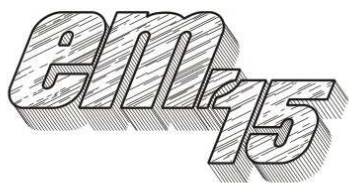


XII Międzynarodowa Konferencja - Electromachining 2015



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

Włókna węglowe pokryte niklem w funkcji elektrod narzędziowych w mikroobróbce elektroerozyjnej

Carbon fibres covered with nickel layer as tool electrodes in micro-electrical discharge machining

ANNA TRYCH

W artykule przedstawiono zastosowanie włókien węglowych z dodatkowym pokryciem niklowym jako elektrod narzędziowych w mikroobróbce elektroerozyjnej. Omówiono specjalną konstrukcję i technologię elektrod, których średnice mają ok. 7,5 μm . Przedstawiono również opis stanowiska do badań i metodykę prowadzenia eksperymentów. Opisano eksperymenty mające na celu analizę zużycia elektrod w zależności od parametrów procesu mikroobróbki elektroerozyjnej. Następnie porównano wyniki z danymi otrzymanymi na podstawie eksperymentów dotyczących włókien bez pokrycia.

SŁOWA KLUCZOWE: mikroobróbka elektroerozyjna, włókna węglowe, pokrycie niklowe, elektrody narzędziowe.

Within this work carbon fibres covered with thin nickel layer were used as tool electrodes in micro electrical discharge machining. The special design and technology of such electrodes with 7.5 μm diameter were described. The experimental setup was also introduced with the methodology of experiments. Experiments analysing wear of electrodes according to input parameters were discussed. Then, they were compared with results obtained from experiments with carbon fibres without nickel coating.

KEYWORDS: micro-electrical discharge machining, carbon fibres, nickel coating, tool electrodes.

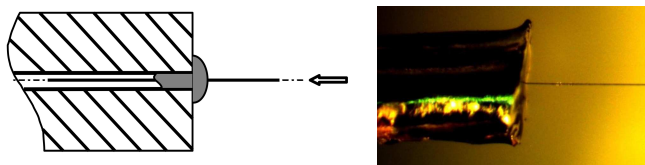
Jedną z wiodących technik wytwarzania części maszyn i narzędzi jest mikroobróbka elektroerozyjna (μEDM). Polega ona na usuwaniu nadmiaru obróbkowego w wyniku erozji towarzyszącej wyładowaniom elektrycznym powstającym między elektrodą narzędziową a przedmiotem obrabianym. W skali mikro w technice tej energia wyładowań jest rzędu

pojedynczych μJ do mJ , stąd też wydajność objętościowa nie jest duża. Niemniej jednak technologia ta jest stale obecna w obszarze zainteresowań badawczych i oczekuje się, że jej znaczenie będzie wzrastać w przyszłości [2]. Skala mikro, zarówno narzędzi jak i elementów wykonywanych tą techniką, wymusza ciągły rozwój, doskonalenie i poszukiwanie nowych materiałów oraz rozwiązań technicznych. Rozpatrując nowe materiały na mikroelektrody należy wziąć pod uwagę nie tylko to czy materiał jest przewodnikiem, ale również możliwość wykonania elektrod w odpowiednim zakresie wymiarowym. Niekiedy wykonanie samej elektrody narzędziowej jest trudne i wymaga wielu operacji [3-5]. Przygotowanie jednej mikroelektrody może trwać nawet kilkadziesiąt minut [6-7]. W związku z tym zastosowanie włókien węglowych jako elektrod narzędziowych w μEDM jest korzystne nie tylko ze względu na wymiary rzędu pojedynczych μm , ale również na dużo krótszy czas przygotowania ich do pełnienia funkcji elektrod [8-10]. Kluczowym aspektem w obróbce elektroerozyjnej jest zużywanie elektrody roboczej. Zastosowanie pokrycia niklowego może działać zabezpieczająco na zużycie samej elektrody. Jest ono rzędu 0,5 μm i nie zwiększa znacząco średnicy elektrody.

Włókna węglowe z pokryciem niklowym jako elektrody narzędziowe

Pomimo średnic rzędu pojedynczych mikrometrów, które są pożądane w mikroobróbce elektroerozyjnej, same włókna nie mogą pełnić funkcji elektrody. Dlatego też niezbędne jest wykonanie części chwytowej, która umożliwi manipulację narzędziem oraz jego mocowanie. W celu przygotowania elektrod wykorzystano rurki miedziane o średnicy 1 mm z otworem o średnicy 0,2 mm. Elementy te docięto na odpowiednią długość, a następnie do otworu wprowadzono włókno węglowe. Kolejną operacją było umieszczenie niewielkiej ilości lutowni w otworze części chwytowej. Samo włókno pozostawało równoległe do osi części chwytowej, co

w przypadku drażenia było wystarczające do przeprowadzenia obróbki i uzyskania mikrootworów. Schemat elektrody z częścią chwytową oraz przykładową gotową elektrodą zaprezentowano na rysunku - rys. 1.



Rys. 1. Schemat elektrody oraz przykład poprawnie wykonanej elektrody

Analizując właściwości włókien węglowych jak i tych z dodatkowym pokryciem niklowym można porównać właściwości odpowiednich materiałów – tab. 1.

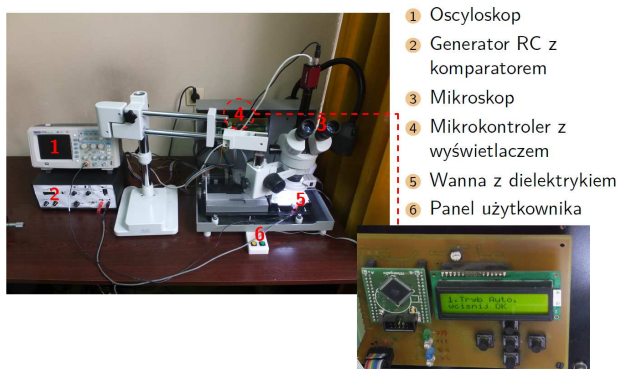
Tab. 1. Porównanie właściwości różnych materiałów

Właściwość	Symbol	Jednostka	Cu	W	Ni	C
Pojemność cieplna właściwa	C	J/(kg·K)	385	135	440	685
Gęstość	ρ	kg/m ³	8920	19250	8908	2000
Przewodność cieplna	λ_x	W/(m·K)	400	199	90	220
Temperatura topnienia	T	°C	1083	3410	1455	~3500
$R_{ER}=C\rho\lambda_cT^2$	(10^{12})		1611	6013	746	3692

Wymierzając odpowiednie wartości z tabeli 1 można otrzymać tzw. kryterium Pałatnika R_{ER} mówiące o teoretycznej odporności materiału na erozję [11]. Z takiego porównania wynika, że elektrody z włókien węglowych powinny mieć dużą odporność na zużycie. Nikiel z kolei powinien wykazywać mniejszą odporność. Stąd też sprawdzenie czy pokrycie niklowe włókna węglowego warstwą tego materiału wpływa na zużycie było jednym z tematów podjętych w badaniach. Z takiego teoretycznego porównania wynika, że zarówno nikiel jak i włókna węglowe ustępują znacznie wolframowi, który często jest używany na elektrody [3].

Metodyka i warunki badań

Ekspertymenty wykonywano z wykorzystaniem specjalnie zaprojektowanego stanowiska. W jego skład wchodził generator RC wraz z wbudowanym komparatorem, mikroskop z kamerą do monitorowania procesu oraz układ zapewniający posuw elektrody roboczej- rys. 2.



Rys. 2. Stanowisko badawcze

Stanowisko zapewniało poziome ustawienie elektrody. Taki układ był korzystny zarówno do obserwacji procesu oraz sterowania posuwem. W celu przeprowadzenia analizy mikroobróbki elektroerozyjnej z zastosowaniem włókien węglowych z pokryciem niklowym zrealizowano eksperymenty z wykorzystaniem planu trójpoziomowego. Spośród różnych planów trójpoziomowych wybrano plan Hartleya, który jest wygodny i przydatny w realizacji doświadczeń z dziedziny technologii maszyn [1]. Umożliwia on uzyskanie modelu matematycznego badanego procesu w postaci wielomianu:

$$y = b_0 + \sum b_k x_k + \sum b_{kk} x_k^2 + \sum b_{kj} x_k x_j \quad (1)$$

gdzie y – czynnik wynikowy, x_k, x_j – parametry wejściowe, b_0, b_k, b_{kk}, b_{kj} – współczynniki regresji

Każdemu eksperymentowi przyporządkowano odpowiednie parametry wejściowe x_1 - napięcie, x_2 - rezystancja, x_3 - pojemność i x_4 - prędkość posuwu oraz ich poziomy - tab. 2.

Tab. 2. Plan eksperymentu

nr eksperymentu	x_1	x_2	x_3	x_4
1	+	+	+	+
2	+	+	-	-
3	+	-	+	-
4	+	-	-	+
5	-	+	+	-
6	-	+	-	+
7	-	-	+	+
8	-	-	-	-
9	+	0	0	0
10	-	0	0	0
11	0	+	0	0
12	0	-	0	0
13	0	0	+	0
14	0	0	+	0
15	0	0	0	+
16	0	0	0	-
17	0	0	0	0

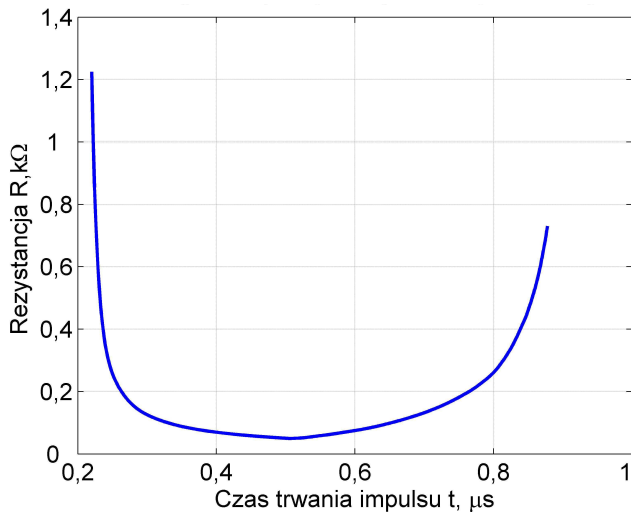
Wielkościom tym przypisano odpowiednie poziomy zamieszczone w tab. 3.

Tab. 3. Czynniki wejściowe i ich poziomy

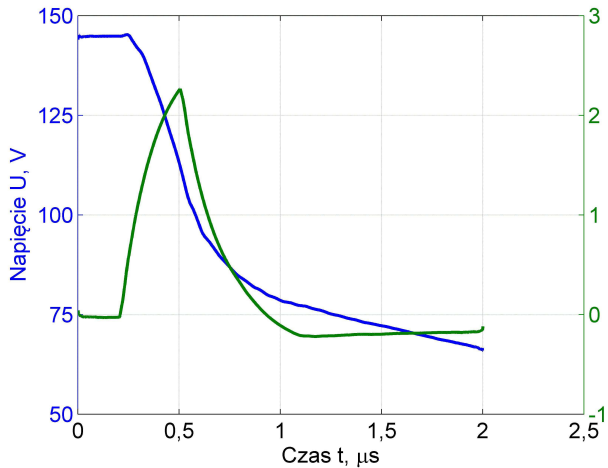
Czynnik wejściowy	Poziom niższy (-)	Wartość centralna (0)	Poziom wyższy (+)
Napięcie U	100 V	125 V	150V
Pojemność C	22 pF	511 pF	1000 pF
Rezystancja R	22 kΩ	511 kΩ	1000 kΩ
Prędkość V	80 μm/s	100 μm/s	120 μm/s

Wartości czynników wejściowych zostały dobrane po analizie wcześniejszych badań wstępnych [8-10]. Ustalono zakresy odpowiednich wartości parametrów, przy których na powierzchni przedmiotu obrabianego zaobserwowano efekt obróbkowy. Początkowa długość elektrody wynosiła 10 mm. Ekspertymenty wykonywano w czasie 10 min. Tak długi czas trwania doświadczeń był podyktowany koniecznością rejestracji przebiegów prądowych i napięciowych oraz zapewnieniem warunków porównywalnych z eksperymentami prowadzonymi dla włókien węglowych bez pokrycia. Z zarejestrowanych przebiegów oszacowano zmianę rezystancji kanału plazmowego w czasie wyładowania - rys. 3. Średnia rezystancja podczas pojedynczego wyładowania zawierała się w granicach od ok.130 do 212 Ω. Przykładowe zarejestrowane przebiegi prądu i napięcia zaprezentowano na rysunku 4. Posłużyły one do wyliczenia czasu trwania impulsu. W przypadku impulsów wyznaczonych dla danych z tabeli 2 nie przekraczały one pojedynczych μs. Z kolei

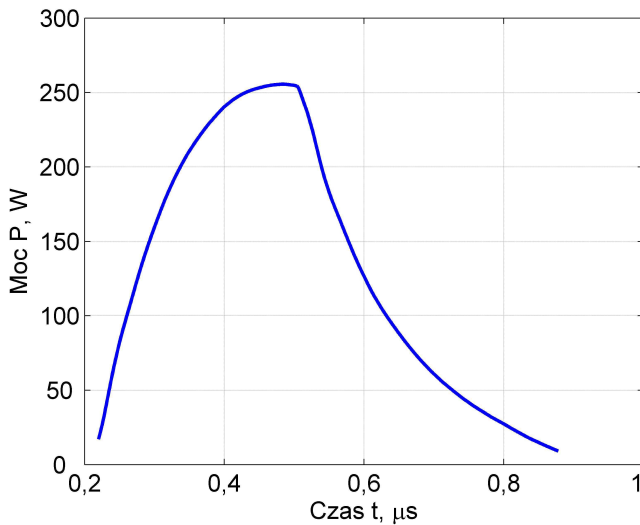
maksymalne natężenie prądu podczas wyładowań zawierało się w granicach 1 do ok. 3A. Dodatkowo wyznaczono również rozkład mocy w czasie trwania impulsu - rys. 5.



Rys. 3. Przykładowy przebieg zmian rezystancji kanału plazmowego podczas trwania impulsu



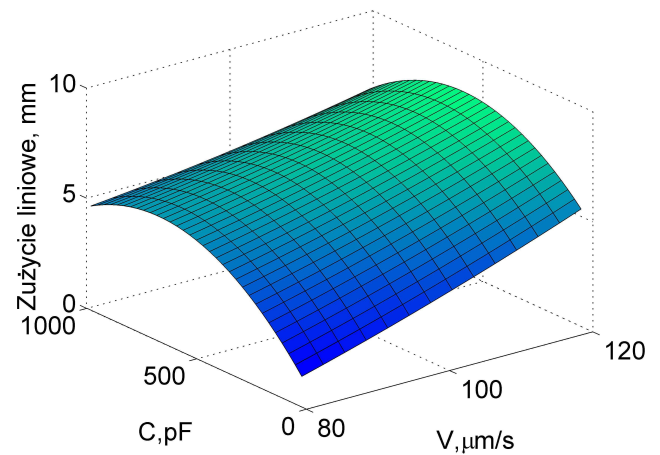
Rys. 4. Przykładowy przebieg natężenia i napięcia zarejestrowany podczas badań



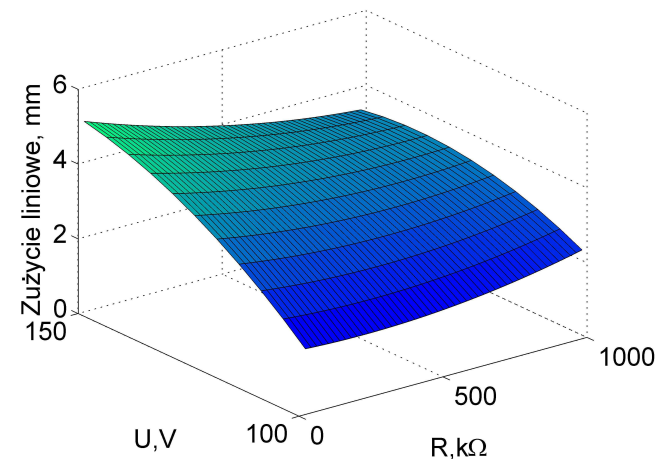
Rys. 5. Przykładowy przebieg zmian mocy w czasie trwania impulsu

Wpływ parametrów elektrycznych obróbki na zużycie elektrod narzędziowych

Po przeprowadzeniu dwóch serii eksperymentalnych zgodnie z planem zaprezentowanym w tab. 2 zmierzono ubytek liniowy materiału elektrody. Jako wskaźnik zużycia elektrody wybrano skrócenie liniowe włókna – zużycie liniowe. Podyktowane to zostało łatwą mierzalnością tego parametru. Poza tym możliwe jest wyliczenie na jego podstawie standardowego parametru objętościowego zużycia elektrody roboczej. Na podstawie wyników, zgodnie z planem, wyznaczono równania opisujące zużycie elektrody w zależności od parametrów wejściowych. Zostały one przeanalizowane pod kątem adekwatności wyznaczonego modelu. W tym celu zastosowano analizę maksymalnego błędu aproksymacji. Założono przy tym, że błąd nie powinien przekraczać ok. 25 % rozpatrywanej wielkości. Przyjęcie tak szerokiego zakresu błędu było podyktowane poziomym ustawieniem elektrody roboczej i związanym z tym wychyleniem elektrody z pozycji nominalnej. Niemniej jednak otrzymane wyniki pozwoliły na wyznaczenie statystycznych modeli zużycia elektrod z zastosowaniem włókien węglowych z pokryciem niklowym. Na podstawie otrzymanych równań wykreślono przykładowe powierzchnie odpowiedzi obrazujące wpływ czynników wejściowych na zużycie – rys. 6 i 7.



Rys. 6. Zależność zużycia liniowego elektrody od pojemności oraz prędkości posuwu, $R=1000 \text{ k}\Omega$, $U=150 \text{ V}$

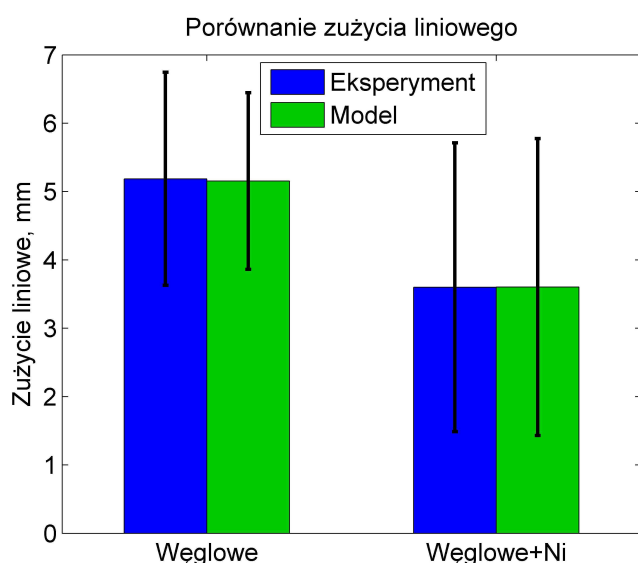


Rys. 7. Zależność zużycia liniowego elektrody od napięcia oraz rezystancji, $V=120 \text{ }\mu\text{m/s}$, $C=511 \text{ pF}$

Analizując rysunki 6 i 7 można stwierdzić, że przy wyższych wartościach pojemności zużycie liniowe elektrody mała. Podobną zależność obserwuje się dla rezystancji. Oba te parametry odpowiadają za częstotliwość pojedynczych wyładowań. Zgodnie z przewidywaniami zarówno napięcie jak i prędkość wpływają proporcjonalnie na zwiększenie zużycia. W przypadku włókien węglowych bez pokrycia uzyskano analogiczny przebieg powierzchni odpowiedzi przy tych samych parametrach. Otrzymane powierzchnie pozwoliły na oszacowanie zużycia liniowego, które w rozpatrywanym zakresie zawierało się w granicach ok. 0 do 7,1 mm. Z kolei dane eksperymentalne wynosiły od 1,2 do 7,3 mm.

Porównanie zużycia elektrod z włókien węglowych i z włókien węglowych pokrywanych niklem

Porównując zużycie liniowe włókien węglowych bez pokrycia i z pokryciem niklowym można zauważyć mniejsze średnie zużycie elektrody, wyznaczone ze wszystkich układów planu eksperymentu – rys. 8.



Rys. 8. Porównanie średniego zużycia liniowego dla włókien węglowych bez pokrycia i z pokryciem niklowym

Na rysunku 8 zaprezentowano również porównanie uśrednionej wartości z równań estymujących. Zarówno dla włókien węglowych bez pokrycia jak i tych z dodatkowym pokryciem niklowym dane z eksperymentów i dane uzyskane z równania (modelu) są zbliżone. Należy jednak zauważyć, że odchylenie standardowe analizowanych wielkości wskazuje na większe oddalenie obserwowanych wartości od wielkości średniej dla włókien z pokryciem niklowym. Uśrednione wyniki wykazują większe zróżnicowanie poszczególnych testów podczas przeprowadzania badań. Niemniej jednak pokrycie niklowe zmniejszyło zużycie elektrody roboczej podczas procesu mikroobróbki elektroerozyjnej. Pomimo niewielkiej wartości wskaźnika R_{ER} , która teoretycznie może być wstępnym wskaźnikiem przydatności materiału na elektrody narzędziowe w obróbce elektroerozyjnej, należy uznać, że warstwa $0,5 \mu\text{m}$ niklu na włóknie węglowym zabezpiecza je przed zużyciem.

Podsumowanie

W przedstawionych badaniach zaprezentowano konstrukcję i technologię elektrod z zastosowaniem pojedynczych włókien o średnicy rzędu $7 \mu\text{m}$, a w przypadku włókien z pokryciem niklowym $7,5 \mu\text{m}$. Umożliwiło to wyko-

nanie serii eksperymentów badających wpływ parametrów obróbki na zużycie włókien węglowych z dodatkowym pokryciem niklowym. Specjalne stanowisko badawcze pozwoliło na rejestrację przebiegów prądowych i napięciowych oraz wyznaczenie przybliżonej zmiany rezystancji kanału plazmowego i rozkładu mocy podczas pojedynczego wyładowania. Zaprezentowane wyniki badań dotyczących użycia włókien węglowych z dodatkowym pokryciem niklowym w funkcji elektrod narzędziowych wykazały mniejsze zużycie takich elektrod w stosunku do włókien węglowych bez pokrycia. Należy jednak zwrócić uwagę, że czas trwania impulsów wyznaczony z przebiegów prądowych był krótszy w przypadku elektrod z pokryciem. Stąd też krótszy czas oddziaływania energii pojedynczego impulsu na materiał elektrody. Jednocześnie amplituda natężenia prądu impulsu w przypadku włókien węglowych z pokryciem była kilkukrotnie wyższa. A zatem mimo wyższych wartości energii dodatkowe pokrycie warstwą niklu korzystnie wpłynęło na zabezpieczenie elektrody roboczej przed erozją.

LITERATURA

1. Korzyński M., *Metodyka eksperymentu: planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa, 2006.
2. Dimov S., Matthews C., Glanfield A., Dorrington P. A roadmapping study in Multi-Material Micro Manufacture. Report, 4M Network of Excellence in Multi-Material Micro Manufacture Project co-funded by the European Commission within the Sixth Framework Programme (2002-2006), 2006.
3. Egashira K., Morita Y., Hattori Y. Electrical discharge machining of submicron holes using ultrasmall-diameter electrodes. *Precision Engineering* 34, 1 (2010), 139 – 144.
4. Weng F.-T., Shyu R., Hsu C.-S. Fabrication of micro-electrodes by multi-EDM grinding process. *Journal of Materials Processing Technology* 140, 1-3 (2003), 332 – 334. Proceedings of the 6th Asia Pacific Conference on Materials Processing.
5. Fleischer J., Masuzawa T., Schmidt J., Knoll M. New applications for micro-EDM. *Journal of Materials Processing Technology* 149, 1-3 (2004), 246 – 249.
6. Weng F.-T., Ho C.-T., Manufacturing of a micro-tungsten carbide electrode using a supersonic-aided electrolysis process 2008 *J. Micromech. Microeng.* 18/3, 1-4
7. Weng F.-T., Fabrication of microelectrodes for EDM machining by a combined etching process, 2004 *J. Micromech. Microeng.* 14/5, 1-4.
8. Kudła L., Ocena właściwości włókien węglowych pod kątem zastosowania na elektrody do mikroobróbki elektroerozyjnej. Zbiór Referatów Szkoły Naukowej Obróbek Erozyjnych KBM PAN, OW PW, 2008, 107–114.
9. Kudła L., Trych A. Testing of Carbon Fibres as Tool Electrodes in Micro Electrical Discharge Machining. *Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems*, vol. 3/4, 153–156.
10. Trych A., Further Study of Carbon Fibres Electrodes in Micro Electrical Discharge Machining, *Procedia CIRP*, Volume 6, 2013, Pages 309-313.
11. Slătineanu L., Dodun O., Santo L., Coteață M. The evaluation of the micromachinability by electrical erosion, *Nonconventional Technologies Review* –no. 1/2008.