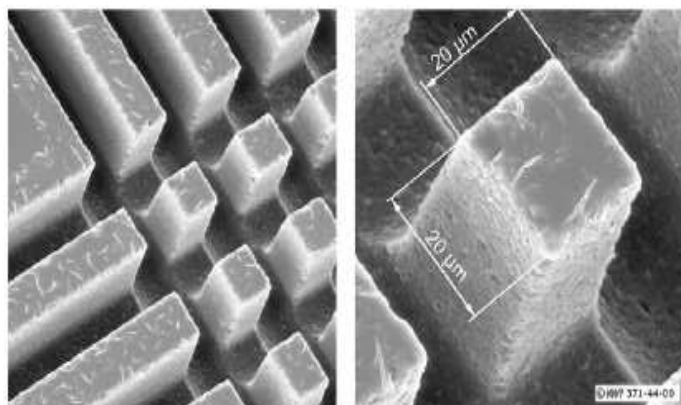
Fig. 2. Creation of a small statue (Mirokubosatsu) by 5- axis control machining [6]



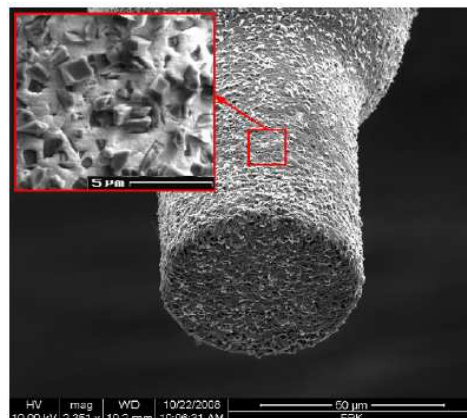
Rys. 3. Zależność oporu skrawania od grubości warstwy skrawanej [14]  
 Fig. 3. Variation of shear stress on shear plane when cutting [14]

Skrawanie narzędziami z geometrycznie zdefiniowanymi ostrzami, jako konwencjonalny i najbardziej rozpowszechniony sposób ubytkowego kształtowania materiałów metalowych i niemetalowych, oferuje duże możliwości aplikacyjne, szczególnie w odniesieniu do wytwarzania mikroform i mikromatryc. Precyzja wytwarzanych masowo mikroelementów powiązana jest z dokładnością i trwałością wytwarzanych narzędzi, dlatego też wymagania co do stosowanych materiałów są zazwyczaj bardzo wysokie. Z drugiej strony, ze względu na powinowactwo chemiczne diamentu do żelaza, zastosowanie narzędzi diamentowych do tych celów jest znacznie ograniczone. Obecnie, w celu rozwiązania tych problemów stosuje się m.in.: intensywne chłodzenie strefy obróbki czy wspomaganie drganiami ultradźwiękowymi [6], [14].

Głównymi metodami mikroskrawania są: mikrotoczenie; mikrofrezowanie, mikrowiercenie, mikroszlifowanie. Mikrotoczenie należy do relatywnie najbardziej rozpowszechnionych i najszerzej zbadanych sposobów mikroobróbki. Mikrotoczeniem produkuje się zwykle elementy o średnicach większych niż  $100\mu\text{m}$ , chociaż możliwe jest także wykonywanie np. mikrowałków miedzianych o średnicy  $<50\mu\text{m}$ . Jako materiału narzędziowego używa się w procesach mikrotoczenia monokrystalicznego diamentu a czasem diamentu naturalnego z promieniami zaokrąglenia rzędu kilkudziesięciu nanometrów i wykonanych z dokładnością rzędu  $\pm 1\mu\text{m}$ . Wytwarzanie mikrowałków czy mikrocopów przy pomocy mikrotoczenia jest procesem bardzo trudnym ze względu na deformację obrabianego przedmiotu. Również w przypadku mikroszlifowania (rys. 4 i 5), gdzie stosuje się ściernice o wymiarach charakterystycznych  $<1\text{mm}$  (np. „tarcze” o średnicy  $100\mu\text{m}$  i grubości  $20\mu\text{m}$  lub ściernice trzpieniowe o średnicach  $<50\mu\text{m}$ ) znaczącym problemem jest zapewnienie powtarzalności i niezawodności procesu [3], [5]. Związane jest to z deformacją i zużyciem narzędzia.



Rys. 4. Przykładowa struktura powierzchni wykonana za pomocą mikroszlifowania [5]  
Fig. 4. Microstructured surface: Ground micro-pillars in silica glass (SQ1) [5]



Rys. 5. Ściernica trzpieniowa o średnicy 45 µm i rozmiarze ziaren ściernych w zakresie 1÷3µm [3]  
Fig. 5. Micro-pencil grinding tools with diameter 45µm and grain size in range 1÷3µm [3]

### 3. KONCEPCJA MIKROSKRAWANIA INTENSYFIKOWANEGO ELEKTROCHEMICZNIE

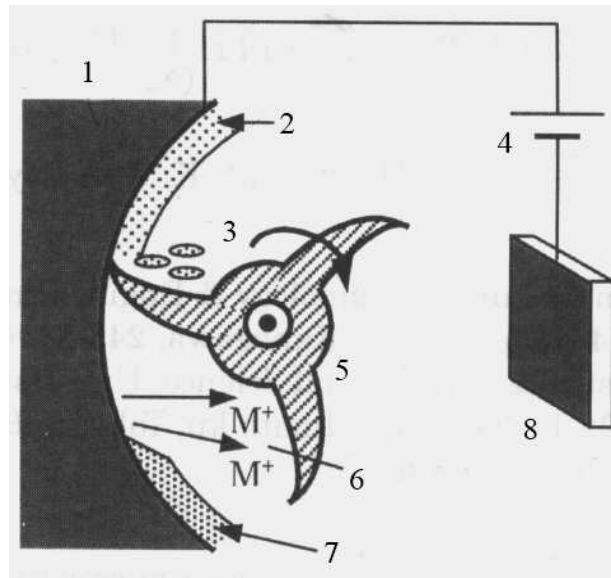
Poprzez stale rozszerzający się zakres zastosowań mikrowyrobów powstało wyraźne zapotrzebowanie na większą różnorodność materiałów kształtowanych mikroskrawaniem. Ze względu na zwiększone zainteresowanie ze strony przemysłu mikroczęściami wykonywanymi z tych materiałów główna uwaga ośrodków badawczych została skierowana w ostatnim czasie na mikroskrawanie stali i ceramiki.

Prowadzi to do ciągłego rozwoju narzędzi do mikroskrawania, ciągłego ich doskonalenia w odniesieniu do ich konstrukcji, jak i wykorzystywanych materiałów, w tym powłok narzędziowych zwiększających efektywność ich pracy. Wiele firm i instytutów badawczych skupiło się również na budowie specjalizowanych ultra-precyzyjnych obrabiarek.

Potencjalną możliwością zmniejszenia sił powstałych podczas procesu skrawania jest zastosowanie wspomaganie elektrochemicznego. koncepcja taka została przedstawiona na rys. 6 [11]. pomiędzy przedmiot obrabiany i katodę dostarczany jest elektrolit. Gdy odpowiednio zostaną dobrane wartości pH elektrolitu i napięcia międzyelektrodowego, na powierzchni metalu tworzy się warstwa pasywna i dalsze utlenianie i roztwarzanie materiału jest zatrzymane. Wytworzona krucha warstwa pasywna o małej wytrzymałości i grubości od kilkudziesięciu do kilkuset nanometrów jest usuwana przez ostrze skrawające. W wyniku uzyskuje się zwiększenie wydajności przy równoczesnym zmniejszeniu sił skrawania, co zabezpiecza miniaturowe narzędzie oraz przedmiot obrabiany przed zniekształceniem czy uszkodzeniem.

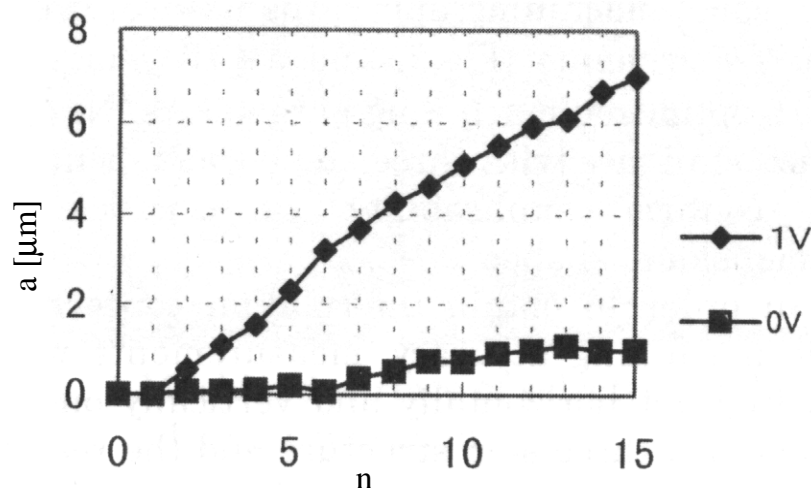
Najpierw, powierzchnię obrabianą polewano elektrolitem i włączano napięcie międzyelektrodowe o wartości 1V w celu wytworzenia na powierzchni obrabianej warstwy pasywnej [11]. Następnie napięcie było wyłączane, a narzędzie o średnicy 100µm skrawało

warstwę spasywowaną powierzchni obrabianej. Gdy siła skrawania osiągała wartość 0.02N, proces skrawania był przerywany, do obszaru obróbki podawany był elektrolit i ponownie włączane było napięcie międzyelektrodowe. Powyższy cykl był powtarzany 15 razy. Wyniki, dla przypadku obróbki z i bez wspomaganie elektrochemicznego zostały przedstawione na rys. 7.



Rys. 6. Schemat obróbki skrawaniem wspomaganym rozpuszczeniem elektrochemicznym: 1 – przedmiot obrabiany (anoda), 2 – warstwa spasywowana, 3 – produkty skrawania, 4 – źródło energii, 5 – narzędzie skrawające, 6 – obszar rozpuszczania, 7 – warstwa powtórnie spasywowana, 8 – katoda [11]

Fig. 6. Scheme of electrochemically assisted microcutting process - 1 – workpiece (anode), 2, 7 – passive layer, 3 – cutting chips, 4 – power supply, 5 – cutting tool, 6 – dissolution region, 8 – cathode [11]

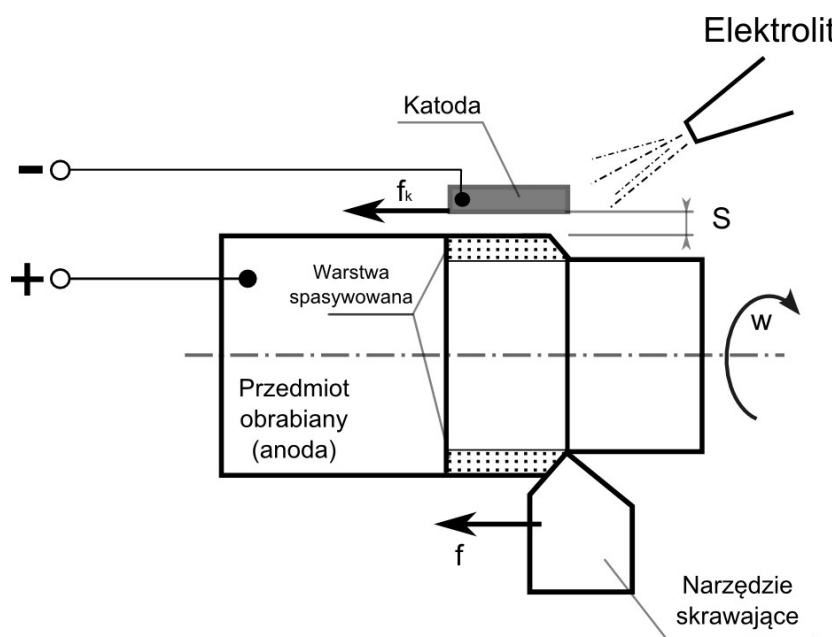


Rys. 7. Zależność grubości usuniętego naddatku „a” od ilości przejść „n” dla przypadku obróbki z i bez rozpuszczania elektrochemicznego [5]

Fig. 7. Relation between thicknesses of removed material „a” and number of cutting layers “n” for machining with and without electrochemical assistance

O wiele korzystniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie wspomaganie elektrochemicznego w procesie mikrotoczenia (rys. 8) – gdzie wprowadzenie intensyfikacji elektrochemicznej nie wymusza prowadzenia procesu w sposób dyskretny.

Na podstawie diagramu Pourbaix (rys. 9), przedstawiającego najbardziej prawdopodobny przebieg kierunku reakcji elektrochemicznej między metalem a elektrolitem, można stwierdzić, że możliwy jest taki dobór warunków reakcji elektrochemicznej - poprzez dobór pH elektrolitu i potencjału anody - aby na powierzchni anody (przedmiotu obrabianego) utworzyła się cienka warstwa trudno rozpuszczalnych i nieprzewodzących prądu elektrycznego tlenków żelaza (najczęściej  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) – tzw. warstwa pasywna.

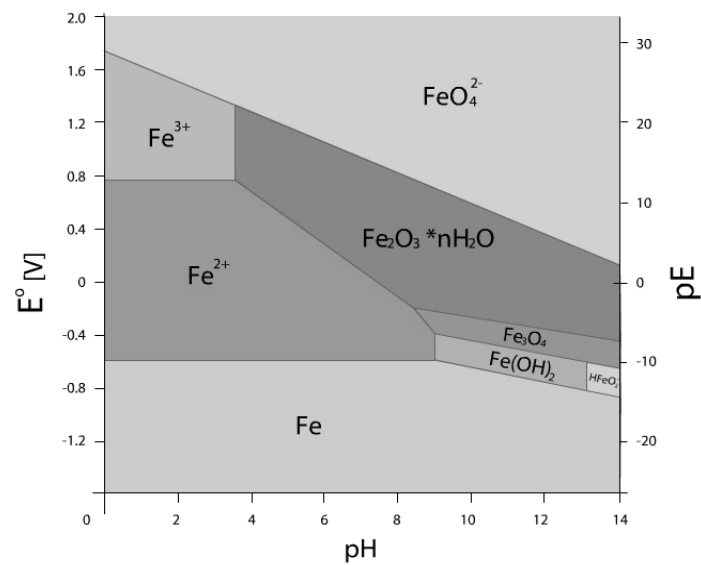


Rys. 8. Schemat mikrotoczenia wspomaganego elektrochemicznie: S – szczelina międzyelektrodowa,  $f$ ,  $f_k$  – posuw narzędzia skrawającego oraz katody ( $f = f_k$ ),  $w$  – prędkość obrotowa

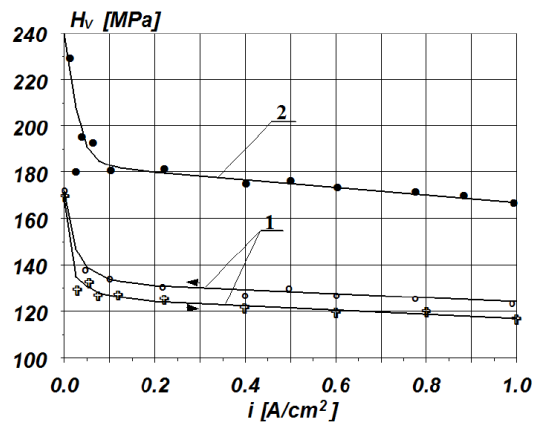
Fig. 8. Scheme of electrochemically assisted microcutting: S – interelectrode gap;  $f$ ,  $f_k$  – cutting tool and cathode feed rate ( $f = f_k$ ),  $w$  – rotational speed

Gdy odpowiednio zostaną dobrane wartości pH elektrolitu i napięcia międzyelektrodowego na powierzchni metalu tworzy się warstwa pasywna, a dalsze utlenianie i roztwarzanie materiału jest zatrzymane. Wytworzona krucha warstwa pasywna o małej wytrzymałości i grubości od kilkudziesięciu do kilkuset nanometrów jest usuwana przez ostrze skrawające. W wyniku uzyskuje się zwiększenie wydajności przy równoczesnym zmniejszeniu sił skrawania, co zabezpiecza miniaturowe narzędzie oraz przedmiot obrabiany przed zniekształceniem czy uszkodzeniem.

Jak wskazują prace przedstawione w [4] wytworzona na przedmiocie obrabianym warstwa pasywna ułatwia odkształcenia plastyczne oraz ma mniejszą od materiału rodzimego wytrzymałość i twardość. Nawet niewielkie wartości gęstości prądu powodują znaczne obniżenie  $Hv$  (rys. 10).



Rys. 9. Diagram Pourbaix dla żelaza [10]  
Fig. 9. Pourbaix diagram for iron [10]



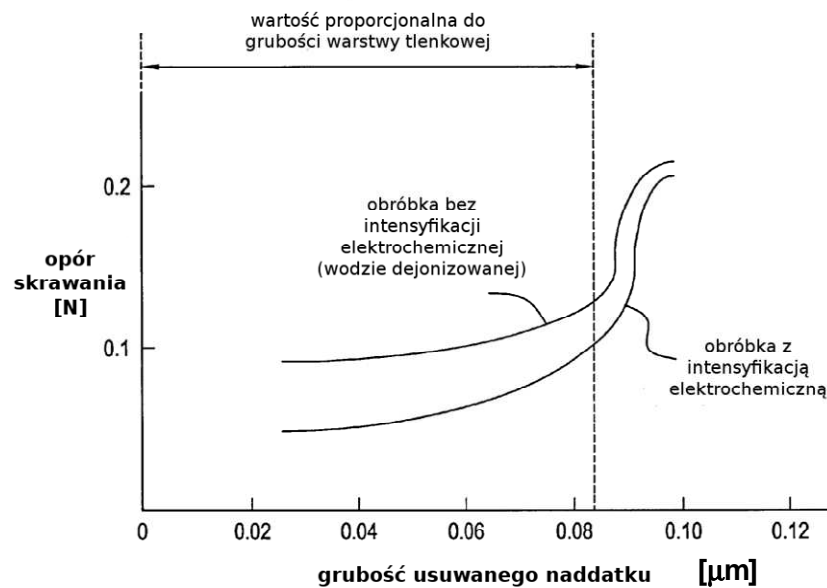
Rys. 10. Wpływ gęstości prądu roztwarzania anodowego na mikrotwardość powierzchni obrabianych materiałów:  
1 - żelazo Armco, 2 - stal 3H13 [8]

Fig. 10. Influence of current density on machined material microhardness: 1 – Armco iron, 2 - 3H13 steel [8]

Przedstawione w [1] badania wskazują, że:

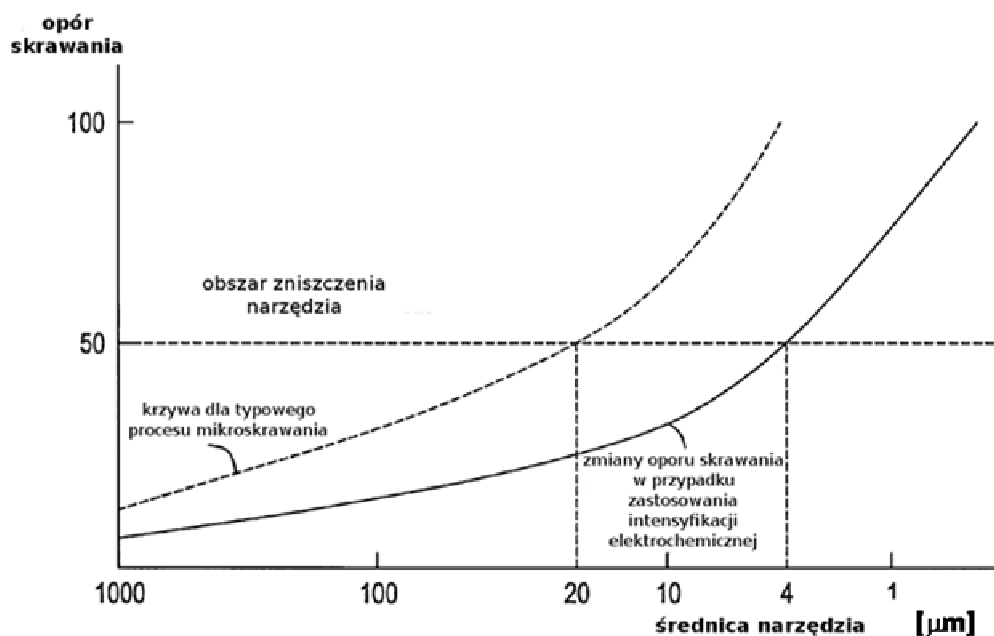
- aby w wyniku intensyfikacji elektrochemicznej uzyskać zmniejszenie sił skrawania grubość warstwy skrawanej w pojedynczym przejściu narzędzia powinna być skorelowana z grubością warstwy pasywnej (rys. 11). Tylko dla takich wartości obserwujemy zmniejszenie sił skrawania (ok. 40%). Dla większej grubości usuwanego nadkładu w pojedynczym przejściu nie występują różnice pomiędzy procesem bez i z zastosowaniem intensyfikacji elektrochemicznej,
- w przypadku mikrofrezowania elektrochemicznego (rys. 12) siły skrawania są odwrotnie proporcjonalne do średnicy narzędzia, co w przypadku procesu bez intensyfikacji elektrochemicznej limituje zastosowanie frezów o średnicach  $d > 20\mu m$ , natomiast zastosowanie intensyfikacji elektrochemicznej poszerza

możliwości mikrofrezowania i pozwala na zastosowanie narzędzi o średnicach  $d \sim 5 \mu\text{m}$ .



Rys. 11. Porównanie zależności pomiędzy grubością usuwanego naddatku i siły skrawania dla obróbki bez i z zastosowaniem intensyfikacji elektrochemicznej (opracowano na podstawie [1]), przedmiot obrabiany: stal, narzędzie wykonane z węgla wolframu.

Fig. 11 Comparison of relation between thickness of removed material and cutting resistance for machining without and with electrochemical assistance [1]



Rys. 12. Porównanie zależności pomiędzy średnicą narzędzia a siłą skrawania dla obróbki bez i z zastosowaniem intensyfikacji elektrochemicznej dla mikrofrezowania elektrochemicznego, przedmiot obrabiany: stal, narzędzie wykonane z węgla wolframu (wykres opracowano na podstawie [1])

Fig. 12. Comparison of relation between tool diameter and cutting resistance for machining without and with electrochemical assistance [1]



Warto podkreślić, że podstawą skutecznej intensyfikacji elektrochemicznej procesu skrawania jest odpowiedni dobór grubości warstwy skrawanej, równej grubości warstwy spasywowanej (tlenkowej) uzyskanej w wyniku oddziaływania elektrochemicznego. Proces prowadzony w ten sposób pozwala na maksymalizację korzyści związanych z intensyfikacją elektrochemiczną skrawania. Z reguły, grubość warstwy spasywowanej jest  $< 1 - 3\mu\text{m}$ , co ogranicza zastosowanie zaproponowanej metody do mikroskrawania, rozumianego jako mechaniczne kształtowanie elementów o wymiarach charakterystycznych  $< 1\text{mm}$ , geometrycznie zdefiniowanym narzędziem. Prowadzenie podobnych badań dla procesu klasycznego skrawania geometrycznie zdefiniowanym narzędziem mija się z celem, ponieważ efekty związane z intensyfikacją elektrochemiczną będą niezauważalne.

#### 4. PODSUMOWANIE

Wprowadzenie oddziaływań elektrochemicznych w warstwie powierzchniowej przedmiotu obrabianego ma na celu zmniejszenie wytrzymałości oraz twardości usuwanego materiału, co w efekcie spowoduje obniżenie sił skrawania i zmniejszy deformację narzędzia oraz przedmiotu obrabianego prowadząc do istotnej poprawy wskaźników technologicznych obróbki jak: zwiększenie dokładności, zwiększenie wydajności i zmniejszenie zużycia narzędzia.

Zastosowanie metody hybrydowej jakim jest wspomaganie elektrochemiczne procesu mikroskrawania do wytwarzania mikroelementów może w znaczny sposób rozszerzyć zakres stosowanych materiałów do ich wytwarzania jak i w pozytywny sposób wpłynąć na właściwości technologiczne otrzymywanych elementów. Należy jednak pamiętać że proces ten w Polsce jest jeszcze w fazie wstępnych badań, a możliwości jakie za sobą niesie mogą sprawić, że będzie tak szeroko stosowany jak procesy skrawania w tradycyjnym wytwarzaniu elementów.

#### LITERATURA

- [1] United States Patent no. 5,967,347, *Micro cutting method and systems*, 1999.
- [2] ABBAS N.M., SOLOMON D.S., BAHARI M.F., 2007, *A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)*, Int. J. of Mach. Tools and Manuf., 47, 1214-1228.
- [3] AURICH J.C., ENGMANN J., SCHUELER G. M., HABERLAND, R., 2009, *Micro grinding tool for manufacture of complex structures in brittle materials*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 58/1, 311-314.
- [4] KIM B.H., RYU S.H., CHOI D.K., CHU C.N., 2005, *Micro electrochemical milling*, J. Micromech. Microeng., 15/1, 124-129.
- [5] BRINKSMEIER E., MUTLUGUNES Y., KLOCKE F, ET AL., 2010, *Ultra-precision grinding*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 59/2, 652-671.
- [6] DORNFELD D., MIN S., TAKEUCHI Y., 2006, *Recent Advances in Mechanical Micromachining*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 55/2, 745-768.
- [7] HO K.H., NEWMAN S.T., 2003, *State of the art electrical discharge machining (EDM)*, Int. J. of Mach. Tools and Manuf., 43/13, 1287-1300.

- [8] KOTLAR M, SZCZERBAK M. V., 1974, *Experimental investigations of abrasive electrochemical grinding*, *Elektronnája Obrabotka Materialov*, 4, 29-32.
- [9] KOZAK, J., OCZOŚ, K.E., 2001, *Selected problems of abrasive hybrid machining*, *Journal of Materials Processing Technology*, 109/3, 360-366.
- [10] MIRANOWICZ N., *Diagram Pourbaix*. Internetowy katalog diagramów, [http://zdch.amu.edu.pl/uniform/upage\\_flist.php](http://zdch.amu.edu.pl/uniform/upage_flist.php).
- [11] NAGATA M., WAKABAYASHI K., YAMADA M., MASUZAWA T., 2000, *Microcutting with Reduced Machining Force by Electrolysis*, *International Journal of Electrical Machining*, 5, January, 51- 58.
- [12] PHAM D.T., DIMOV S.S., BIGOT S., IVANOV A., POPOV K., 2004, *Micro-EDM - recent developments and research issues*, *J. of Mater. Process. Technol.*, 149/1-3, 50-57.
- [13] RAJURKAR K.P., LEVY G., MELSHE A., SUNDRAM M.M., McGEOUGH J., HUA X., RESNICK R., DeSILVA A., 2006, *Micro and Nano Machining by Electro-Physical and Chemical Processes*, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55/2, 643-666.
- [14] VOLLERTSEN F., BIERMANN D., HANSEN H.N., JAWAHIR I.S., KUZMAN K., 2009, *Size effects in manufacturing of metallic components*, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58/2, 566-587.

#### ELECTROCHEMICAL INTENSIFICATION OF MICRO CUTTING PROCESS

In group of methods worked out for machining technological equipment, MEMS parts, functional prototypes and tools for micro-casting and micro-forming special attention is paid for application of microcutting and unconventional processes. The recent development is focused on 3D-shaped surfaces manufacturing. In case of microcutting the main problem during machining is connected with size effect. Significant forces in machining area limit microcutting process application to machine 3D parts made of soft materials and dimensions  $> 50 \mu\text{m}$ . One of effective methods to overcome these problems and achieves high performance for micromachining process is combining various physical and chemical processes into one machining process, defined as hybrid machining. One of the possibilities to decrease cutting forces is to decrease the mechanical properties by workpiece surface layer electrochemical passivation before or during cutting process. Between workpiece and additional electrode the electrolyte is supplied. When electrolyte pH and voltage are properly selected on the workpiece surface the thin oxide layer occurs. This layer is fragile and softer than core material, so can be easily removed with relatively smaller cutting forces, what increases tool life, decrease probability of tool damage, and increase accuracy of shaping by decreasing tool and workpiece deformation.