

Sebastian SKOCZYPIEC¹
Adam RUSZAJ¹
Marcin GRABOWSKI¹

PROJEKT STANOWISKA BADAWCZEGO DO REALIZACJI HYBRYDOWEJ TECHNOLOGII MIKROSKRAWANIA WSPOMAGANEGO ELEKTROCHEMICZNIE

W mikroskrawaniu, wraz ze zmniejszeniem grubości warstwy skrawanej następuje nieproporcjonalny wzrost sił skrawania. Wprowadzenie oddziaływań elektrochemicznych w warstwie powierzchniowej przedmiotu obrabianego umożliwia zmniejszenie wytrzymałości oraz twardości usuwanego materiału, co w efekcie prowadzi do poprawy wskaźników technologicznych obróbki. W artykule przedstawiono uproszczoną analizę sił podczas procesu mikrotoczenia oraz zaprezentowano projekt stanowiska do badań procesu mikroskrawania intensyfikowanego elektrochemicznie.

1. WPROWADZENIE

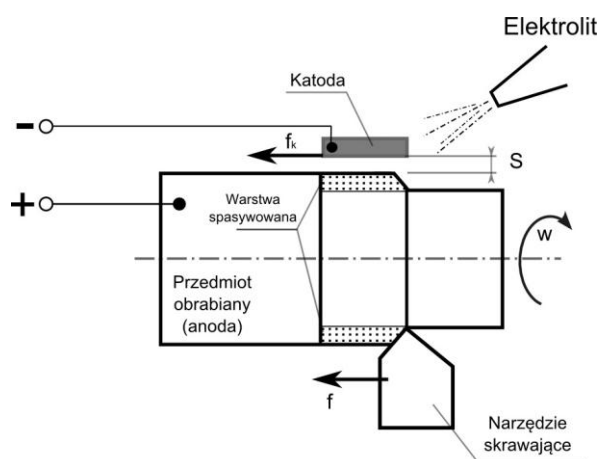
Istotnym i kluczowym aspektem podczas mikroobróbki skrawaniem jest zmniejszenie sił występujących podczas usuwania nadmiaru obróbkowego. Jednym z efektywnych sposobów poprawy warunków mikroskrawania jest obniżenie właściwości mechanicznych usuwanej warstwy przez zastosowanie dodatkowych form energii, czyli jednocześnie 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 [1]. W ostatnich latach gwałtownie wzrosło zapotrzebowanie na precyzyjne mikro-części wykonane z materiałów trudnoobrabialnych. Większe wymagania stawiane wykonywanym elementom odnośnie wymiarów, kształtów oraz jakości powierzchni wymuszają zastosowanie bardziej skomplikowanych technologii obróbkowych, które pozwalają na przekroczenie istniejących granic technologicznych. W wielu przypadkach takim rozwiązaniem są technologie hybrydowe. W przemyśle swoje zastosowanie znalazły już takie metody jak np. obróbka elektroerozyjna ze wspomaganie ultradźwiękowym, szlifowanie elektrochemiczne, toczenie z laserowym nagrzewaniem materiału, czy roztwarzanie elektrochemiczne intensyfikowane promieniowaniem laserowym.

¹Institut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Politechnika Krakowska

W artykule przedstawiona zostanie wstępna analiza procesu hybrydowego, polegająca na elektrochemicznej intensyfikacji procesu mikroskrawania. Wprowadzenie oddziaływań elektrochemicznych w warstwie powierzchniowej przedmiotu prowadzi do zmniejszenia sił skrawania i poprawy wskaźników technologicznych obróbki, umożliwiając rozszerzenie operacji mikroobróbki mechanicznej na wykonywanie struktur 3D między innymi operacjami mikrotoczenia, mikrowiercenia czy mikrofrezowania. Podstawą intensyfikacji elektrochemicznej procesu skrawania jest odpowiedni dobór grubości warstwy skrawanej i równej grubości warstwy spasywowanej (tlenkowej) uzyskanej w wyniku oddziaływania elektrochemicznego.

Z reguły, grubość warstwy spasywowanej wynosi $<1-3\mu\text{m}$, a przy odpowiednim doborze parametrów intensyfikacji elektrochemicznej można uzyskać grubość warstwy $<10\text{nm}$. Ogranicza to zastosowanie zaproponowanej metody do mikroskrawania, rozumianego jako mechaniczne kształtowanie elementów o wymiarach charakterystycznych $<1\text{mm}$, geometrycznie zdefiniowanym narzędziem. Należy więc wyraźnie podkreślić, że prowadzenie podobnych badań dla procesu klasycznego skrawania geometrycznie zdefiniowanym narzędziem mija się z celem, ponieważ efekty związane z intensyfikacją elektrochemiczną będą niezauważalne.

Szczegółowa koncepcja oraz korzyści związane z intensyfikacją elektrochemiczną mikroskrawania zostały przedstawione w [6]. Pomiedzy przedmiot obrabiany i katodę dostarczany jest elektrolit. Gdy odpowiednio zostaną dobrane wartości pH elektrolitu i wartości napięcia międzyelektrodowego, na powierzchni metalu tworzy się warstwa pasywna, a dalsze utlenianie i roztwarzanie materiału jest zatrzymane. Wytworzona na przedmiocie obrabianym warstwa pasywna ma mniejszą od materiału rodzimego wytrzymałość i twardość. Grubość tej warstwy jest zwykle $<1-3\mu\text{m}$, więc odpowiedni dobór grubości warstwy skrawanej umożliwia zwiększenie wydajności przy równoczesnym zmniejszeniu sił skrawania, co zabezpiecza miniaturowe narzędzie oraz przedmiot obrabiany przed zniekształceniem czy uszkodzeniem. Schemat tego procesu w kinematyce toczenia został przedstawiony na rysunku 1.



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

Fig. 1. Scheme of electrochemically assisted microturning: S – interelectrode gap; f, f_k – cutting tool and cathode feed rate ($f = f_k$), w – rotational speed

2. UPROSZCZONA ANALIZA SIŁ I ODKSZTAŁCENÍ W PROCESIE MIKROTOCZENIA

Wartość sił w procesie mikrotoczenia zależy od szeregu czynników takich jak np. właściwości materiału obrabianego, parametry skrawania oraz geometria narzędzia skrawającego. W aspekcie mikrotoczenia niezwykle ważnym czynnikiem jest tzw. wartość krytyczna grubość wióra [4],[5]. Jeżeli grubość wióra jest poniżej wartości krytycznej następuje odkształcenie plastyczne usuwanej warstwy, natomiast proces skrawania jest utrudniony. Istotny wpływ na minimalną grubość warstwy skrawanej ma budowa narzędzia skrawającego, a przede wszystkim promień zaokrąglenia ostrza.

Należy zaznaczyć, że ze względu na nieproporcjonalny wzrost siły skrawania wraz ze zmniejszeniem grubości usuwanego naddatku oraz bardzo duży udział odkształceń sprężystych przedstawiona analiza nie uwzględnia efektu skali. Należy ją traktować jako pewne przybliżenie, mające na celu wstępne oszacowanie wartości sił oraz odkształceń w strefie obróbki.

Siła występująca podczas skrawania F jest składową trzech sił: siły głównej F_c , oporowej F_p i posuwowej F_f . W typowych warunkach skrawania $\kappa=45^\circ$ przyjmuje się, że stosunek tych sił $F_c:F_p:F_f = 1:0,4:0,5$, czyli:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} = \sqrt{F_c^2 + 0,4F_c^2 + 0,5F_c^2} \cong 1,4F_c \quad (1)$$

skąd wynika, że największy wpływ na siłę skrawania ma główna składowa siły F_c . Zależy ona przede wszystkim od właściwości mechanicznych skrawanego materiału, warunków skrawania oraz od wymiarów warstwy skrawanej (np. geometria ostrza, grubość warstwy skrawanej h). Najczęściej jest ona określana z empirycznej zależności Taylora. Wartość głównej siły skrawania przedstawia się następująco:

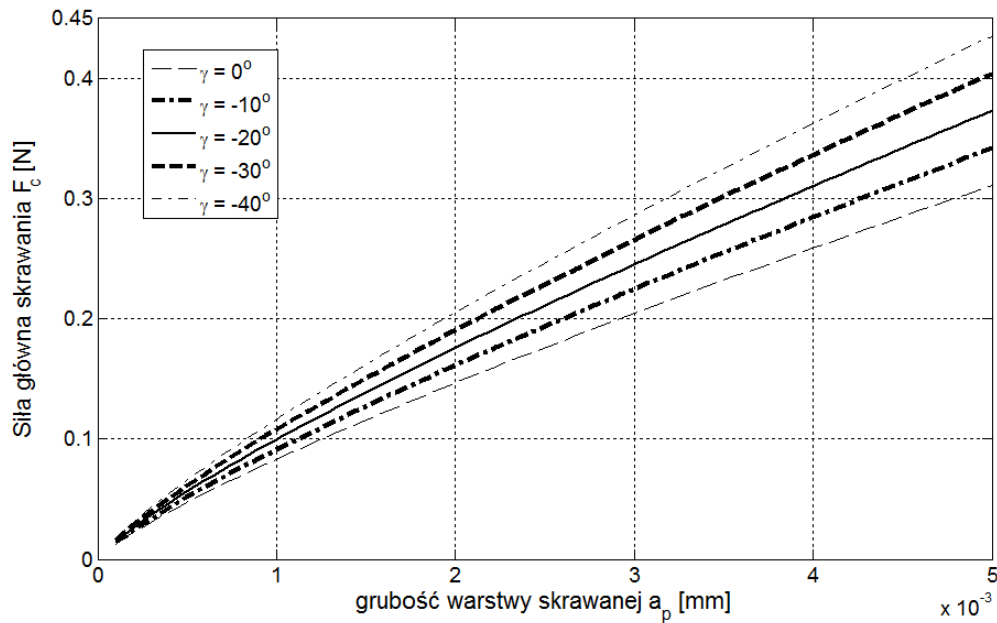
$$F_c = A \cdot k_c = b \cdot h \cdot k_c \quad (2)$$

gdzie: A – pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej, k_c – współczynnik proporcjonalności, tzw. opór właściwy skrawania MPa (N/mm^2), który zależy od właściwości mechanicznych obrabianego materiału oraz geometrii ostrza narzędzia.

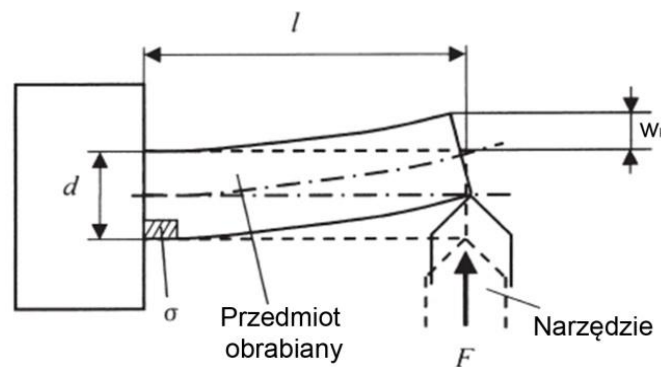
Na rysunku 2 przedstawiono zależność głównej siły skrawania od grubości warstwy skrawanej dla różnych wartości kąta natarcia γ . Przyjęcie ujemnych wartości γ pozwala na uzyskanie mniejszej krytycznej grubości wióra, jednak zwiększa siłę skrawania. Wartości tych sił zostały obliczone dla kąta przystawienia $\kappa = 45^\circ$, opór właściwy skrawania odczytano z katalogu firmy Sandvik dla stali nierdzewnej austenitycznej X10CrNiMoNb1810. Na podstawie tych zależności można stwierdzić, że przewidywane siły w trakcie procesu mikrotoczenia są co najmniej o rząd wielkości mniejsze niż w klasycznym procesie skrawania.

Pomimo tak małych wartości sił skrawania, należy również sprawdzić naprężenia i odkształcenia obrabianego wałka. Należy przede wszystkim zwrócić uwagę na możliwość

występowania naprężeń krytycznych, które mogłyby doprowadzić do odkształcenia plastycznego obrabianego elementu.



Rys. 2. Zależność siły głównej skrawania F_c od grubości warstwy skrawanej a_p dla różnych wartości kąta natarcia γ
 Fig. 2. Relationship between major cutting force F_c and depth of cut a_p for different values of rake angle γ



Rys. 3. Schemat oddziaływania narzędzia na obrabiany materiał (w_k - strzałka ugięcia) [8]
 Fig. 3. Scheme of the shaft deformation during microcutting process (w_k deflection) [8]

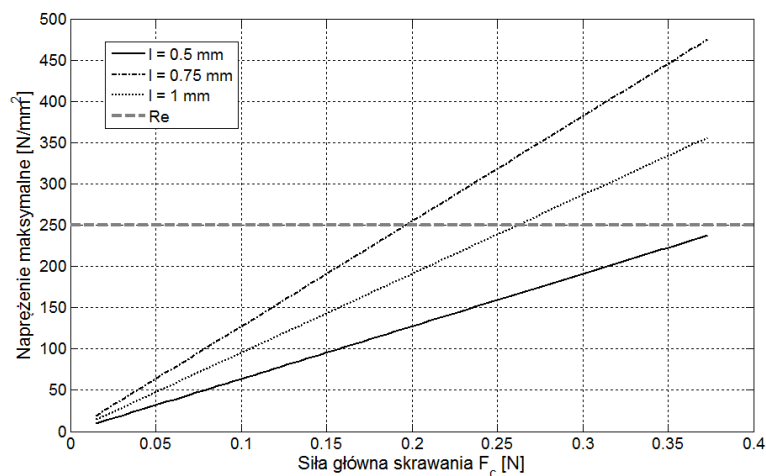
Wartości strzałki ugięcia w_k oraz naprężenia δ (rys. 3) zostały policzone z następujących zależności [8]:

$$\sigma = \frac{32 \cdot F \cdot l}{\pi \cdot d^3} \quad (3)$$

$$w_k = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot l} \quad (4)$$

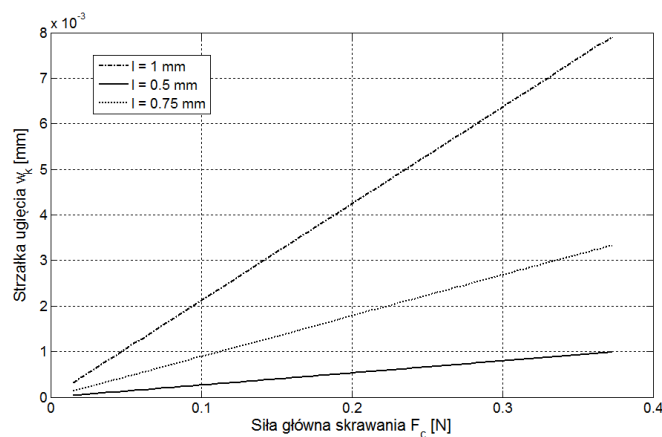
gdzie: F – siła skrawania [N], l - odległość przyłożonej siły od utwierdzenia [mm], d – średnica obrabianego wałka [mm], E - moduł Younga [MPa], I - geometryczny moment bezwładności [mm⁴]. Wyniki obliczeń naprężenia krytycznego oraz strzałki ugięcia dla $l = 0,5, 0,75$ i 1 mm zostały przedstawione na rysunku. 4 i 5. Na podstawie tych zależności można sformułować następujące wnioski:

- w trakcie obróbki istnieje duże ryzyko odkształcenia plastycznego wałka (rys. 4) – dla $l < 1$ mm i siły $F_c > 0,2$ N naprężenia przekraczają wartość granicy plastyczności ($Re = 250$ N/mm²). Wskazuje to na konieczność precyzyjnej kontroli siły skrawania.
- wynikające ze zmiennej grubości warstwy skrawanej duże odkształcenia wałka mogą utrudniać obróbkę.



Rys. 4. Zależność naprężenia maksymalnego δ w miejscu utwierdzenia wałka od siły głównej skrawania F_c dla różnych odległości przyłożenia siły od miejsca utwierdzenia wałka, średnica wałka $d = 0,2$ mm, Re – granica plastyczności

Fig. 4. Relationship between cutting force F_c and maximum stress δ in place of shaft fixing for different distance of force application l , shaft diameter $d = 0,2$ mm, Re - yield stress



Rys. 5. Zależność strzałki ugięcia w_k w miejscu przyłożenia siły od siły głównej skrawania F_c , l – odległość przyłożenia siły od miejsca utwierdzenia wałka, średnica wałka $d = 0,2$ mm

Fig. 5. Relationship between major cutting force F_c and deformation w_k for different distance of force application l , shaft diameter $d = 0,2$ mm

Celem powyższej analizy było uzyskanie wstępnych informacji niezbędnych przy projektowaniu stanowiska badawczego do mikrotoczenia intensyfikowanego elektrochemicznie. Otrzymane wyniki zostały wykorzystane przy projektowaniu stanowiska oraz podczas wstępnego doboru metod i urządzeń pomiarowych zastosowanych w trakcie badań doświadczalnych.

3. PROTOTYP STANOWISKA BADAWCZEGO DO MIKROSKRAWANIA INTENSYFIKOWANEGO ELEKTROCHEMICZNIE

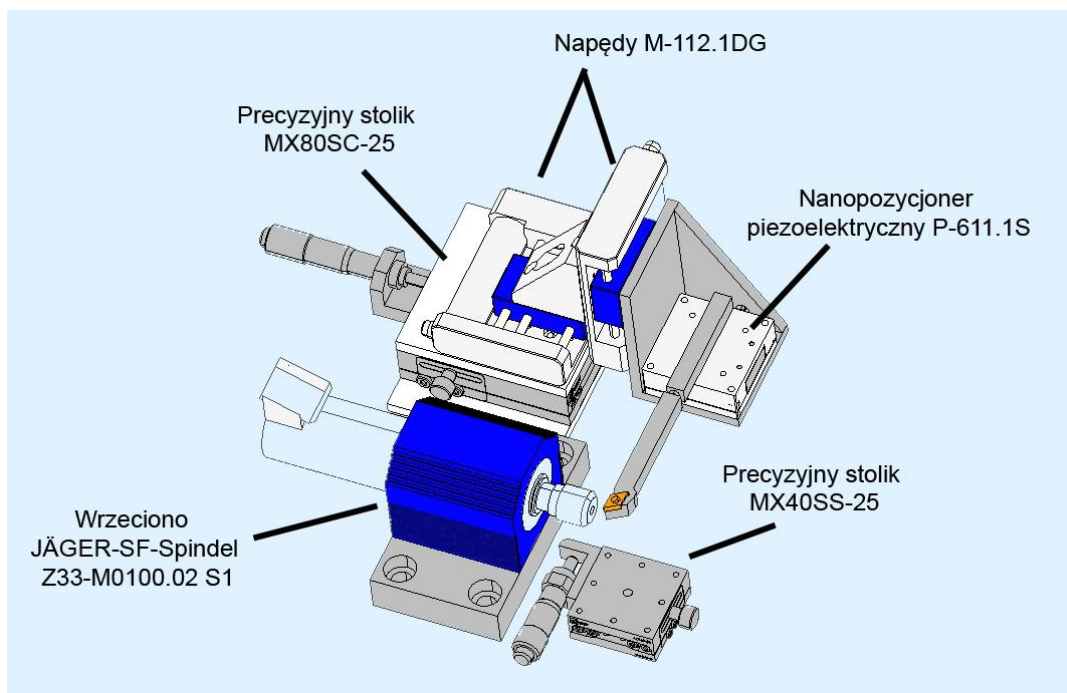
Główną przesłanką budowy stanowiska badawczego są cele prowadzonych badań doświadczalnych. Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury stwierdzono, że podstawą skutecznego wspomaganie elektrochemicznego procesu skrawania jest odpowiedni dobór grubości warstwy skrawanej równej grubości warstwy spasywowanej (tlenkowej) - uzyskanej w wyniku oddziaływania elektrochemicznego. Dlatego też w pierwszej kolejności zostanie opracowana charakterystyka zmian grubości warstwy pasywnej od parametrów oddziaływania elektrochemicznego. Pomiar ten zostanie wykonany techniką elipsometrii [7]. W następnej kolejności zostaną przeprowadzone właściwe badania doświadczalne, mające na celu określenie sił w procesie mikrotoczenia oraz wpływu intensyfikacji elektrochemicznej na ich zmianę (zmniejszenie).

Ze względu na grubość usuwanego nadkładu (ten sam rząd wielkości co grubość warstwy pasywnej) w projekcie stanowiska muszą być uwzględnione wymagania związane z odpowiednią dokładnością pozycjonowania, rozdzielczością ruchów i stabilnością temperaturową. Zbudowane jest ono z (rys. 6):

- stołu roboczego z wibroizolacją,
- szybkoobrotowego wrzeciona: dla przewidywanych średnich obrabianych elementów ($d < 1$ mm), zapewnienie prędkości skrawania rzędu kilkudziesięciu mm/min wymaga zastosowania prędkości obrotowej > 50000 min, po analizie dostępnych rozwiązań zdecydowano się na wrzeciono firmy JÄGER, typ Z33-M0100.02 S1 o maksymalnych obrotach 100000 1/min i biciu promieniowym < 1 μ m,
- układu ruchów roboczych narzędzia, w którym, ze względu na konieczność zapewnienia wysokiej rozdzielczości głównego ruchu skrawania, zastosowano trzy rodzaje napędów
 - **do wstępnego do ustawienia pozycji** narzędzia - manualny precyzyjny stół ustawczy MX80SC-25,
 - **do realizacji ruchów posuwowych** - precyzyjne stoliki ustawcze M112.DG firmy PI zbudowane na bazie silnika prądu stałego, o zakresie ruchów 25mm, minimalnym przesuwie 50nm, powtarzalności 0.1 μ m i maksymalnej prędkości przesuwu 1.5mm/s
 - **do realizacji ruchu głównego skrawania** - jednoosiowy nanopozycjoner piezoelektryczny o zakresie ruchów 100 μ m, pracujący w pętli zamkniętej z rozdzielczością 2nm,

- układu odpowiedzialnego za intensyfikację elektrochemiczną, składającego się z manualnego stolika MX40SS-25 (ustawienie szczeliny międzyelektrodowej S -rys. 1.) oraz oprzyrządowania pozwalającego na mocowanie elektrody roboczej,
- układ pomiaru sił skrawania. Jak pokazuje wstępna analiza sił w badanym procesie, są one co najmniej o rząd wielkości mniejsze niż w przypadku klasycznego skrawania. Powoduje to ogromne trudności przy doborze odpowiedniego siłomierza. Przeprowadzona analiza dostępnych na rynku rozwiązań nie pozwoliła na jednoznaczny wybór odpowiedniego czujnika. Jego wybór wymaga przeprowadzenia prób wstępnych określających użyteczność dostępnych rozwiązań. Możliwy jest również pośredni pomiar siły, poprzez pomiar przemieszczenia np. uchwytu narzędzia skrawającego. Można tutaj zastosować dalmierz laserowy, konfokalny czujnik odległości lub interferometr laserowy. Warto podkreślić, że pomiar przemieszczenia nie wprowadza zmian sztywności obrabiarki poprzez np. wprowadzenie dodatkowych elementów podatnych,
- dodatkowe oprzyrządowanie technologiczne (mocowanie i pozycjonowanie narzędzia i przedmiotu obrabianego, doprowadzenie prądu do przedmiotu obrabianego i katody, doprowadzenie elektrolitu do strefy obróbki, wentylacja obszaru obróbki, oddzielenie obszaru obróbki narażonego na oddziaływanie elektrolitu od zespołów mechanicznych obrabiarki).

Warto również zaznaczyć, że w stosunku do tradycyjnych rozwiązań konstrukcję stanowiska komplikuje konieczność wprowadzenia oddziaływań elektrochemicznych w strefę obróbki. Wymaga to zastosowania materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych gwarantujących odporność na korozję.



Rys. 6. Schemat 3D stanowiska do mikrotoczenia
Fig. 6. 3D scheme of microturning test-stand

4. PODSUMOWANIE

W referacie zaprezentowano koncepcję intensyfikacji elektrochemicznej mikroskrawania. Przedstawiono również wstępną analizę sił i przemieszczeń w procesie mikrotoczenia. Umożliwiło to dobór urządzeń i sposobów pomiaru sił w trakcie badań doświadczalnych. Przedstawiona analiza została wykorzystana do realizacji projektu stanowiska badawczego, na którym zostaną przeprowadzone próby mikrotoczenia wspomaganego elektrochemicznie.

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

LITERATURA

- [1] OCZOŚ K.E., 2000, *Hybrydowe procesy obróbki ubytkowej – istota, przykładowe procesy, wyzwania rozwojowe*”, *Mechanik*, 73/5-6, 315-324.
- [2] KOZAK J., OCZOŚ K.E., 2001, *Selected problems of abrasive hybrid machining*, *Journal of Materials Processing Technology*, 109, 360-366.
- [3] 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, 566–587.
- [4] CUBA RAMOS A., AUTENRIETH H., STRAUß T., DEUCHERT M., HOFFMEISTER J., SCHULZE V., 2012, *Characterization of the transition from ploughing to cutting in micro machining and evaluation of the minimum thickness of cut*, *Journal of Materials Processing Technology*, 212/3, 594–600.
- [5] VINAYAGAMOORTHY, R. AND ANTHONY XAVIOR, M., 2011, *A review on micro turning process*, *International Journal of Current Research*, 3/11, 174-179,
- [6] SKOCZYPIEC S., RUSZAJ A., GRABOWSKI M., 2010, *Elektrochemiczna intensyfikacja procesu mikroskrawania*, *Inżynieria Maszyn*, 15/3, 92-101.
- [7] OLEŚ A., 1998, *Metody doświadczalne fizyki ciała stałego*, WNT.
- [8] NIEZGODZIŃSKI M.E., NIEZGODZIŃSKI T., 1998, *Wytrzymałość materiałów*. PWN, Warszawa.

DESIGN OF THE TEST STAND FOR ELECTROCHEMICALLY ASSISTED MICRO CUTTING PROCESS

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 µm. 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 and 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. In the paper analysis of cutting forces, stresses and deformation during microturning process has been presented. Based on obtained information the test stand design has been described.