

XII Międzynarodowa Konferencja - Electromachining 2015



UNIwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Inżynierii Produkcji
STOWARZYSZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
MECHANIKÓW POLSKICH – Koło Uczelniane UTP

85-789 Bydgoszcz, ul. Kaliskiego 7
tel. (0 52) 340-87-47, fax. (0 52) 340-82-45,
e-mail: tomasz.paczkowski@utp.edu.pl

Wpływ wspomaganie elektrochemicznego na siły w procesie mikrotoczenia

Influence of electrochemical assistance on the cutting forces in microturning process

MARCIN GRABOWSKI¹
SEBASTIAN SKOCZYPIEC²

W artykule przedstawiono koncepcję wspomaganie elektrochemicznego procesu mikrotoczenia. Na zaprojektowanym specjalistycznym stanowisku badawczym przeprowadzono weryfikację doświadczalną zaproponowanej metody obróbki hybrydowej. Otrzymane wyniki potwierdziły korzystny wpływ wspomaganie elektrochemicznego na zmniejszenie sił oraz zużycie narzędzia skrawającego w procesie mikrotoczenia wzdłużnego.

SŁOWA KLUCZOWE: obróbka hybrydowa, mikrotoczenie, wspomaganie elektrochemiczne, siły skrawania.

In the paper the conception of electrochemically assisted microturning process was presented. On the designed specialized test stand the experimental verification of this hybrid machining process was carried out. The results confirm that in case of straight turning electrochemical assistance has positive effect on cutting forces and tool wear.

KEYWORDS: hybrid machining, microturning, electrochemical assistance, cutting forces.

Wprowadzenie

Wzrost zapotrzebowania na przedmioty zminiaturyzowane, których przynajmniej jeden z charakterystycznych wymiarów jest < 1 mm powoduje, że tradycyjne metody ich wytwarzania są bardzo często nieskuteczne lub nieopłacalne. Dodatkowo rozwój inżynierii materiałowej sprawił, że dysponuje się obecnie materiałami posiadającymi podwyższone właściwości mechaniczne, co znacznie utrudnia, a w niektórych przypadkach uniemożliwia efektywne ich

kształtowanie. Jedną z możliwości efektywnego kształtowania mikroelementów jest zastosowanie tzw. obróbki hybrydowej. Z punktu widzenia możliwości obróbki oraz jej wydajności zastosowanie naprzemiennie lub w tym samym czasie różnych form energii staje się uzasadnione ekonomicznie. Dzięki synergii dwóch różnych źródeł energii uzyskujemy większe korzyści podczas obróbki niż gdybyśmy zastosowali każdą z nich z osobna. Zastosowanie obróbki hybrydowej pozwala uzyskać lepszą dokładność kształtowymi wymiarową, jakość uzyskiwanych powierzchni czy mniejsze zużycie narzędzia jednocześnie eliminując działania niekorzystnych efektów ubocznych występującej w każdej z obróbek z osobna. Jako przykład najczęściej wprowadzanych źródeł wspomagających proces można zaliczyć: promieniowanie laserowe, drgania ultradźwiękowe, ścierniwa czy roztwarzanie chemiczne [1]. Przedstawiony artykuł porusza problemy wytwarzania mikroelementów (mikrowałków) w kinematyce toczenia wzdłużnego jak również przedstawia wyniki zastosowania wspomaganie elektrochemicznego do poprawy warunków skrawania.

Charakterystyka procesu mikrotoczenia

Ostatnie dziesięciolecie charakteryzują się bardzo dynamicznym rozwojem mikrotechnologii w aspekcie dokładności jak również różnorodności stosowanych materiałów. Obecnie dominującym procesem w wytwarzania mikroelementów dla potrzeb sektora MEMS są metody wykorzystywane do produkcji układów scalonych takie jak litografia czy trawienie bazujące na materiałach krzemowych i jego pochodnych. Należy zauważyć, że otrzymane tymi metodami struktury mają często bardzo niski współczynnik kształtu, a opłacalność tych metod następuje dopiero przy produkcji wielkoseryjnej, co wyklucza je z możliwości stosowania w produkcji małoseryjnej lub pojedynczych elementów. Z drugiej strony postęp w technologii obrabiarek konwencjonalnych szczególnie w zakresie bardzo precyzyjnych

¹mgr inż. Marcin Grabowski (marcin.grabowski@mech.pk.edu.pl)

²dr hab. inż. Sebastian Skoczypiec (skoczypiec@mech.pk.edu.pl)

maszyn CNC pozwalających wytwarzać bardzo małe elementy z dużą dokładnością sprawił, że te dobrze znane metody są z powodzeniem stosowane do wytwarzania mikroelementów.

Obecnie mikrotoczenie jest jednym z najszerzej stosowanych i najlepiej zbadanych procesów mikroobróbki skrawaniem. Jednym z kluczowych wymagań związanych z miniaturyzacją obrabianych elementów (wymiarach charakterystyczne $< 1000 \mu\text{m}$) jest zmniejszenie technologicznej objętości jednostkowej [2]. W przypadku mikrotoczenia jest to ściśle związane z grubością warstwy skrawanej, która musi być odpowiednio mniejsza. Technologiczna objętość jednostkowa określa możliwą do uzyskania dokładność obrabianego elementu i dlatego w mikrotoczeniu należy stosować odpowiednio małe głębokości skrawania. Zmniejszenie grubości warstwy skrawanej i miniaturyzacja obrabianych elementów prowadzi do szeregu zjawisk, które mają pomijalne znaczenie lub nie występują w procesie konwencjonalnego skrawania. Określane są one zbiorczo jako „**efekty skali**” [3], który może być zdefiniowany jako nieproporcjonalna zmiana siły skrawania wraz ze zmniejszeniem grubości warstwy skrawanej.

W celu zminimalizowania wpływu efektów skali w procesie mikrotoczenia prowadzi się intensywne badania różnych wariantów obróbki w procesach hybrydowych, a w szczególności stosuje się wspomaganie laserowe czy ultradźwiękowe [4, 5]. W niniejszej pracy w celu zminimalizowania efektu skali autorzy zaproponowali zastosowanie wspomaganie elektrochemicznego do poprawy warunków skrawania.

Koncepcja wspomaganego elektrochemicznie procesu mikrotoczenia

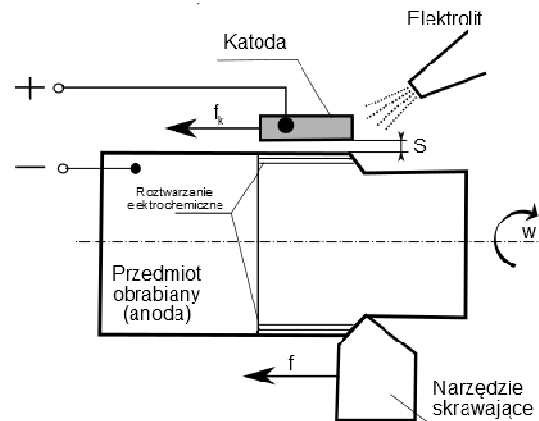
Usuwanie materiału w procesie mikrotoczenia przebiega analogicznie jak podczas tradycyjnego procesu toczenia, gdzie materiał usuwany jest w postaci drobnych wiórow w wyniku wzajemnego oddziaływania przedmiotu obrabianego i narzędzia skrawającego. W celu weryfikacji pozytywnego wpływu wspomaganie elektrochemicznego na zmniejszenie sił w procesie mikrotoczenia przeprowadzono badania w dwóch wariantach:

- w wariantcie A (rys. 1.), w którym parametry wspomaganie elektrochemicznego były ustawione analogicznie jak w procesie szlifowania elektrochemicznego, tzn. w taki sposób, aby na powierzchni przedmiotu zachodziło równocześnie rozpuszczanie elektrochemiczne i skrawanie. Głębokość skrawania a_p była w zakresie od 1 do $10 \mu\text{m}$,
- w wariantcie B (rys. 2.), w którym wspomaganie elektrochemiczne polegało na wytworzeniu na powierzchni przedmiotu warstwy pasywnej (nie zachodziło rozpuszczanie elektrochemiczne materiału). W tym przypadku grubość warstwy skrawanej była stała i wynosiła $a_p = 1 \mu\text{m}$.

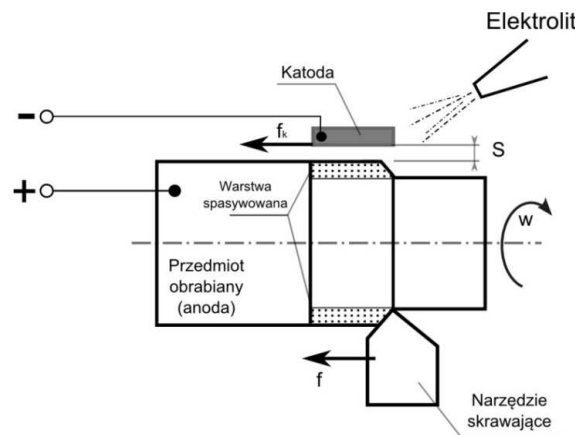
Zaproponowane rozwiązanie w wariantcie A pozwala połączyć zalety mikrotoczenia mechanicznego (tj. duża dokładność) i mikrotoczenia elektrochemicznego (tj. praktycznie brak oddziaływań mechanicznych w strefie obróbki, brak zużycia narzędzia) minimalizując równocześnie wady obu procesów (w mikrotoczeniu konwencjonalnym jest to wzrost właściwej energii skrawania, a w mikrotoczeniu elektrochemicznym stosunkowo niska dokładność). Proces hybrydowy, jakim jest wspomaganie elektrochemicznie mikrotoczenie w wariantcie A charakteryzuje się:

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

Zastosowanie wspomaganie elektrochemicznego w wariantcie B ma na celu zmianę właściwości mechanicznych warstwy skrawanej, co w efekcie spowoduje poprawę warunków skrawania. Wytworzona warstwa pasywna jest twardsza od materiału rodzimego [6], co pozytywnie wpływa na zmniejszenie sił skrawania [7] prowadząc do istotnego podwyższenia wskaźników technologicznych obróbki (zwiększenie dokładności i zmniejszenie zużycia narzędzia).



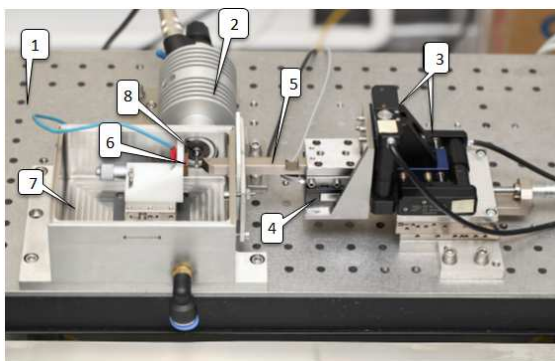
Rys. 1. Schemat mikrotoczenia wspomaganego elektrochemicznie w wariantcie A: S – szczelina międzyelektrodowa; f, f_k – posuw narzędzia skrawającego oraz katody ($f = f_k$), w – prędkość obrotowa



Rys. 2. Schemat mikrotoczenia wspomaganego elektrochemicznie: S – szczelina międzyelektrodowa; f, f_k – posuw narzędzia skrawającego oraz katody ($f = f_k$), w – prędkość obrotowa [8]

Badania doświadczalne procesu mikrotoczenia wspomaganego elektrochemicznie

Celem prowadzonych badań była empiryczna weryfikacja pozytywnego wpływu wspomaganie elektrochemicznego na poprawę warunków skrawania. Badania zostały przeprowadzone w ramach pracy doktorskiej [8] na zaprojektowanym i wykonanym w Instytucie Technologii Maszyn i Automatyki Produkcji stanowisku badawczo-dydaktycznym do mikrotoczenia wspomaganego elektrochemicznie (rys. 3). Jako narzędzie skrawające zastosowano płytke DCET070200R-SN NX2525 firmy Mitsubishi. Materiałem obrabianym była stal nierdzewna 0H18N9.



Rys. 3. Zdjęcie zaprojektowanego i zbudowanego stanowiska badawczo - dydaktycznego do badań wspomagania elektrochemicznego procesu toczenia mikroelementów: 1 – stół roboczy, 2 - wrzeciono, 3 – układ napędowy, 4 – nanopozycjoner piezoelektryczny, 5 – narzędzie, 6 – katoda, 7 – wanna (komora), 8 – przedmiot obrabiany (anoda)

Z dotychczasowych prac oraz z wyników modelowania matematycznego wynika, że zależności określające związki pomiędzy czynnikami badanymi i wynikowymi są nieliniowe. W związku z tym jako funkcje obiektu badań przyjęto wielomian drugiego stopnia. Badania przeprowadzono zgodnie z zasadami planowania eksperymentu. Opracowanie wyników badań obejmowało: wyznaczenie współczynników regresji oraz ocenę ich istotności, ocenę dokładności pomiarów oraz ocenę adekwatności funkcji obiektu badań.

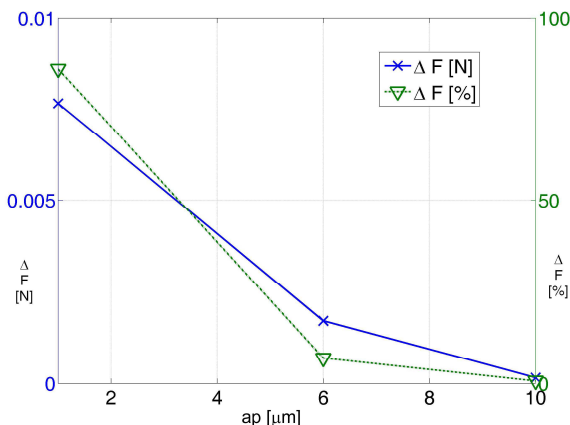
Wpływ wspomaganie elektrochemicznego na poprawę warunków mikrotoczenia w wariantach A i B określano poprzez spadek (różnicę) siły skrawania w procesie bez i ze wspomaganie. Warto tutaj podkreślić, że w ramach prowadzonych badań skupiono się na pomiarze różnicy sił, a nie ich dokładnych wartościach. W celu dobru parametrów procesu wspomaganie elektrochemicznego przeprowadzono próby wstępne w wyniku których ustalono, że badania mikrotoczenia wspomaganie elektrochemicznie zostaną przeprowadzone dla następujących parametrów:

- w wariantach A, w którym parametry wspomaganie elektrochemicznego dobrano analogicznie jak w procesie szlifowania elektrochemicznego jako czynniki stałe przyjęto: napięcie międzyelektrodowe $U = 10$ V, grubość szczeliny międzyelektrodowej $S_0 = 0,25$ mm. Jako czynniki wejściowe przyjęto: głębokość skrawania a_p (zakres zmienności 1 – 10 μm), prędkość skrawania v_c (zakres zmienności 40 – 120 m/min), posuw f (zakres zmienności 1 – 5 $\mu\text{m}/\text{obr}$). Każda próba obejmowała dwie sekwencje, mianowicie usunięcie 3 warstw materiału bez wspomaganie elektrochemicznego, a następnie usunięcie 3 warstw materiału ze wspomaganie elektrochemicznym,
- w wariantach B, w którym wspomaganie elektrochemiczne polegało na wytworzeniu na powierzchni przedmiotu warstwy pasywnej; ustalono następujące czynniki stałe: wartość napięcia międzyelektrodowego $U = 3$ V, grubość szczeliny międzyelektrodowej $S_0 = 0,25$ mm, czas pasywacji $t = 1$ min, głębokość skrawania $a_p = 1$ μm . Jako czynniki wejściowe przyjęto: prędkość skrawania v_c (zakres zmienności 40 – 120 m/min), posuw f (zakres zmienności 1 – 5 $\mu\text{m}/\text{obr}$). Każda próba obejmowała dwie sekwencje, mianowicie usunięcie 10 warstw materiału bez wspomaganie elektrochemicznego, a następnie usunięcie 10 warstw materiału ze wspomaganie elektrochemicznym.

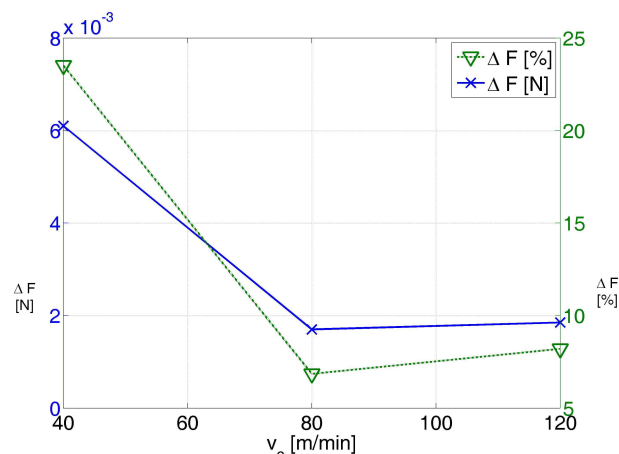
Metodyka przeprowadzonych badań oraz zastosowane metody pomiarowe zostały szczegółowo opisane w [8].

Analiza wyników - wariant A

Otrzymane wyniki wspomaganie elektrochemicznego w wariantach A, przedstawiono na rys.4 i 5. Wskazują one na poprawność przyjętej hipotezy o pozytywnym wpływie wspomaganie elektrochemicznego na proces mikrotoczenia, czego przykładem jest spadek siły skrawania w trakcie procesu.



Rys. 4. Spadek średniej siły skrawania (względny i bezwzględny) w procesie z wspomaganie w zależności od głębokości skrawania a_p . Parametry skrawania: $v_c = 80$ m/min, posuw $f = 3$ $\mu\text{m}/\text{obr}$ wariant A wspomaganie elektrochemicznego



Rys. 5. Spadek średniej siły skrawania (względny i bezwzględny) w procesie z wspomaganie w zależności od prędkości skrawania v_c . Parametry skrawania: $a_p = 6$ μm , posuw $f = 3$ $\mu\text{m}/\text{obr}$ wariant A wspomaganie elektrochemicznego

Na podstawie przedstawionych zależności można sformułować następujące wnioski odnoszące się do wspomaganie elektrochemicznego w wariantach A:

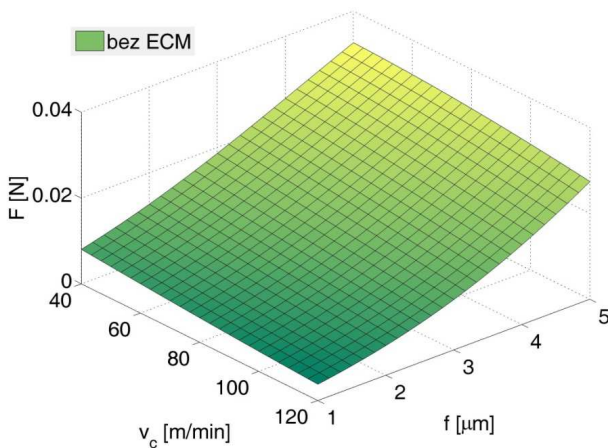
- średnie wartości zarejestrowanych sił są rzędu kilkudziesięciu mN,
- wspomaganie elektrochemiczne powoduje spadek średniej siły o kilka mN, jednak w odniesieniu do wartości siły zmiana ta jest rzędu kilkudziesięciu %,
- dla badanych parametrów wspomaganie elektrochemiczne przyniosło najwięcej korzyści dla $a_p = 1$ μm ; wraz ze wzrostem grubości skrawania a_p wpływ wspomaganie staje się nieistotny (ΔF jest na poziomie błędów pomiaru siły). Dla małych głębokości skrawania roztworzenie elektrochemiczne znacznie zmniejsza szerokość warstwy skrawanej wpływając na spadek siły skrawania,
- w funkcji prędkości skrawania spadek siły ΔF najbardziej zauważalny jest dla małych prędkości skrawania,

$v_c = 40$ m/min. Dla tych prędkości skrawania znaczny wpływ na proces formowania się wióra mają odkształcenia plastyczne materiału. Powodują one powstawanie narostu na ostrzu noża. Wspomaganie elektrochemiczne pozytywnie wpływa na zmniejszenie intensywności tworzenia się narostu.

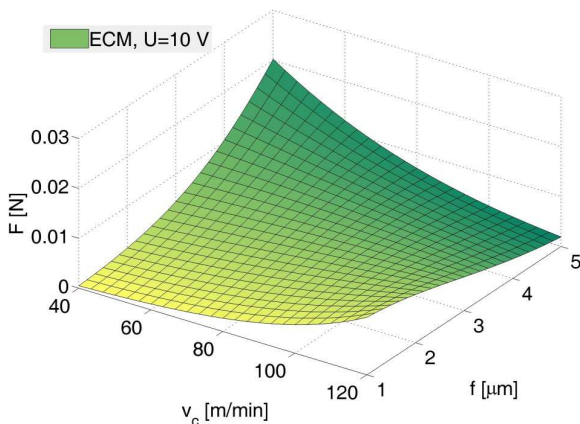
W dalszym etapie analizy wyników przeprowadzono aproksymację zależności pomiędzy:

- średnią siłą zarejestrowaną podczas obróbki bez wspomaganie elektrochemicznego (bez ECM),
- średnią siłą zarejestrowaną podczas obróbki ze wspomaganie elektrochemicznym (ECM),
- różnicą ΔF pomiędzy wartościami średniej siły dla procesów bez i ze wspomaganie elektrochemicznym, a badanymi czynnikami wejściowymi (rys. 8).

W pierwszych dwóch przypadkach jako funkcje aproksymującą przyjęto model multiplikacyjny o składowych eksponencjalnych. Zależność $\Delta F(a_p, v_c, f)$ aproksymowano wielomianem drugiego stopnia z interakcjami. Analiza otrzymanych zależności funkcyjnych wskazuje na wyraźne zmniejszenie sił w wyniku wspomaganie elektrochemicznego (rys. 6. i rys. 7)



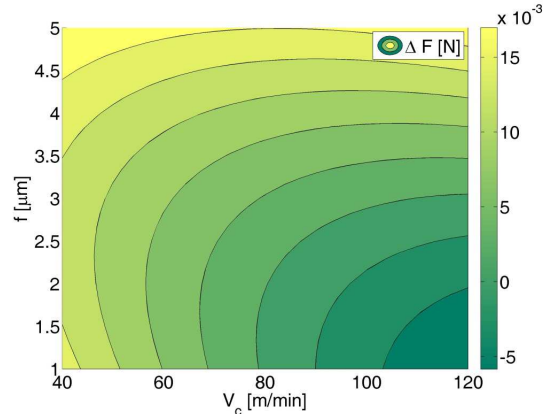
Rys. 6. Zależność siły skrawania od prędkości skrawani v_c i posuwu f dla $a_p = 3$ μm , obróbka bez wspomaganie elektrochemicznego



Rys. 7. Zależność siły skrawania od prędkości skrawani v_c i posuwu f dla $a_p = 3$ μm , obróbka wariant A wspomaganie elektrochemicznego

Największe korzyści wspomaganie elektrochemicznego są dla $a_p < 5$ μm . Dla tych wartości udział roztworzenia elektrochemicznego w usuwaniu nadmiaru jest stosunkowo

duży, co wpływa na zmniejszenie grubość warstwy skrawanej oraz zmniejsza wpływ odkształceń plastycznych. Dla wartości $v_c > 100$ m/min i $f < 2$ $\mu\text{m}/\text{obr}$ zależność $\Delta F(a_p, v_c, f)$ przyjmuje wartości ujemne. Na tej podstawie nie można jednak wnioskować, że w wyniku wspomaganie elektrochemicznego następuje wzrost siły skrawania. W tym zakresie parametrów rejestrowano najmniejsze wartości siły, a tym samym pomiary obciążone były największym błędem.

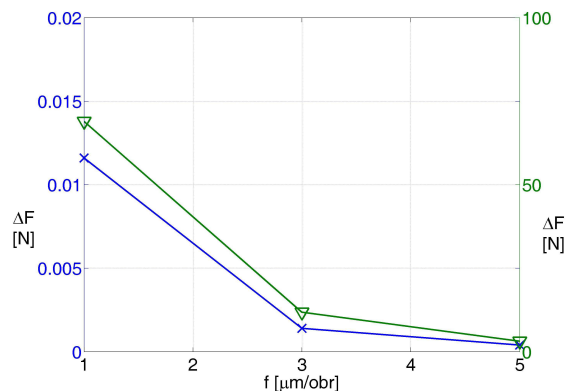


Rys. 8. Mapa konturowa przedstawiająca spadek siły skrawania ΔF w wyniku wspomaganie elektrochemicznego procesu skrawania (wariant A) w zależności od prędkości skrawani v_c i posuwu narzędzia f

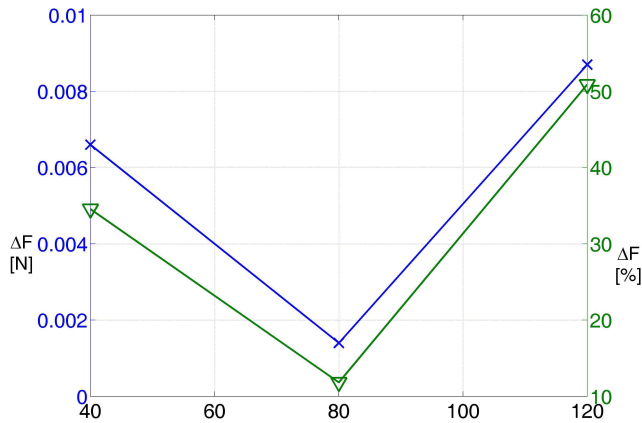
Zmierzona przyrządem warsztatowym Taylor Hobson Surtronic 25 chropowatość powierzchni dla wszystkich próbek była w granicach: $R_a = 0,08 - 0,15$ μm , a $R_z = 0,5 - 1,15$ μm przy odchyleniach standardowych $\sigma_{R_a} = 0,02$ μm i $\sigma_{R_z} = 0,22$ μm , co wskazuje, że dominujący wpływ na konstytuowanie się warstwy wierzchniej mają zjawiska związane z roztworzeniem elektrochemicznym (zastosowano jednakowe parametry wspomaganie dla wszystkich prób). W każdej z prób wartość natężenia prądu w trakcie obróbki wynosiła $\approx 0,5$ A, co dla przyjętej geometrii szczeliny międzyelektrodowej daje gęstość prądu ≈ 10 A/cm². Wartość tą w obróbce elektrochemicznej przyjmuje się zwykle jako graniczą, powyżej której prawidłowo zachodzi proces roztworzenia elektrochemicznego.

■ Analiza wyników - wariant B

W drugiej części badań sprawdzono wpływ wspomaganie elektrochemicznego w wariantcie B. Przedstawione na rys. 9 i rys. 10 zależności względnego ($\Delta F[\text{N}]$) i bezwzględnego ($\Delta F[\%]$) spadku średniej siły skrawania w wyniku wspomaganie elektrochemicznego zostały wyznaczone na podstawie zarejestrowanych sygnałów napięcia – wartości siły.



Rys. 9. Spadek (względny i bezwzględny) średniej siły skrawania w zależności od posuwu f ; parametry skrawania: $a_p = 1$ μm , $v_c = 80$ m/min wariant B wspomaganie elektrochemicznego



Rys. 10. Spadek (względny i bezwzględny) średniej siły skrawania w zależności od prędkości skrawania v_c ; parametry skrawania: $a_p = 1 \mu\text{m}$, $f = 3 \mu\text{m/obr}$ wariant B wspomaganie elektrochemicznego

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz analizy uzyskanych wyników pomiarów można sformułować następujące wnioski dotyczące wspomaganie w wariantcie B:

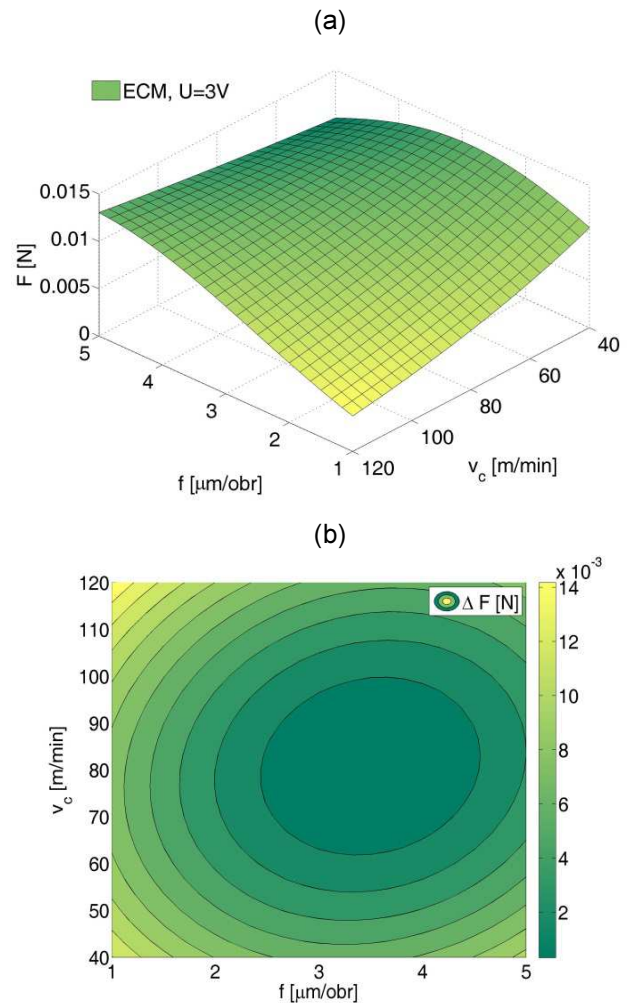
- w wyniku wspomaganie elektrochemicznego otrzymano średni spadek siły od kilkunastu do kilku mN, co w stosunku do wartości siły wynosi od kilku do kilkadziesiąt %,
- w zakresie badanych parametrów najwięcej korzyści wspomaganie elektrochemiczne przyniosło, gdy $f = 1 \mu\text{m/obr}$. Wraz ze wzrostem posuwu f wpływ wspomaganie elektrochemicznego staje się nieistotny (ΔF jest na poziomie błędów pomiaru siły). Mniejsze wartości posuwu to mniejsze grubości warstwy skrawanej i związany z tym wzrost siły skrawania. Wzrost siły skrawania wraz ze zmniejszeniem grubości warstwy skrawanej wynika ze specyfiki procesu mikro-skrawania, gdzie w pewnym zakresie grubości warstw skrawanych następuje wzrost sił skrawania [3]. Można na tej podstawie wnioskować, że wspomaganie elektrochemiczne w wariantcie B 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 ΔF najbardziej zauważalny jest dla prędkości skrawania $v_c = 40 \text{ m/min}$ i $v_c = 120 \text{ m/min}$. Prędkość skrawania w głównej mierze 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.

W dalszym etapie analizy wyników przeprowadzono analogicznie jak w przypadku wspomaganie w wariantcie A aproksymacje zależności pomiędzy:

- średnią siłą zarejestrowaną podczas obróbki bez wspomaganie elektrochemicznego (bez ECM),

- średnią siłą zarejestrowaną podczas obróbki ze wspomaganie elektrochemicznym (rys. 11a),
- różnicą ΔF pomiędzy wartościami średniej siły dla procesów bez i ze wspomaganie elektrochemicznym a czynnikami wejściowymi (rys. 11b).

W pierwszych dwóch przypadkach jako funkcje aproksymująca przyjęto model multiplikacyjny o składowych eksponentach. Zależność $\Delta F(v_c, f)$ aproksymowano wielomianem drugiego stopnia z interakcjami. Analiza otrzymanych zależności funkcyjnych wskazuje, że największe korzyści wspomaganie elektrochemicznego w wariantcie B są dla $f < 2 \mu\text{m}$.



Rys. 11. Zależność siły skrawania od prędkości skrawania v_c i posuwu f dla $a_p = 1 \mu\text{m}$, obróbka wariant B wspomaganie elektrochemicznego (a), wykres konturowy przedstawiający spadek siły w wariantcie B (b)

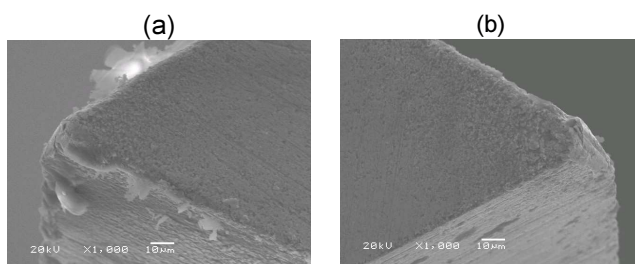
Wpływ wspomaganie elektrochemicznego na zużycie ostrza skrawającego

W ostatnim etapie badań na podstawie obrazów SEM przeprowadzono analizę stanu ostrza po obróbce bez i z wspomaganie elektrochemicznym w wariantcie A i B. Na rys. 12 i rys. 13 przedstawiono przykładowe obrazy powierzchni roboczej narzędzia wykorzystanych podczas badań.

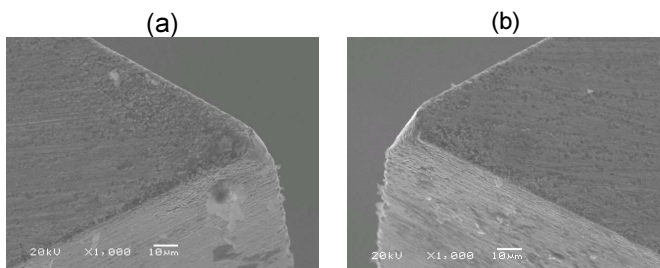
Z analizy wykonanych fotografii narzędzi skrawających wynika, że w zależności od grubości skrawania, wielkości posuwu i prędkości skrawania zużycie narzędzia ma zróżnicowany charakter, a dominującymi mechanizmami zużycia są zużycie ścierne oraz adhezyjne. Na podstawie oceny

jakościowej przedstawionych fotografii można sformułować następujące wnioski:

- zastosowanie wspomaganie elektrochemicznego w wariacie A powoduje niewielkie zmniejszenie zużycia wierzchołka ostrza i głównej krawędzi skrawającej. W tym wariacie wspomaganie zaobserwowano jednak niekorzystne zjawisko powstawania nadtrawień na krawędzi przecięcia głównej i pomocniczej powierzchni przyłożenia,
- zastosowanie wspomaganie elektrochemicznego w wariacie B powoduje niewielkie zmniejszenie zużycia wierzchołka ostrza i głównej krawędzi skrawającej. W tym wariacie nie występuje niekorzystne zjawisko powstawania nadtrawień na krawędzi przecięcia głównej i pomocniczej powierzchni przyłożenia.



Rys. 12. Obrazy SEM krawędzi skrawającej narzędzia po usunięciu 3 warstw materiału; parametry obróbki: głębokość skrawania $a_p = 6 \mu\text{m}$, prędkość skrawania $v_c = 80 \text{ m/min}$, posuw $f = 3 \mu\text{m/obr}$; a) wspomaganie elektrochemiczne: wariant A, $U = 10 \text{ V}$; b) obróbka bez wspomaganie elektrochemicznego



Rys. 13. Obrazy SEM krawędzi skrawającej narzędzia po usunięciu 10 warstw materiału; parametry obróbki: głębokość skrawania $a_p = 1 \mu\text{m}$, prędkość skrawania $v_c = 80 \text{ m/min}$, posuw $f = 3 \mu\text{m/obr}$; a) wspomaganie elektrochemiczne: wariant B, $U = 3 \text{ V}$; b) obróbka bez wspomaganie elektrochemicznego

Podsumowanie

Jednym z podstawowych problemów mikroskrawania jest nieproporcjonalna zmiana sił skrawania wraz ze zmniejszeniem grubości usuwanego materiału (efekt skali), co, ze względu na duże prawdopodobieństwo odkształcenia lub zniszczenia narzędzia oraz przedmiotu obrabianego, znacznie utrudnia prowadzenie obróbki elementów o wymiarach charakterystycznych $< 100 \mu\text{m}$. Obecnie, w celu rozwiązania tych problemów stosuje się m.in.: intensywne chłodzenie strefy obróbki czy drgania ultradźwiękowe, jednak nie rozwiązuje to w pełni problemów związanych z efektem skali.

W niniejszej pracy zaproponowano inny sposób rozwiązania tego problemu, mianowicie zastosowanie wspomaganie elektrochemicznego do poprawy warunków mikroskrawania. Przedstawione rozwiązania należą do grupy obróbek hybrydowych w wariacie A (naddatek usuwany

jest zarówno w wyniku roztwarzania elektrochemicznego jak również w wyniku mikroskrawania) i sekwencyjnej w wariacie B (naddatek usuwany jest w wyniku mikroskrawania, natomiast pasywacja elektrochemiczna korzystnie zmienia warunki usuwania naddatku poprawiając wskaźniki technologiczne procesu).

Przedstawione w artykule wyniki badań doświadczalnych pozwalają stwierdzić, że wprowadzenie wspomaganie elektrochemicznego pozytywnie wpływa na zmniejszenie sił skrawania w trakcie procesu mikrotoczenia jak również zmniejsza zużycie narzędzia skrawającego. Należy podkreślić, że przedstawiona koncepcja wpisuje się w bieżące tendencje rozwoju obrabiarek, które m.in. dotyczą realizacji różnych metod obróbki na jednej obrabiarence lub realizacji obróbki kompletnej (obróbka na gotowo na jednej obrabiarence).

Badania zostały sfinansowane ze środków Narodowego Centrum Nauki (projekt badawczy nr 2152/B/T02/2011/40 pt. „Zastosowanie wspomaganie elektrochemicznego do poprawy warunków mikroskrawania”)

LITERATURA

1. Lauwers B., Klocke F. i in., Hybrid processes in manufacturing, CIRP Annals - Manufacturing Technology 63 (2014) 561–583.
2. Masuzawa T., State of the art of micromachining. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 49(2):473–488, 2000.
3. 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.
4. Zhou M., Wang X.J, Ngoi B.K.A, Gan J.G.K., Brittle–ductile transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration Journal of Materials Processing Technology Volume 121, Issues 2–3, 28 February 2002, Pages 243–251.
5. Singh R., Melkote S. N., Characterization of a hybrid laser-assisted mechanical micromachining (LAMM) process for a difficult-to-machine material International Journal of Machine Tools and Manufacture Volume 47, Issues 7–8, June 2007, Pages 1139–1150
6. Skoczypiec S., Grabowski M., Sychalski M., Experimental Research on Electrochemically Assisted Microturning Process, Key Engineering Materials Vols. 611-612 (2014) pp 701-707.
7. Patent, United States. No. 5,967,347: Micro cutting method and systems. 1999.
8. M. Grabowski, Wspomagany elektrochemicznie proces toczenia mikroelementów, Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2014 r.