



Organizator:  
Politechnika Warszawska  
Instytut Techniki Wytwarzania

Przewodniczący:  
Lucjan Dąbrowski  
ld@meil.pw.edu.pl  
http://snoe.meil.pw.edu.pl

Szkoła Naukowa Obróbek Erozyjnych

SNOE

Artykuły naukowe z 2014 r.

Patronat naukowy: SEKCJA PODSTAW TECHNOLOGII KOMITETU BUDOWY MASZYN POLSKIEJ AKADEMII NAUK

## Wspomagany elektrochemicznie proces mikrotoczenia

### Electrochemically assisted microturning process

Marcin Grabowski\*

W artykule przedstawiono koncepcje elektrochemicznie wspomaganego procesu mikrotoczenia. Przeprowadzono badania doświadczalne, w których wyznaczono grubości i właściwości warstw pasywnych. W podsumowaniu przedstawiono uzyskane wyniki oraz ograniczenia procesu.

**SŁOWA KLUCZOWE:** mikrotoczenie, wspomaganie elektrochemiczne, siły skrawania, metody niekonwencjonalne.

*In article the concept of electrochemically assisted micro turning process was presented. The results of passive layer thickness measurement and research of electrochemically assisted micro turning processes were presented. In conclusions the area of application and limitations of the proposed process were described.*

**KEYWORDS:** microturning, electrochemical assisted, cutting force, unconventional methods.

#### Wprowadzenie

Przedstawiony artykuł jest czy fragmentem pracy doktorskiej autora. Wszystkie osoby zainteresowane szerszym poznaniem przedstawionej tematyki odsyłam do literatury [1].

Produkcja mikroelementów to dynamicznie rozwijająca się dziedzina technologii w której podobnie jak w obróbce w skali makro, coraz większe zastosowanie odgrywają nowoczesne materiały (np. superstopy). Ulepszone właściwości mechaniczne, chemiczne czy termiczne nowoczesnych materiałów korzystnie wpływają na właściwości użytkowe, jednakże sprawiają że tradycyjne metody ich obróbki są nieskuteczne lub w niektórych przypadkach niemożliwe do zastosowania. Chcąc efektywnie wytwarzać mikroelementy należy rozwijać

techniki ich wytwarzania poprzez np. wprowadzenie dodatkowych źródeł energii [2]. Szczególne miejsce w mikrotechnologii zajmuje mikroskrawanie (mikrofrezowanie, mikrowiercenie, mikroszlifowanie, mikrotoczenie) oraz metody niekonwencjonalne tj. mikroobróbka laserowa, mikro-obróbka elektrochemiczna oraz mikroobróbka elektroerozyjna [3, 4, 5].

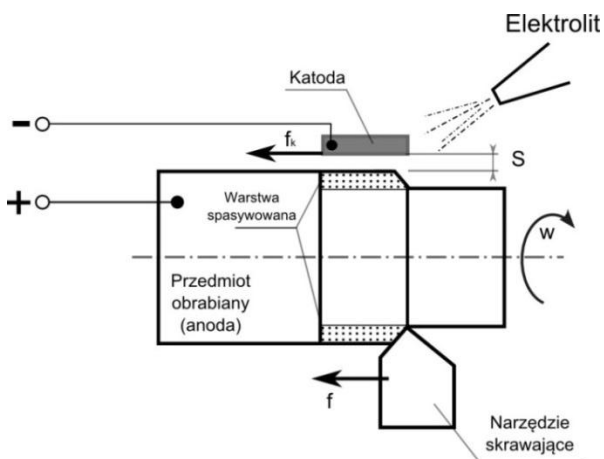
Mikroobróbka skrawaniem należy do najbardziej dynamicznie rozwijającej się metod w produkcji małoseryjnej lub pojedynczych (prototypowych) mikroelementów. Wytwarzanie skrawaniem coraz to mniejszych elementów opiera się na odpowiedniej modyfikacji systemów produkcyjnych. Polegają one na zwiększeniu rozdzielczości obróbki oraz zwiększeniu dokładności obrabiarek i oprzyrządowania technologicznego.

Efekt skali [6] występujący w procesie mikroskrawania stanowi pewne ograniczenia związane z wymiarami możliwych do wytworzenia mikroelementów. W celu zmniejszenia wpływu efektów związanych ze skalowaniem procesu autor zaproponował zastosowanie wspomaganie elektrochemicznego procesu mikrotoczenia.

#### Koncepcja mikrotoczenia wspomaganego elektrochemicznie.

Wspomaganie elektrochemiczne procesu mikrotoczenia polegało na wytworzeniu na przedmiocie obrabianym warstwy pasywnej, a następnie jej usunięciu przez ostrze skrawające. Na podstawie dostępnych w literaturze [7, 8] diagramów Pourbaix, można stwierdzić, że możliwy jest taki dobór warunków reakcji elektrochemicznej – poprzez dobór potencjału anody i pH elektrolitu - aby na powierzchni przedmiotu obrabianego (anody) wytworzyła się cienka warstwa trudno rozpuszczalnych i nieprzewodzących prądu elektrycznego tlenków żelaza (najczęściej  $Fe_2O_3$ ) - tzw. warstwa pasywna. Jak wskazują prace przedstawione w [9] wytworzona na przedmiocie obrabianym warstwa pasywna ułatwia odkształcenia plastyczne oraz ma inne od materiału rodzimego wytrzymałość i twardość.

\*mgr inż. Marcin Grabowski, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji (marcin.grabowski@mech.pk.edu.pl).



Rys. 1. Schemat mikrotoczenia wspomaganego elektrochemicznie: S – szczelina międzyelektrodowa; f,  $f_k$  – posuw narzędzia skrawającego oraz katody ( $f = f_k$ ), w – prędkość obrotowa przedmiotu.

Koncepcja zastosowania wspomaganego elektrochemicznego do zmniejszenia sił skrawania po raz pierwszy została przedstawiona w [10, 11]. W wyniku zastosowania wspomaganego elektrochemicznego nastąpiło zmniejszenie sił skrawania, co przyczyniło się do zabezpieczenia miniaturowego narzędzia oraz przedmiot obrabiany przed odkształceniem czy uszkodzeniem. Zaproponowane rozwiązanie (rys. 1.) pozwala połączyć zalety mikrotoczenia mechanicznego (tj. duża dokładność kształtowymi wymiarami) oraz mikrotoczenia elektrochemicznego (tj. praktycznie brak oddziaływań mechanicznych w strefie obróbki, brak zużycia narzędzia) minimalizując równocześnie wady obu procesów (w mikrotoczeniu konwencjonalnym jest to wzrost właściwej energii skrawania, a w mikrotoczeniu elektrochemicznym stosunkowo niska dokładność). Proces hybrydowy, jakim jest wspomaganie elektrochemicznie procesu mikrotoczenia charakteryzuje się:

- mniejszymi siłami skrawania w stosunku do mikrotoczenia mechanicznego,
- wyższą dokładnością w porównaniu z mikrotoczeniem elektrochemicznym.

Podstawą skutecznego wspomaganego elektrochemicznego procesu mikroskrawania jest odpowiedni dobór grubości warstwy skrawanej, która powinna być równa grubości warstwy spasywowanej (tlenkowej) uzyskanej w wyniku oddziaływania elektrochemicznego. Proces prowadzony w ten sposób pozwala na maksymalizację korzyści związanych z zastosowaniem wspomaganego elektrochemicznego skrawania. Z reguły, grubość warstwy spasywowanej jest  $< 1 \mu\text{m}$ , co ogranicza zastosowanie zaproponowanej metody do mikroskrawania (rozumianego jako mechaniczne kształtowanie elementów o wymiarach charakterystycznych  $< 1 \text{ mm}$  geometrycznie zdefiniowanym narzędziem). W celu prawidłowego przeprowadzenia procesu mikrotoczenia wspomaganego elektrochemicznie konieczne jest przeprowadzenie badań grubości i właściwości wytworzonych warstw pasywnych.

### Określenie grubości i właściwości warstw pasywnych.

W celu określenia grubości i właściwości warstw pasywnych przeprowadzono następujące badania doświadczalne:

- wytworzenie warstw pasywnych,
- określenie grubości warstw pasywnych,
- określenie morfologii wytworzonych warstw pasywnych,
- określenie właściwości mechanicznych wytworzonych warstw pasywnych.

Badania procesu elektrochemicznej pasywacji powierzchni zostały przeprowadzone na próbkach płaskich. Taki kształt próbki wynikał z wymagań związanych z wyborem metody pomiaru grubości warstwy.

Proces pasywacji przebiegał w następujących warunkach:

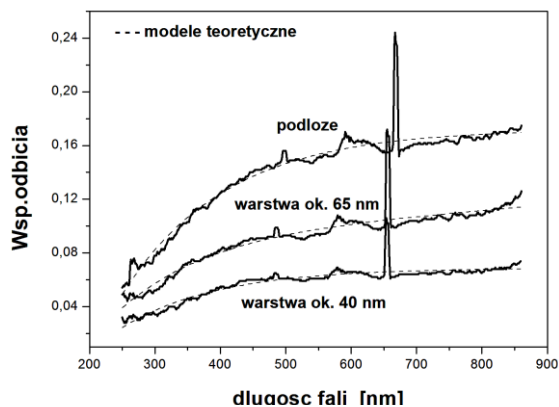
- stężenie elektrolitu:  $\text{NaNO}_3$ : 1%,
- międzyelektrodowe: 1; 3; 5 V,
- czas pasywacji: 1; 3; 5 min,
- materiał obrabiany stal nierdzewna: 0H18N9,
- szczelina międzyelektrodowa:  $S_0 = 250 \mu\text{m}$ ,
- średnica próbki:  $d = 5 \text{ mm}$ .

Tak przygotowane próbki zostały poddane badaniom w których określono grubości i wybrane właściwości wytworzonych warstw pasywnych. Jako powierzchnie odniesienia przyjęto powierzchnie próbek niespasywowanych elektrochemicznie.

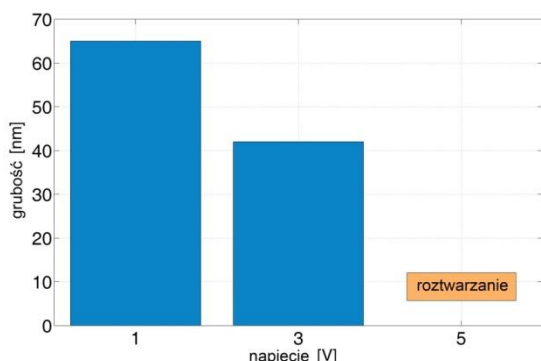
Badania grubości warstw pasywnych wykonano przy użyciu techniki elipsometrii, która wykorzystuje zjawisko zmiany spolaryzowanego liniowo światła na polaryzację eliptyczną w skutek odbicia od cienkich warstw. Stan polaryzacji jest określony przez wzajemną zależność między fazami i amplitudami dwóch fal płaskich, na które można nałożyć drgania wektora pola elektrycznego fali świetlnej.

Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów elipsometrycznych przedstawionych na rys. 2 i rys. 3. można sformułować następujące wnioski:

- przeprowadzone pomiary potwierdziły obecność warstwy pasywnej na powierzchni próbki,
- średnie grubości otrzymywanych warstw dla napięcia międzyelektrodowego  $U = 1 \text{ V}$  i  $U = 3 \text{ V}$  nie przekraczają 100 nm i wynoszą odpowiednio 65 nm i 40 nm,
- dla wartości napięcia międzyelektrodowego  $U = 5 \text{ V}$  nastąpiło roztwarzanie materiału (na powierzchni próbki pojawiły się nadtrawienia i ślady korozji, co wskazuje, że roztwarzanie zachodziło w stanie aktywnym),
- dla przyjętych warunków elektrochemicznych stwierdzono pomijalny wpływ czasu pasywacji na grubość otrzymywanych warstw.

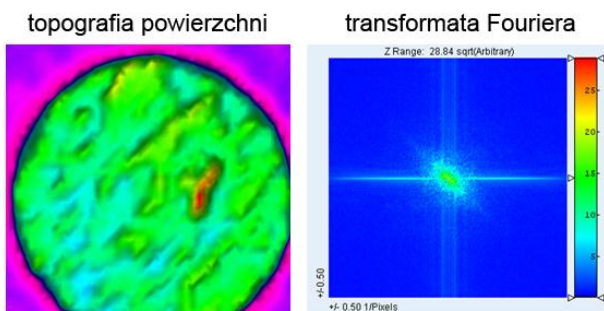


Rys. 2. Zależność współczynnika odbicia światła od długości fali dla próbki referencyjnej i po pasywacji ( $U = 1V$  i  $U = 3V$ ).

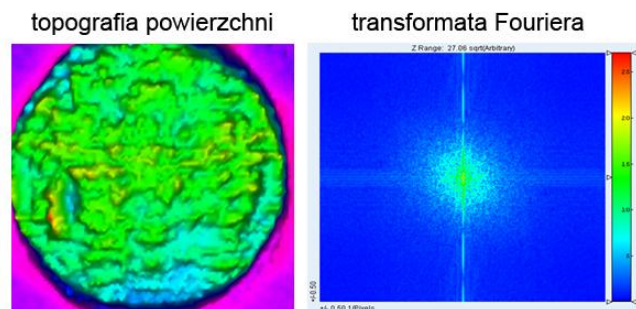


Rys. 3. Grubości otrzymanych warstw pasywnych w funkcji napięcia międzyelektrodowego.

W dalszym etapie badań przeprowadzono analizę topografii powierzchni dla próbek przed i po pasywacji. Otrzymane wyniki skanowania profilometrem optycznym przedstawione zostały na rys. 4 i rys. 5. Analiza wyników wskazuje, że próbki referencyjne posiadają bardzo dużą anizotropowość powierzchni wynikającą z procesu szlifowania (przygotowanie próbki), natomiast proces pasywacji zmienia charakter powierzchni na izotropową.



Rys. 4. Mapa hipsometryczna oraz rozkład wierzchołków chropowatości powierzchni dla próbki niepasywowanej.



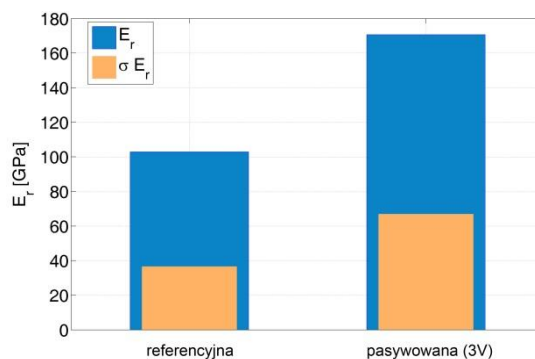
Rys. 5. Mapa hipsometryczna oraz rozkład wierzchołków chropowatości powierzchni dla próbki po pasywacji,  $U = 3V$ .

W dalszej kolejności określano właściwości mechaniczne otrzymanych warstw pasywnych. W tym celu dokonano porównania mikrotwardości i zredukowanego modułu Younga dla próbek referencyjnych i próbek spasywowanych. Testy wykonano dla następujących wartości obciążenia wgłębnika:

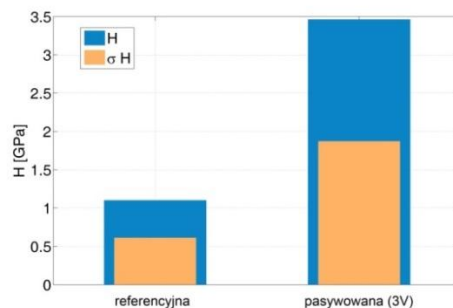
- $P_{max} = 10\text{ mN}$ ,
- $P_{max} = 100\text{ mN}$ .

Każdy z pomiarów powtórzono kilkadziesiąt razy. Twardość i zredukowany moduł Younga zostały obliczone zgodnie z metodyką przedstawioną w [12, 13]. Celem wykonanych badań było potwierdzenie słuszności stosowania wspomaganie elektrochemicznego obróbki mikroskrawaniem w celu zmiany właściwości mechanicznych warstwy skrawanej.

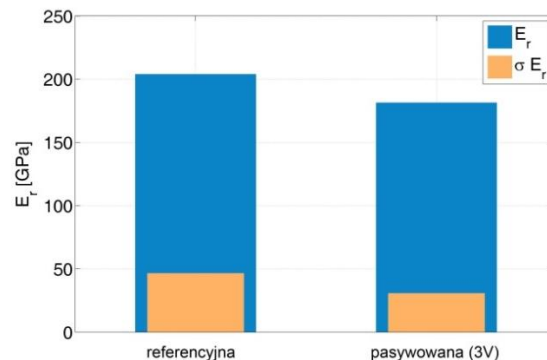
Otrzymane zależności średnich wartości zredukowanego modułu Younga  $E_r$  i mikrotwardości  $H$  zostały przedstawione na rys. 6 - 9.



Rys. 6. Porównanie średnich wartości  $E_r$  dla próbki spasywowanej i referencyjnej przy obciążeniu  $P_{max} = 10\text{ mN}$ .



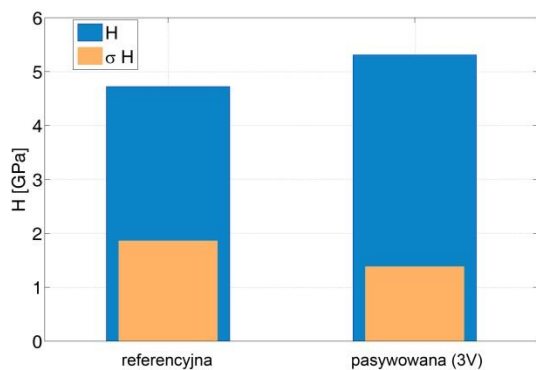
Rys. 7. Porównanie średnich wartości  $H$  dla próbki spasywowanej i referencyjnej przy obciążeniu  $P_{max} = 10\text{ mN}$ .



Rys. 8. Porównanie średnich wartości  $E_r$  dla próbki spasywowanej i referencyjnej przy obciążeniu  $P_{max} = 100\text{ mN}$ .

Na podstawie otrzymanych wyników można sformułować następujące wnioski:

- istnieje istotna statystycznie różnica właściwości mechanicznych pomiędzy badanymi próbkami, w szczególności dla obciążenia maksymalnego  $P_{\max} = 10 \text{ mN}$ ,
- większa twardość  $H$  oraz wyższy zredukowany moduł Younga  $E_r$  dla  $P_{\max} = 10 \text{ mN}$ , wskazują, że wytworzona warstwa pasywna jest twardsza i sztywniejsza niż materiał rodzimy,
- dla  $P_{\max} = 100 \text{ mN}$  różnice w otrzymanych wynikach nie są tak wyraźne. Biorąc pod uwagę otrzymane w wyniku pomiarów elipsometrycznych grubości warstwy ( $\approx 65 \text{ nm}$ ) można stwierdzić, że dla zadanego poziomu obciążenia warstwa pasywna nie ma wpływu na właściwości mechaniczne.



Rys. 9. Porównanie średnich wartości  $H$  dla próbki spasywowanej i referencyjnej przy obciążeniu  $P_{\max} = 100 \text{ mN}$ .

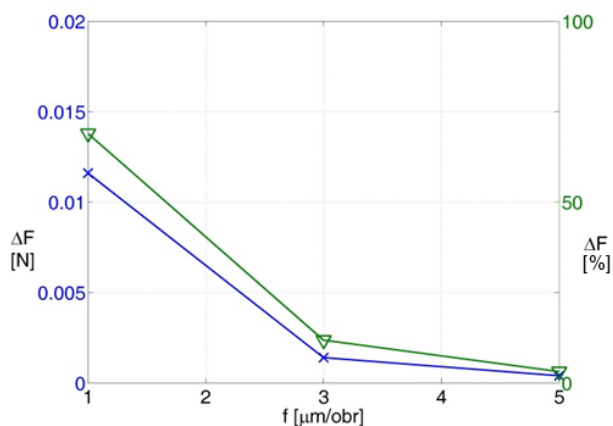
Przedstawione wyniki badań grubości oraz wybranych właściwości wytworzonych warstw pasywnych wskazują słusność przyjętej koncepcji. Różnice pomiędzy twardością i zredukowanym modułem Younga wskazują, że warstwa spasywowana jest twardsza niż materiał rodzimy. Natomiast określenie grubości warstwy umożliwiło wskazanie potencjalnych głębokości skrawania.

## BADANIA MIKROTOCZENIA WSPOMAGANEGO ELEKTROCHEMICZNE

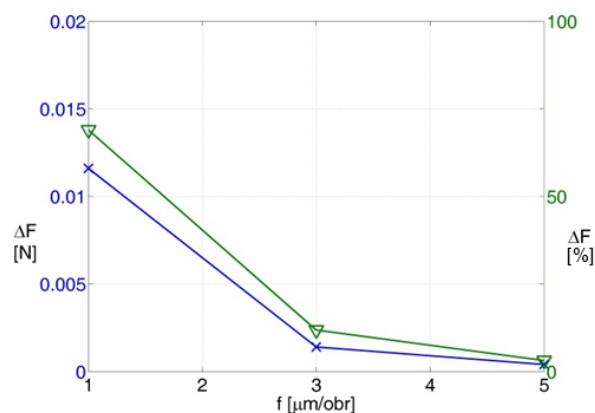
Celem przeprowadzonych badań było doświadczalne potwierdzenie skuteczności zastosowania wspomaganie elektrochemicznego w procesie obróbki mikroskrawaniem. Badania przeprowadzono w kinematyce mikrotożnienia wzdłużnego. Wspomaganie elektrochemiczne procesu mikrotożnienia polegało na wytworzeniu na powierzchni przedmiotu warstwy pasywnej. W trakcie procesu wartość napięcia międzyelektrodowego  $U = 3 \text{ V}$ , grubość szczeliny międzyelektrodowej  $S_0 = 0,25 \text{ mm}$ . Badania przeprowadzono zgodnie z metodyką planowania eksperymentu dla następujących czynników wejściowych tj. głębokość skrawania  $a_p = 1 \text{ }\mu\text{m}$ , prędkość skrawania  $v_c$  (zakres zmienności: 40 – 120 m/min), posuw  $f$  (zakres zmienności: 1 – 5  $\mu\text{m/obr}$ ). Każda próba obejmowała dwie sekwencje, mianowicie usunięcie 10 warstw materiału bez wspomaganie elektrochemicznego, a następnie usunięcie 10 warstw materiału ze wspomaganie elektrochemicznym. Dla każdej próby stosowano nowe ostrze skrawające. Jako czynnik wyjściowy przyjęto różnicę pomiędzy wartościami średniej siły dla procesu, który przebiegał bez i ze wspomaganie elektrochemicznym ( $\Delta F$ ). Należy tutaj

podkreślić, że w ramach prowadzonych badań skupiono się na pomiarze różnicy sił, a nie ich dokładnych wartościach.

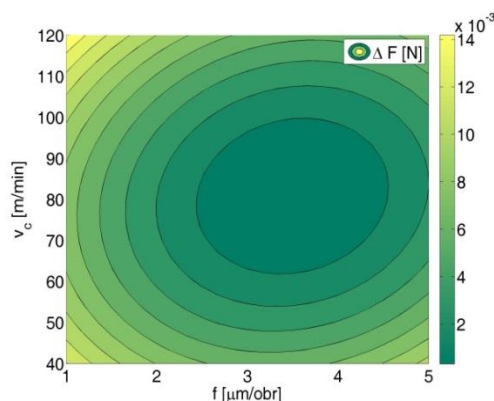
W wyniku przeprowadzonych badań procesu mikrotożnienia wspomaganego elektrochemicznie potwierdzono słusność stosowania wspomaganie w celu zmniejszenia sił skrawania. Zależności względnego ( $\Delta F[\%]$ ) i bezwzględnego ( $\Delta F[\text{N}]$ ) spadku średniej siły skrawania zostały przedstawione na rys. 10 i rys. 11. Zakres badanych parametrów, w którym wspomaganie elektrochemiczne przyniosło najwięcej korzyści przejawiającej się największym spadkiem sił skrawania przedstawiono za pomocą mapy konturowej rys. 12.



Rys. 10. Spadek (względny i bezwzględny) średniej siły skrawania w zależności od posuwu  $f$ ; parametry skrawania:  $a_p = 1 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $v_c = 80 \text{ m/min}$ .



Rys. 11. Spadek (względny i bezwzględny) średniej siły skrawania w zależności od prędkości skrawania  $v_c$ ; parametry skrawania:  $a_p = 1 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $f = 3 \text{ }\mu\text{m/obr}$ .



Rys. 12. Wykres konturowy przedstawiający spadek sił w procesie

mikrotoczenia wspomaganego elektrochemicznie.

Dla badanych parametrów wspomaganie elektrochemiczne przyniosło najwięcej korzyści gdy  $f = 1 \mu\text{m}/\text{obr}$ ; wraz ze wzrostem posuwu  $f$  wpływ wspomaganie staje się nieistotny ( $\Delta F$  jest na poziomie błędów pomiaru siły). Mniejszy posuw to mniejsze grubości warstwy skrawanej i związany z tym wzrost siły skrawania (dla  $f = 1 \mu\text{m}/\text{obr}$   $F = 0,0168 \text{ N}$ , a dla  $f = 5 \mu\text{m}/\text{obr}$   $F = 0,0128 \text{ N}$ ) oraz znacznie dłuższy czas pracy narzędzia. Można na tej podstawie wnioskować, że wspomaganie elektrochemiczne poprawia warunki skrawania w sytuacji gdy grubości usuwanych warstw są bliskie grubości warstwy pasywnej (niestety z powodu braku odpowiedniego narzędzia nie udało się przeprowadzić badań dla grubości skrawania  $< 1 \mu\text{m}$ ). W funkcji prędkości skrawania spadek siły  $\Delta F$  najbardziej zauważalny jest dla prędkości skrawania  $v_c = 40 \text{ m}/\text{min}$  i  $v_c = 120 \text{ m}/\text{min}$ . Prędkość skrawania wpływa na zużycia narzędzia skrawającego oraz zjawiska powstawania narostu. Narost przede wszystkim powstaje podczas obróbki materiałów plastycznych. Proces mikrotoczenia prowadzony dla głębokości skrawania  $a_p = 1 \mu\text{m}$  jest na granicy minimalnej grubości warstwy skrawanej, w której podczas usuwania materiału dominującą rolę odgrywają odkształcenia plastyczne. Dla przyjętych wartości prędkości skrawania wspomaganie elektrochemiczne poprawia warunki skrawania, zmniejsza wpływ odkształceń plastycznych, a co za tym idzie zmniejsza się narost na ostrzu skrawającym.

### Podsumowanie

Przeprowadzone badania doświadczalne potwierdziły przyjętą hipotezę o korzystnym wpływie wspomaganie elektrochemicznego procesu mikrotoczenia. Dla badanych zakresów parametrów wejściowych wspomaganie elektrochemiczne powoduje spadek średniej siły od kilkunastu do kilku mN, co w odniesieniu do wartości siły wynosi od kilku do kilkudziesięciu %. Korzystny wpływ wspomaganie elektrochemicznego potwierdziły również przeprowadzone badania właściwości warstw pasywnych, które wykazały, że wytworzona warstwa pasywna jest twardsza niż materiał rodzimy. Wzrost mikrotwardości warstw pasywnych może sugerować, że jest ona bardziej krucha, pozytywnie wpływając na poprawę warunków mikroskrawania.

Proces mikrotoczenia wspomaganie elektrochemicznie ze względu na swoją specyfikę (grubości usuwanego naddatku) wymaga, aby w trakcie projektowania stanowiska zostały uwzględnione wymagania związane z odpowiednią dokładnością pozycjonowania, rozdzielczością ruchów i stabilnością temperaturową. Dodatkowo, ze względu na wprowadzenie oddziaływań elektrochemicznych w strefę obróbki należy w konstrukcji obrabiarki uwzględnić dwa dodatkowe zespoły, czyli układu obiegu elektrolitu oraz układu zasilania.

### Literatura

- Grabowski M., Wspomaganie elektrochemicznie proces toczenia mikroelementów. Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2015.
- Skoczypiec S., Research on ultrasonically assisted electrochemical machining process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 52, Issue 5-8, pp 565-574, 2011.
- Skoczypiec S., Ruszaj A., A sequential electrochemical-electrodischarge process for micropart manufacturing. Precision Engineering, Volume 38, Issue 3, Pages 680-690, 2014.
- Rajurkar K.P., Levy G., Malshe A., Sundaram M.M., McGeough J., Hu X., Resnick R., DeSilva A., Micro and nano machining by electro-physical and chemical processes. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 55(2): 643 – 666, 2006.
- Abbas N. M., Solomon D. S., Bahari M. F., A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). International journal of machine tools & manufacture, 47:1214-1228, 2007.
- Vollertsen F., Biermann D., Hansen H.N., Jawahir I.S., Kuzman K., Size effects in manufacturing of metallic components. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 58(2):566 – 587, 2009.
- Beverkog B., Puigdomenech I., Revised pourbaix diagrams for iron at 25-300 °C. Corrosion Science Volume 38, Issue 12, Pages 2121-2135, 1996.
- Refait P., Génin J. M. R., The oxidation of ferrous hydroxide in chloride-containing aqueous media and pourbaix diagrams of green rust one. Corrosion Science Volume 34, Issue 5, Pages 797-819, 1993.
- Kotlar M., Szczerbak M. V., Experimental investigations of abrasive electrochemical grinding. Elektronna Obrabotka Materialov, 4:29-32, 1974.
- Patent, United States. No. 5,967,347: Micro cutting method and systems. 1999.
- Nagata M., Wakabayashi K., Yamada M., Masuzawa T., Microcutting with Reduced Machining Force by Electrolysis. International Journal of Electrical Machining, No 5, p. 51 – 58, 2000.
- Doerner M. F., Nix W. D., A method for interpreting the data from depth-sensing indentation instruments. Journal of Materials Research, 1(4):601-609, 1986.
- Oliver W. C., Pharr G. M., An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. Journal of Materials Research, 7:1564-1583, 1992.