

WYGŁADZANIE ELEKTROCHEMICZNO- ŚCIERNE WYBRANYCH STALI I STOPÓW METALI NIEŻELAZNYCH

12 pkt

Maria Chuchro^{*)}, Adam Ruszaj^{**)}, Sebastian Skoczypiec<sup>**) Józef
Dziedzic^{*)}, Jan Czekaj^{*)},</sup>

STRESZCZENIE: Przedstawiono badania procesu wygładzania elektrochemicznego włókniną w mieszaninie elektrolitu z ziarnami ściernymi materiałów: 4H13 oraz M 58. W ECM realizowanej w mieszaninie elektrolitu i proszku ściernego udział mikroskrawania jest znikomy. Aby zwiększyć ten udział powierzchnie elektrody roboczej pokrywano specjalną włókniną. Przy odpowiedniej grubości szczeliny ziarna ścierne są dociskane przez włókninę do powierzchni obrabianej, co zwiększa udziału mikroskrawania w procesie obróbki.

1. WPROWADZENIE

Celem wygładzania elektrochemicznego jest zmniejszenie chropowatości powierzchni oraz usunięcie warstwy wierzchniej uszkodzonej w poprzedzających operacjach np. obróbka elektroerozyjna, frezowanie klasyczne itp. Biorąc pod uwagę fakt, że proces roztwarzania elektrochemicznego nie wprowadza zmian w warstwie wierzchniej obrabianego materiału, po wygładzaniu otrzymuje się powierzchnię o jednorodnej chropowatości $Ra \sim 0,5 - 1,0$ [μm] bez dodatkowych defektów, które mogłyby osłabić wytrzymałość zmęczeniową przedmiotu obrabianego. W przypadku znacznej liczby matryc, kokil czy form wtryskowych oraz wielu elementów kształtowych występujących w przemyśle gospodarstwa domowego, samochodowym i lotniczym, kosmicznym czy zbrojeniowym wymagania dotyczące chropowatości powierzchni są większe: $Ra \sim 0,01 - 0,1$ [μm]. Dodatkowym utrudnieniem jest fakt, że taka chropowatość powierzchni powinna być uzyskana na stosunkowo dużych (kilkadziesiąt cm^2) powierzchniach krzywoliniowych.

Dotychczasowe badania w zakresie mikro- i nanowygładzania zrealizowane w IZTW wykazały, że stosując obróbkę elektrochemiczną istnieje możliwość

uzyskania chropowatości powierzchni $Ra \sim 50 - 100$ [nm] [9,10,11,12]. Przewiduje się, że przez optymalizację warunków procesu wygładzania i wspomaganie procesu roztwarzania mikroskrawaniem ziarnami ściernymi istnieje możliwość uzyskania jeszcze mniejszej wartości Ra . Uzyskane wyniki stanowiły podstawę do realizacji badań w ramach projektu rozwojowego Nr R03 014 01 – „Mikro- i nano wygładzanie elektrochemiczne powierzchni płaskich i krzywoliniowych” [12].

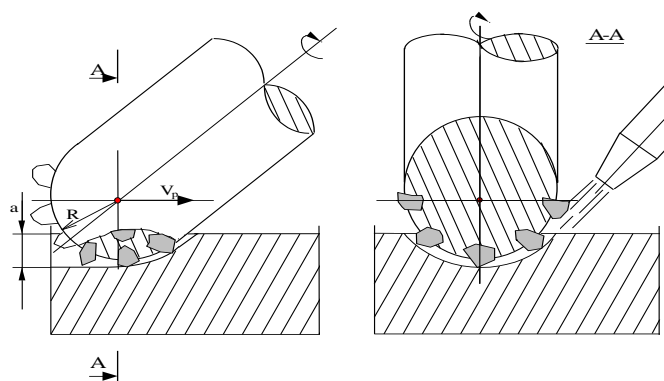
W ramach tego Projektu przeprowadzono badania różnych wariantów wygładzania elektrochemicznego, m.in. wygładzania stali i stopów w mieszaninie elektrolitu z proszkiem ściernym elektrodą pokrytą włókniną.

Dla potrzeb realizacji procesów wygładzania opracowano i wykonano modelowe stanowisko badawcze (5D), a następnie dokumentację uniwersalnej przemysłowej obrabiarki (wygładzarki – 5D).

2. WYGŁADZANIE ELEKTROCHEMICZNE

2.1 Wygładzanie elektrochemiczno – ściernie

Istotnym ograniczeniem możliwości stosowania bezstykowej obróbki elektrochemicznej w operacjach wykończeniowych (wygładzanie), zarówno w przypadku klasycznego drążenia, jak i obróbki elektrodą kulistą, jest stosunkowo niska niezawodność usuwania naddatku, szczególnie w przypadkach, gdy pojawiają się ograniczenia pasywacyjne lub, gdy na powierzchni obrabianej pojawiają się wtrącenia niemetaliczne [5,9,10,].



Rys. 1. Schemat obszaru obróbki w przypadku szlifowania uniwersalną ściernicą kulistą; a - nadatek usuwany w czasie pojedynczego przejścia narzędzia, v_p - prędkość przesuwu wzdłużnego uniwersalnej ściernicy

Aby zlikwidować te ograniczenia i podnieść niezawodność usuwania nadatku można zastosować obróbkę elektrochemiczno-ścierną z wykorzystaniem uniwersalnych ściernic w kształcie czaszy kulistej (rys. 1).

Jednoczesne wykorzystanie do usuwania nadatku roztwarzania elektrochemicznego i mikroskrawania zwiększa niezawodność usuwania materiału przy wydajności większej niż w elektrochemicznej obróbce bezstykowej uniwersalnymi elektrodami, a takiej samej dokładności i zbliżonych właściwościach warstwy wierzchniej

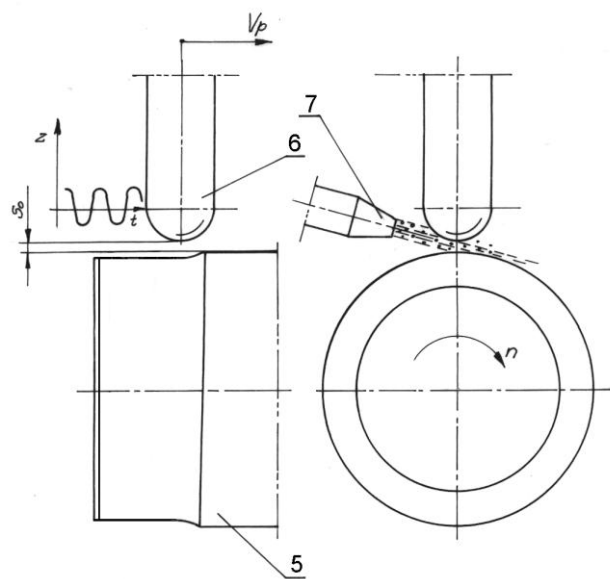
W szlifowaniu elektrochemicznym, na skutek wspomagania procesu skrawania roztwarzaniem elektrochemicznym, występują mniejsze siły skrawania, a tym samym zmniejsza się zużycie ściernicy w stosunku do szlifowania klasycznego. Z tego względu szlifowanie elektrochemiczne ściernicami uniwersalnymi może być zastosowane do obróbki wykończeniowej powierzchni krzywoliniowych, tam gdzie ze względu na zużycie ściernicy zastosowanie szlifowania klasycznego nie było racjonalne. Biorąc pod uwagę zalety procesu szlifowania uniwersalną ściernicą przeprowadzono badania umożliwiające dalsze poznanie tego procesu, uzupełniające bazę danych technologicznych do projektowania procesu technologicznego oraz rozszerzające zakres zastosowania.

2.1. Wyglądanie elektrochemiczne w mieszaninie elektrolitu i proszku ściernego

Przeprowadzone badania rozpoznawcze wykazały, że w przypadku drażenia w mieszaninie elektrolit – proszek ścierny znacząco rośnie opór hydrauliczny szczeliny, a proszek osadza się na powierzchni obrabianej uniemożliwiając kontynuowanie obróbki. Bazując na dotychczasowych badaniach obróbki uniwersalnymi elektrodami stwierdzono, że najkorzystniejsze warunki hydrodynamiczne można będzie uzyskać dla uniwersalnej elektrody w kształcie czaszy kulistej. W przypadku zastosowania elektrody w kształcie czaszy kulistej dla kinematyki toczenia jak na Rys. 2 mieszanina ziaren ściernych i elektrolitu dostarczana była dyszą strumieniem skierowanym pod pewnym kątem na wirującą powierzchnię obrabianą tak, aby jak najwięcej mieszaniny dostało się do obszaru obróbki. Kierunek i zwrot ruchu ziaren są różne i tylko niektóre z nich dostają się w strefę oddziaływania elektrody czy w strefę ewentualnego występowania kawitacji. Ziarna, które zostaną odbite od drgającej elektrody poruszają się w kierunku wirującej anody pod różnymi kątami, co wynika z krzywizny elektrody. Ziarna o największej energii kinetycznej uderzając w powierzchnię anody powodując efekt mikroskrawania czy mikroodkształceń plastycznych przyczyniają się równocześnie do efektu depasywacji i depolaryzacji powierzchni obrabianej.

W omawianym przypadku wydajność obróbki jest niewielka z uwagi na

duży stosunek wielkości powierzchni obrabianej do powierzchni roboczej elektrody, a tym samym krótki czas oddziaływania elektrody roboczej na powierzchnię obrabianą [9]. Z tego względu efektów należy upatrywać przede wszystkim w poprawie jakości warstwy wierzchniej (np. zmniejszenie chropowatości powierzchni), a rozważany wariant kinematyczny należy zaliczyć do metod obróbki wykończeniowej.



Rys.2. Schemat obszaru obróbki przy toczeniu elektrochemicznym elektrodą uniwersalną wykonującą drgania ultradźwiękowe w mieszaninie elektrolitu z proszkiem ściernym

W tym przypadku obróbki najmniejszą wartość R_a dla stali 4H13 uzyskano dla prędkości obrotowej $w = 4500 \text{ obr/min}$, prędkości posuwu $v_p = 5 \text{ mm/min}$, ziarnistości $Z = 360$, mocy ultradźwięków $P = 90 \text{ W}$.

2..3. Nowe kierunki badań.

Powyższe zastosowania wygładzania elektrochemicznego oraz wygładzania elektrochemicznego wspomaganego mikroskrawaniem dotyczą podstawowych materiałów narzędziowych; np. stali: NC6, 3H13 itp. W omawianych badaniach procesu wygładzania stosowano klasyczny proces roztwarzania elektrochemicznego, co zdecydowanie ogranicza możliwości uzyskania parametru

chropowatości powierzchni $Ra \ll 0.5$ [μm]. Aby poprawić te rezultaty prowadzone są w wielu ośrodkach badania procesów wygładzania czy polerowania elektrochemicznego [1,2,3,4,]. Aby uzyskać dalsze zmniejszenie parametru Ra należy w operacji wygładzania stworzyć warunki do realizacji procesu polerowania elektrochemicznego. Jest to w praktyce bardzo trudne bo na klasycznych obrabiarkach elektrochemicznych nie można zastosować specjalnych szkodliwych dla zdrowia elektrolitów, w których skład wchodzi: H_2SO_4 czy H_3PO_4 . Aby uzyskać w operacji wygładzania elektrochemicznego warunki zbliżone do polerowania należy zastosować elektrody pokryte specjalną włókniną ścierną. Fakt ten został potwierdzony doświadczalnie [1]. Autorzy zastosowali jako elektrolit wodny roztwór NaNO_3 a elektrodę roboczą wykonującą ruch obrotowy pokryli specjalną włókniną ścierną. Wygładzając w ten sposób próbki stalowe uzyskali w zależności od warunków obróbki $Ra = 0.07 - 0.30$ [μm].

Ostatnio pojawiły się również informacje o stosowaniu wygładzania elektrochemicznego do materiałów nieżelaznych takich jak nikiel czy stopy aluminium (np. PA6) [2] czy stopy miedzi (np. brąz i mosiądz) [4].

Dane literaturowe potwierdziły również celowość stosowania drgań ultradźwiękowych elektrody w operacjach wygładzania elektrochemicznego [6]. Kolejnym kierunkiem w zakresie wygładzania i polerowania elektrochemicznego jest wspomaganie procesu roztwarzania polem magnetycznym [7].

3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

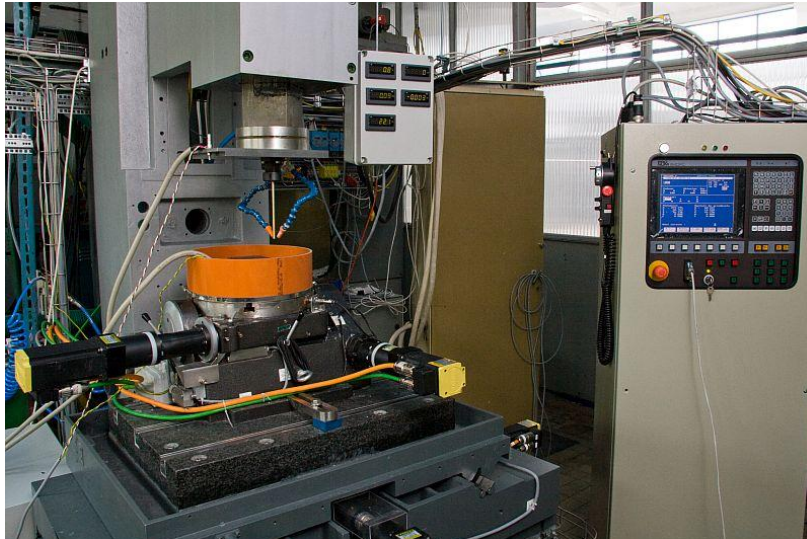
3.1. Stanowisko badawcze

Stanowisko modelowe umożliwi realizację badań procesów mikro i nanowygładzania elektrochemicznego dla następujących wariantów obróbkowych:

- ◆ stałe i impulsowe napięcie międzyelektrodowe co wymaga zastosowania specjalnego zasilacza impulsowego,
- ◆ bez i z drganiami ultradźwiękowymi elektrody roboczej, co wymaga zastosowania specjalnej głowicy ultradźwiękowej,
- ◆ w czystym elektrolicie i mieszaninie elektrolitu z ziarnami ściernymi, co wymaga zastosowania specjalnego układu obiegu cieczy roboczej.

Do realizacji badań wymagających mieszaniny elektrolitu z proszkiem ściernym dobudowany został zespół, w którym następuje mieszanie cieczy i proszku ściernego w celu dalszego przekazania tej mieszaniny do szczeliny międzyelektrodowej.

Na rys. 3 pokazano część obrabiarkową i układ sterowania.



Rys. 3. Część obrabiarkowa i układ sterowania PRONUM

3.2. Badania procesu wygładzania włókniną (bez nasypu ściernego) w mieszaninie elektrolitu z ziarnami ściernymi

Badania zostały przeprowadzone zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 4.

Elektroda robocza obraca się z prędkością ω , wykonując dodatkowo ruch planetarny n (Rys. 4). Czynnikiem badanym było napięcie międzyelektrodowe, zmienne w zakresie 11 – 23 V. Jako dodatkowe parametry przyjęto:

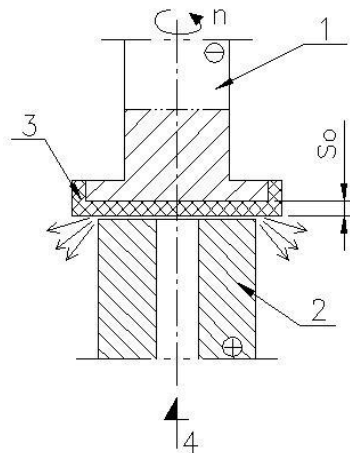
- grubość szczeliny międzyelektrodowej $S_0 = 1,5$ mm i $S_0 = 2$ mm,
- koncentrację proszku ściernego $C_{SiC} = 20$ g/l i $C_{SiC} = 30$ g/l
- ziarnistość proszku ściernego: 360 i 800;

Jako czynnik wynikowy przyjęto chropowatość powierzchni R_a [μm]. Czynnikiemami stałymi obróbki były:

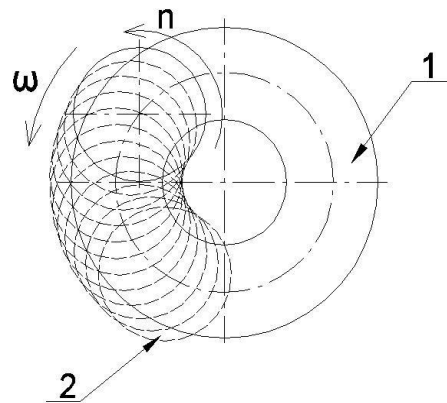
- elektrolit: 10% wodny roztwór NaNO_3 ,
- rodzaj włókniny: 3M Scotch – Brite MS,
- prędkość obrotowa elektrody roboczej $\omega = 2000$ obr/min,
- prędkość ruchu planetarnego: $n = 50$ mm/min (Rys. 3.96),
- proszek ścierny: SiC.

Badania zostały przeprowadzone dla następujących materiałów:

- mosiądz M58,
- stal 4H13.



Rys.4. Schemat wygładzania elektrochemicznego powierzchni płaskich elektrodą pokrytą włókniną 3M Scotch – Bite MS – SH. 1 - elektroda – narzędzie, 2 – materiał obrabiany, 3 – włóknina bez ziarna ściernego, 4 – doprowadzenie medium roboczego (mieszanka elektrolitu z ziarnem ściernym)



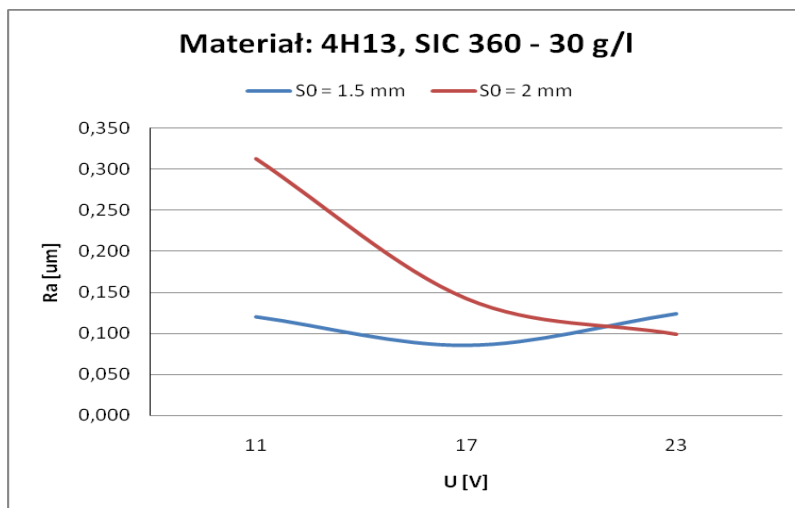
Rys. 5. Schemat ruchów środka elektrody roboczej w trakcie szlifowania włókniną z nasypem ściernym, 1 – obrabiana próbka, 2 – trajektoria środka ER, ω - prędkość obrotowa ER, n – prędkość ruchu planetarnego

Na rysunkach 6 - 9 przedstawiono przykładowe porównanie wyników badań dla wybranych grubości szczelin, ziarnistości i koncentracji proszku ściernego.

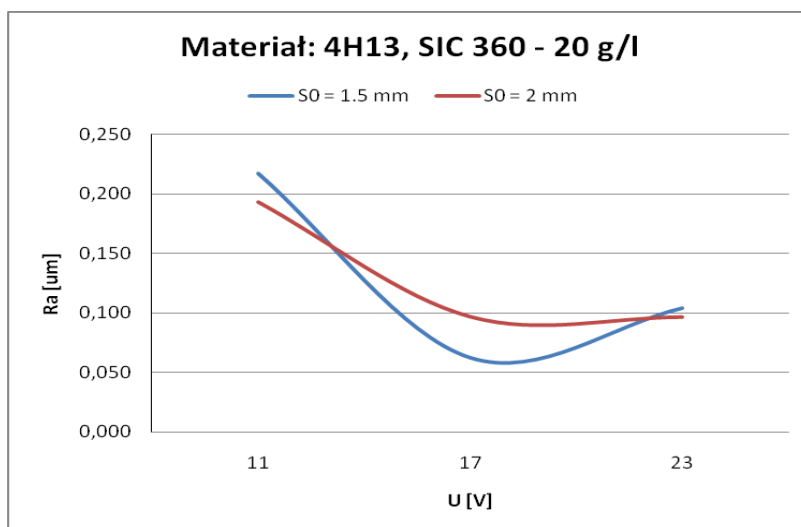
Uzyskane wyniki pokazały, że w przypadku wygładzania stali 4H13 parametr chropowatości wynosi $Ra \approx 0,06 - 0,31$ [μm]. Najmniejszą wartość $Ra \approx 0,06$ [μm] uzyskano dla $U=17$ [V], ziarnistości SiC 360 oraz koncentracji proszku 20 g/l (7). Można zatem stwierdzić, że powyższy wariant wygładzania zapewnia uzyskanie najlepszej jakości powierzchni obrabianej. W przypadku wygładzania elektrochemicznego mosiądzu M58 uzyskana wartość Ra była znacznie większa niż w przypadku stali 4H13. Uzyskano wartość $Ra \approx 0,25 - 1,4$ μm w zależności od:

- wartości napięcia,
- grubości szczeliny międzylektrodowej.

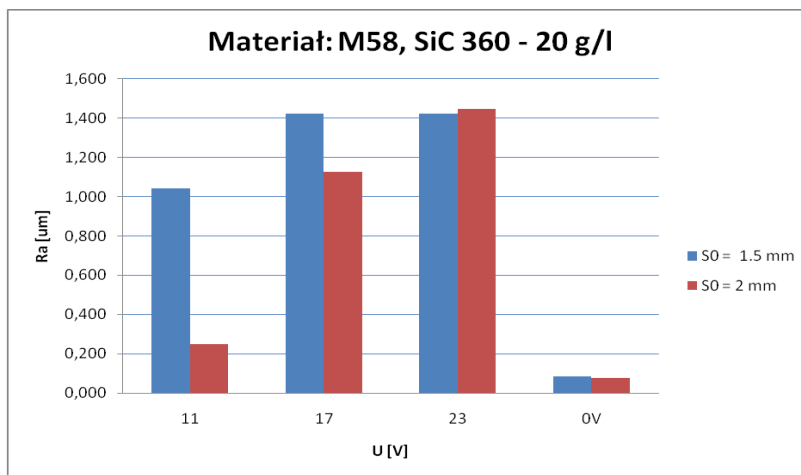
Najmniejszą wartość $Ra=0,079\mu\text{m}$ uzyskano dla przypadku gdy $U=0\text{V}$, czyli bez roztworzenia elektrochemicznego (Rys.8).



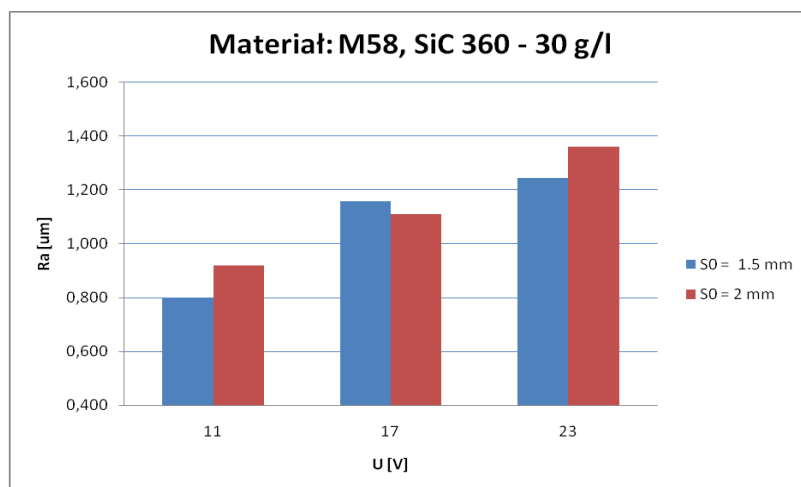
Rys. 6. Porównanie zależności $Ra(U)$ dla dwóch badanych grubości początkowej szczeliny międzyelektrodowej $S_0 = 1.5$ mm i $S_0 = 2$ mm, koncentracja proszku ściernego SIC 360: 30 g/l, szlifowanie włókniną w mieszaninie elektrolit – proszek ścierny, materiał obrabiany: stal 4H13



Rys. 7. Porównanie zależności $Ra(U)$ dla dwóch badanych grubości początkowej szczeliny międzyelektrodowej $S_0 = 1.5$ mm i $S_0 = 2$ mm, koncentracja proszku ściernego SIC 360: 20 g/l, szlifowanie włókniną w mieszaninie elektrolit – proszek ścierny, materiał obrabiany: stal 4H13.



Rys. 8. Porównanie chropowości Ra dla dwóch badanych grubości początkowej szczeliny międzyelektrodowej $S_0 = 1.5$ mm i $S_0 = 2$ mm, koncentracja proszku ściernego SIC 360: 20 g/l, szlifowanie włókniną w mieszaninie elektrolit – proszek ścierny, materiał obrabiany: mosiądz M58, $U = 0$ V – wyniki dla wglądania bez oddziaływania elektrochemicznego.



Rys. 9. Porównanie chropowości Ra dla dwóch badanych grubości początkowej szczeliny międzyelektrodowej $S_0 = 1.5$ mm i $S_0 = 2$ mm, koncentracja proszku ściernego SIC 360: 30 g/l, szlifowanie włókniną w mieszaninie elektrolit – proszek ścierny, materiał obrabiany: mosiądz M58.

4. Podsumowanie

Chropowatość powierzchni w obróbce elektrochemicznej jest wynikiem złożonych zjawisk zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej, a przede wszystkim w warstwie przyanodowej. W przypadku elektrochemicznego wygładzania bezstykowego (drażenie i obróbka uniwersalną elektrodą kulistą) chropowatość powierzchni maleje ze wzrostem gęstości prądu, ale przy optymalnych warunkach hydrodynamicznych. Zbyt duża prędkość przepływu powoduje występowanie zaburzeń przepływu w warstwie przyściennej i pogarsza chropowatość powierzchni. Zbyt mała może spowodować występowanie stref zastoju elektrolitu, w których może występować zwarcie lub wyładowanie elektryczne. Istotny wpływ na kształtowanie chropowatości ma polaryzacja i pasywacja powierzchni obrabianej. Występowanie tych zjawisk zależy istotnie od napięcia międzyelektrodowego. Występowanie i intensywność powyższych zjawisk zależy istotnie od rodzaju materiału obrabianego, jego struktury metalograficznej oraz składu chemicznego elektrolitu.

Istotnie można zmienić warunki w warstwie przyelektrodowej wspomagając proces roztwarzania mikroskrawaniem ziarnami ściernymi związanymi (ściernica lub włóknina z nasypem ściernym) lub wprowadzając mieszaninę elektrolitu i ziaren ściernych.

Z dotychczasowo prowadzonych badań w IZTW wynika, że każdy przypadek wygładzania należy traktować indywidualnie i indywidualnie optymalizować parametry procesu. W procesie optymalizacji należy uwzględnić rodzaj i strukturę materiału wygładzanego.

Powyższe badania wykazały, że w większości badanych wariantów nie uzyskuje się chropowatości $Ra \leq 0,1$ [μm].

Z analizy wyników badań wynika, że zmniejszenie parametru chropowatości do $Ra = 0,3 - 1,0$ [μm] jest możliwe w większości badanych przypadków. Problemy zaczynają się, gdy konieczne jest uzyskanie $Ra < 0,3$ μm , a szczególnie $Ra \ll 0,1$ μm . Stąd wynika koncepcja wygładzania w dwóch etapach:

- **Etap I:** wygładzanie wstępne dla $Ra \approx 0,1 - 0,3$ μm ,
- **Etap II:** wygładzanie wykończeniowe zapewniające uzyskanie $Ra \ll 0,1$ μm .

W etapie I racjonalne jest stosowanie wygładzania drażeniem lub uniwersalną elektrodą. W etapie drugim racjonalne jest stosowanie wygładzania elektrodą pokrytą włókniną w mieszaninie elektrolitu z proszkiem ściernym.

W obróbce elektrochemicznej bezstykowej realizowanej w mieszaninie elektrolitu i proszku ściernego udział mikroskrawania jest znikomy. Aby zwiększyć ten udział powierzchnie elektrody roboczej pokrywano specjalną włókniną. Wówczas przy odpowiednio dobranej grubości szczeliny ziarna ściernie

są dociskane przez włókninę do powierzchni obrabianej, co umożliwia zwiększenie udziału mikroskrawania w usuwaniu nadmiaru oraz uzyskanie parametru $Ra \ll 100$ nm (w warunkach zrealizowanych badań uzyskano dla stali 4H13 $Ra = 62$ nm).

LITERATURA

- [1] Dąbrowski L., Marciniak M., *Niskoprądowa gładkościowa obróbka elektrochemiczna – ścierna*, Wybrane problemy obróbki ścierniej pod redakcją Cz. Nizankowskiego, Bochnia 2008
- [2] Gosvami R.N., Mitra S., Sarkar S., *Experimental investigations on electrochemical grinding (ECG) of alumina – aluminium interpenetrating chase composite*, Int J Adv Manuf techno (2009),
- [3] Hryniewicz T. *Wstęp do obróbki powierzchniowej biomateriałów metalowych*, Wydawnictwa Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2007,
- [4] Huo J., Solanki R., McAndrew J., *Electrochemical Polishing of Cooper for Microelectronic Applications*, Surface Engineering, Volume 19, No 1, 2003
- [5] Kozak J., Rajurkar K.P., Ruszaj A., Sławiński R.: *Sculptured surface finishing by NC-electrochemical machining with ball-end electrode*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, 1998, t. 22, Nr 1, s.53-74
- [6] Pa P.S., *Design of effective plate-shape electrode in ultrasonic electrochemical finishing*; Int. J Adv. Manuf. Technol (2007),
- [7] Pai-Shan P.A., *Mechanism design of Magnetic Assistance in Surface Finishing of End-Turning*, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, Vol 2, No 4, 2008.
- [8] Ruszaj A., Czekaj J., Skoczypiec S., Chuchro M., *Some aspects of surface electrochemical microfinishing*, Proceedings of The 19th International Conference CAPE, Australia, Melbourne, November 2005.
- [9] Ruszaj A. i inni, *Porównanie wybranych sposobów wspomagania procesu roztwarzania elektrochemicznego (ECM)*, Sprawozdanie z projektu badawczego: Umowa PB Nr 1244/TO7/2000/18,
- [10] Ruszaj. A., Czekaj. J., Krehlik M., Zybura-Skrabalak M., Chuchro M., Nowak D.: *The electrochemical grinding of surfaces after rough milling when using universal tools*. Proceed. 14 International Conference on Computer - Aided Production Engineering, Tokyo, Japan, 1998, s.277 - 282.
- [11] Chuchro M., Ruszaj A., Zybura-Skrabalak M.: *The investigation of electrochemical milling of curvilinear surfaces*. Proceed. 9th International Precision Engineering, Braunschweig, Germany, 1997, s.600 - 602.

- [12] Ruszaj A. i in.: *Sprawozdanie z projektu rozwojowego Nr R03 014 01 – „Mikro- i nano wygładzanie elektrochemiczne powierzchni płaskich i krzywoliniowych”*, 2009.

ELECTROCHEMICALLY INTENSIFIED POLISHING PROCESS OF SELECTED
STEELS AND NON-FERROUS ALLOYS

ABSTRACT: *In the paper the investigations on electrochemically intensified polishing process with application of non-woven nylon web and electrolyte with abrasive particles mixture have been presented. The research has been carried on for 4H13 steel and M58 alloy. In case of polishing only in mixture of electrolyte with abrasive powder the micro cutting contribution can be neglected. Therefore the electrode has been covered by non-woven nylon web. Proper selection of the interelectrode gap size gives possibility to increase the micro cutting forces during machining.*

*) dr inż. Maria CHUCHRO, Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, 30-011 Kraków, ul. Wrocławska 37A

**) prof. dr hab. inż. Adam Ruszaj, Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, 30-011 Kraków, ul. Wrocławska 37A, Politechnika Krakowska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, 31-864 Kraków, Al. Jana Pawła II 37

*) dr inż. Sebastian SKOCZYPIEC, Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, 30-011 Kraków, ul. Wrocławska 37A, Politechnika Krakowska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, 31-864 Kraków, Al. Jana Pawła II 37

*) mgr inż. Józef DZIEDZIC, Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, 30-011 Kraków, ul. Wrocławska 37A

*) mgr inż. Jan CZEKAJ, Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, 30-011 Kraków, ul. Wrocławska 37A