

Leszek KUDLA¹

MIKROOBRÓBKA ELEKTROEROZYJNA, LASEROWA I ŚCIERNA W KOREKCJI CZĘŚCI SKRAWAJĄCEJ MINIATUROWYCH WIERTEŁ

Do wiercenia mikrootworów o średnicy mniejszej od 1mm najczęściej stosuje się miniaturowe wiertła o standardowej geometrii części skrawającej, podczas gdy w konwencjonalnym zakresie średnic wykonuje się różne modyfikacje ostrzy, które korzystnie wpływają na proces i rezultaty wiercenia. Przedmiotem niniejszego opracowania jest opis prób zastosowania korekcji do miniaturowych wiertel. W tym celu przeprowadzono badania eksperymentalne wykonywania wgłębień na powierzchni natarcia technikami mikroobróbki elektroerozyjnej, laserowej oraz ścierniej, a następnie dokonano oceny efektywności mikrokształtowania tymi technikami. Wyniki wyrywkowych prób wiercenia potwierdziły korzystny wpływ korekcji geometrii ostrzy na wybrane zjawiska obróbkowe.

1. WPROWADZENIE

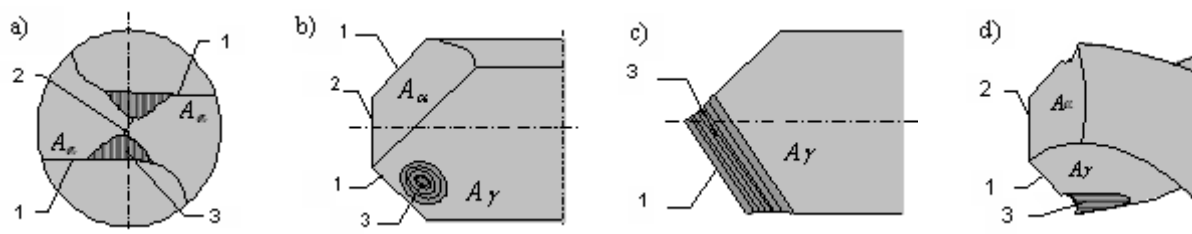
Modyfikacje części skrawającej wiertel w konwencjonalnym zakresie średnic są częstym rozwiązaniem technologicznym, wpływającym korzystnie na przebieg oraz wskaźniki wiercenia i z tego względu określane są jako korekcja geometrii wiertel. Stosuje się różne rodzaje korekcji, np. podcięcia ścina, modyfikacje powierzchni natarcia, głównych krawędzi skrawających, naroży oraz pomocniczej powierzchni przyłożenia. W przypadku wiercenia mikrootworów o średnicy mniejszej od 1mm zdecydowaną większość operacji przeprowadza się wiertłami o standardowej geometrii [1]. Z jednej strony jest to spowodowane trudnościami technologicznymi w wykonaniu modyfikacji, zaś z drugiej przekonaniem, że nie odgrywają one istotnej roli w przypadku mikrowiertel, ze względu na znikome wymiary korygowanych powierzchni i krawędzi. Podawany jest także inny argument, że w wyniku adhezji materiału obrabianego do powierzchni narzędzia następuje zamykanie utworzonych niewielkich nacięć lub wgłębień, czyli samoistne eliminowanie wprowadzonych zmian. Jedynym rodzajem modyfikacji, wykonywanym przez producentów narzędzi, jest podcinanie łysinki w mikrowiertłach przeznaczonych do wiercenia otworów w wielo-warstwowych płytkach drukowanych, mające na celu redukcję tarcia i ciepła generowanego podczas wiercenia. Niektóre z przytoczonych wątpliwości wymagają weryfikacji eksperymentalnej, natomiast rozwój technik kształtowania mikroelementów usunął barierę technologiczną i stworzył realne możliwości modyfikacji także w przypadku

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Zakład Technologii Wyrobów Precyzyjnych i Elektronicznych

miniaturowych wiertel [2],[3]. Argumentem przemawiającym za zmianami geometrii mikrowiertel przy ich wytwarzaniu jest również sposób eksploatacji, zwykle przez pojedynczy okres trwałości.

2. TECHNIKI MIKROKSZTAŁTOWANIA

Za główne wady standardowej geometrii miniaturowych wiertel można uznać dużą względną długość ścina w wiertłach krętych i piórkowych, zerową lub ujemną wartość kąta natarcia w wiertłach piórkowych i działowych, a także w większości przypadków brak łysinek prowadzących. Wykonywanie prostych zmian kształtu części wierzchołkowej mikrowiertel o średnicach 0,1-1mm nie stanowi problemu przy wykorzystaniu znanych sposobów mikroobróbki ścierniej. Są to podcięcie ścina w wiertle krętym i piórkowym, wykonanie rowka wzdłuż głównej krawędzi skrawającej w wiertle działowym lub rowka przy narożu, równoległego do pomocniczej krawędzi skrawającej, który można zastosować we wszystkich odmianach konstrukcyjnych mikrowiertel (rys. 1).



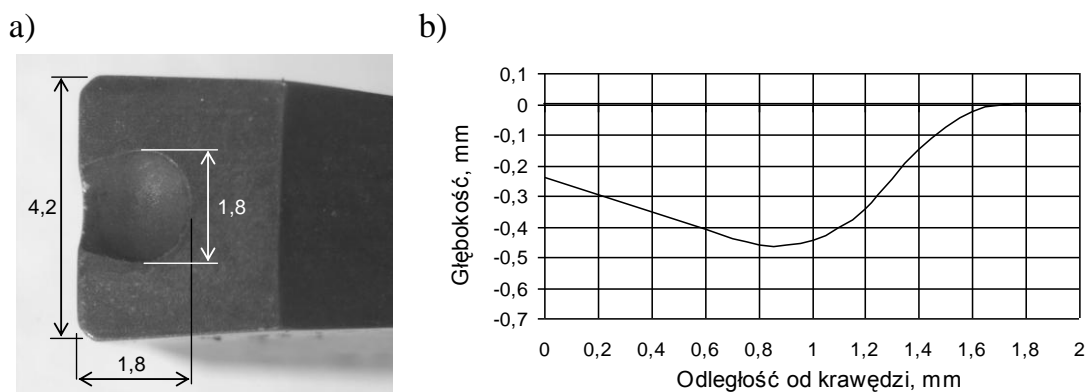
Rys. 1. Przykłady możliwych modyfikacji: a) podcięcie ścina w wiertle krętym b) półkuliste wgłębienie na powierzchni natarcia A_γ w wiertle piórkowym, c) walcowy rowek na powierzchni A_γ wzdłuż głównej krawędzi skrawającej w wiertle działowym, d) rowek przy narożu równoległy do pomocniczej krawędzi skrawającej:

1 – główna krawędź skrawająca, 2 – ścin, 3 – modyfikacja

Fig. 1. Examples of possible modifications of twist, spade and D-shaped microdrills: a) undercut of chisel edge in twist microdrill, b) shell-like cavity on face surface in spade microdrill, c) cylindrical groove on face surface A_γ along major cutting edge in D-shaped microdrill, d) groove by corner along minor cutting edge; 1 - major cutting edge, 2 - chisel edge, 3 - modified surface

Niektóre typy korekcji są trudniejsze do wykonania. Należy do nich specjalne ukształtowanie powierzchni natarcia (A_γ). Jak wiadomo, w płytkach wielostrzowych do narzędzi skrawających składanych, powierzchnie natarcia mogą posiadać bardzo złożoną geometrię, stosowaną w celu wywołania dodatkowych naprężeń w formowanym wiórze. Najprostszym przypadkiem jest obecność wgłębienia na powierzchni natarcia w płytkach do przecinania i toczenia rowków (rys. 2). Takie wgłębienie powoduje odkształcenie i usztywnienie wióra, a w rezultacie ułatwienie odprowadzania go ze strefy skrawania oraz zmniejszenie tarcia o powierzchnię obrobioną. Są to czynniki pożądane także w przypadku wiercenia mikrootworów i z tego względu do badań porównawczych wybrano ten typ modyfikacji. W przypadku wiertel piórkowych i działowych należy również oczekiwać zmniejszenia oporów skrawania wskutek utworzenia dodatkiego kąta natarcia na pewnym

odcinku przy głównej krawędzi skrawającej. Wgłębienie na powierzchni A_γ nie powinno spowodować istotnego osłabienia ostrzy pod względem wytrzymałości na zużycie i wytrzymałości doraźnej [4].



Rys. 2. Płytko do przecinania i toczenia rowków: a) widok powierzchni natarcia, b) profil wgłębienia
Fig. 2. Insert for parting and grooving: a) view of face surface, b) shape of cavity

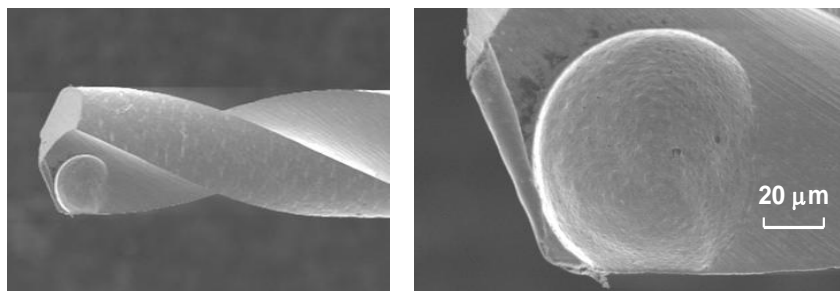
Modyfikację ostrzy mikrowiertel o standardowej geometrii można przeprowadzić stosując nie tylko precyzyjne techniki mikroobróbki ścierniej, lecz także mikroobróbkę elektroerozyjną μ EDM (*Micro Electric Discharge Machining*), laserową, roztwarzanie chemiczne lub elektrochemiczne, a nawet obróbkę wiązką elektronów czy zogniskowaną wiązką jonów. Każdą z nich charakteryzują określone wady i zalety, dotyczące wydajności, osiąganych minimalnych wymiarów, kosztów obróbki, dokładności i chropowatości kształtowanych powierzchni oraz zmian struktury materiału obrabianego [5],[6],[7]. W celu bezpośredniego porównania wskaźników technologicznych próby kształtowania półkulistych wgłębień na powierzchni natarcia wiertel krętych wykonano różnymi technikami – przez mikrodrażenie elektroerozyjne, drażenie laserowe oraz techniką mikroobróbki ścierniej.

3. MIKRODRAŻENIE ELEKTROEROZYJNE

Próby wykonania wybranej modyfikacji techniką μ EDM przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym, zainstalowanym na mikroskopie warsztatowym. Mechanizmy pomiarowe mikroskopu umożliwiły poprawne pozycjonowanie mikrowiertel względem elektrody roboczej, wykonanej z węglików spiekanych lub ze stali szybkotnącej. Jako dielektryk stosowano naftę kosmetyczną. Do zasilania układu roboczego wykorzystano generator typu RC.

Wartości parametrów elektrycznych były następujące: napięcie zasilania generatora $U_z=90\div 120V$, rezystancja $R=47\div 330k\Omega$, pojemność $C=22\div 470pF$. Teoretycznie kombinacje podanych wartości zapewniały energię pojedynczych wyładowań w zakresie

$E_s=0,1\div 1,5\mu\text{J}$. Wykonywane wgłębienia miały właściwy kształt, przy czym na podkreślenie zasługuje zwłaszcza dobra jakość krawędzi (rys. 3).



Rys. 3. Półkuliste wgłębienie na powierzchni natarcia wykonane techniką μEDM w stalowym wiertle krętym o średnicy $d=0,20\text{mm}$

Fig. 3. Shell-like cavity on face surface of steel microdrill with diameter $d=0,20\text{mm}$ machined using μEDM

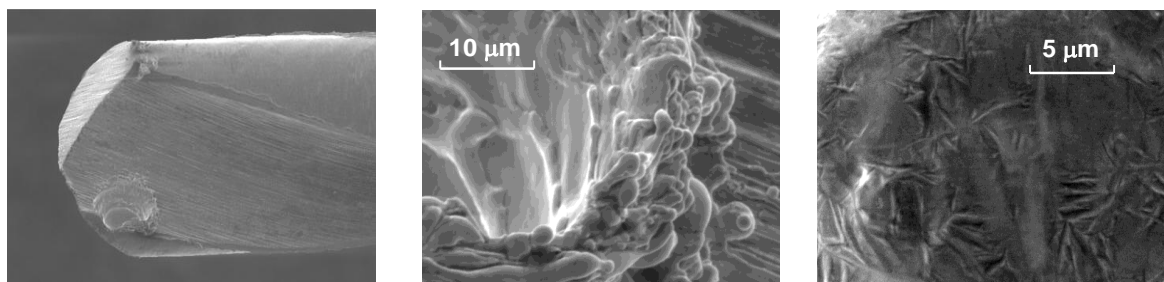
Chropowatość powierzchni, wyznaczona dla wgłębień płaskich, wynosiła $Ra=0,05\div 0,12\mu\text{m}$, zależnie od parametrów drażenia. Za wadę tej techniki można uznać długi czas obróbki, rzędu kilku do kilkunastu minut.

4. MIKRODRAŻENIE LASEROWE

Modyfikacje techniką laserową wykonano laserem Nd:YAG, model 5200, firmy Electro Scientific Industries Inc. (USA). Jest to laser pompowany diodami, generujący wiązkę światła ultrafioletowego o długości fali $\lambda=355\text{nm}$, z przeznaczeniem do wykonywania przelotowych i nieprzelotowych mikrootworów w płytkach drukowanych wielowarstwowych. Podana długość fali promieniowania jest dobrze absorbowana przez wiele materiałów, takich jak stopy metali, tworzywa sztuczne a nawet szkło. Średnia moc wiązki wynosiła około 2W, przy energii pojedynczych impulsów $E_s=0,4\text{mJ}$ oraz częstotliwości repetycji $f=5\text{kHz}$. Utworzenie wgłębienia następowało w wyniku wykonania serii impulsów, rozmieszczonych wzdłuż linii spiralnej [8].

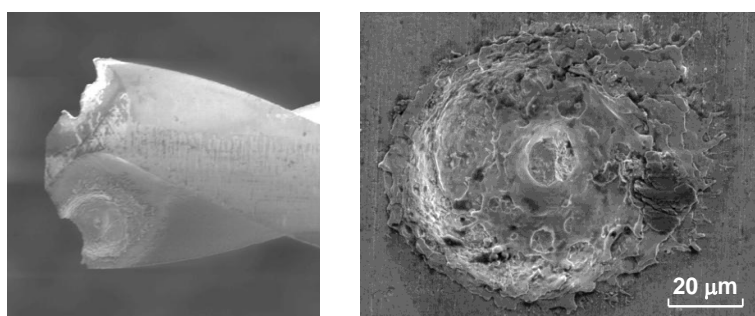
Należy zastrzec, że parametry pracy lasera nie były optymalne dla obróbki elementów stalowych lub z węglików spiekanych. Między innymi z tego powodu wgłębienia wykonane laserowo posiadały wadliwy kształt (rys. 4). W przypadku wiertel stalowych materiał został stopiony, ale częściowo ponownie skryształizował na dnie wgłębienia. Znaczna część materiału została wyrzucona, tworząc po zastygnięciu pofalowania na jego ściankach i krawędzi. Są to zniekształcenia charakterystyczne dla obróbki laserowej, w której dominuje intensywny proces likwacji.

Zupełnie inny kształt wgłębienia powstał przy obróbce w tych samych warunkach wiertel z węglików spiekanych pokazano na rysunku 5. Próba wykonania modyfikacji bezpośrednio przy ostrzach spowodowała znaczne uszkodzenia krawędzi skrawających oraz zmiany termiczne materiału narzędzia. Wykonane następnie na części chwytowej wgłębienie kontrolne, miało kształt pierścieniowego rowka ze wzniesieniem pośrodku.



Rys. 4. Wgłębienie na powierzchni natarcia wykonane techniką laserową w stalowym wiertle krętym o średnicy $d=0,30\text{mm}$ oraz powiększenia krawędzi i dna wgłębienia

Fig. 4. Machined by laser cavity on face surface of steel twist microdrill with diameter $d=0,30\text{mm}$ and magnification of edge and bottom of cavity



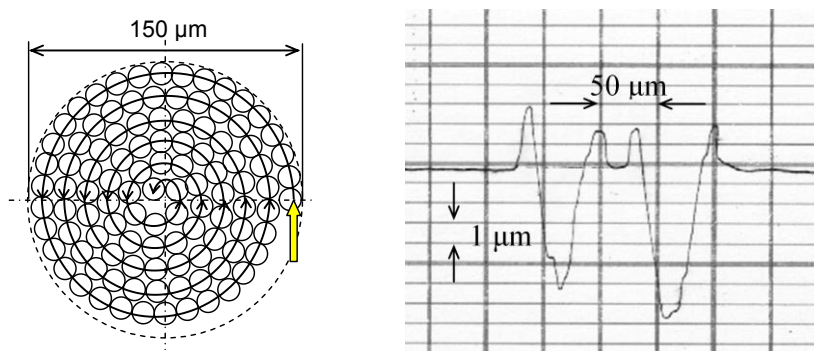
Rys. 5. Wgłębienia wykonane techniką laserową w wiertle krętym o średnicy $d=0,20\text{mm}$ z węglików spiekanych; z lewej na powierzchniach natarcia, z prawej na części chwytowej

Fig. 5. Machined by laser cavities in carbides twist microdrill with diameter $d=0,20\text{mm}$; on left on face surface by major cutting edges and on right on shank

Kształt ten jest konsekwencją spiralnej serii impulsów (rys. 6). W przypadku wykonywania wgłębienia w wiertłach stalowych nie miało to znaczenia, gdyż prawdopodobnie temperatura w centrum osiągnęła wartość wystarczającą do pełnego stopienia materiału.

Natomiast powierzchnia wgłębienia wykonanego w wiertle z węglików spiekanych ukazuje geometrię całej serii. Zauważalne są także ślady pojedynczych impulsów w postaci mikro-kraterów o wymiarach zbliżonych do $10\mu\text{m}$. Chropowatość powierzchni jest z pewnością większa niż widocznej dookoła wgłębienia powierzchni początkowej, ukształtowanej fabrycznie w procesie szlifowania.

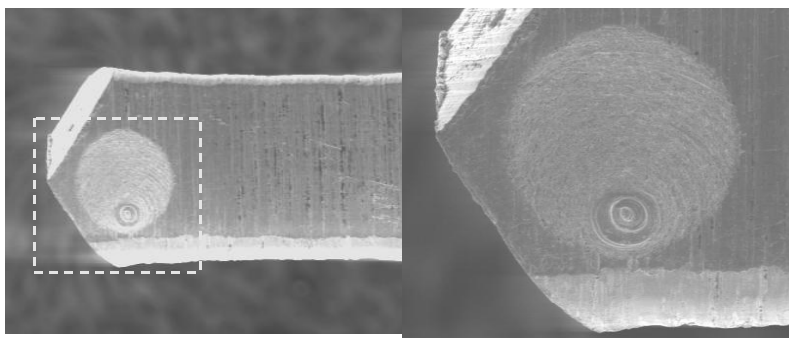
Pomimo tego, że drążenie laserowe nie zapewniło wystarczająco dobrej jakości powierzchni i krawędzi wgłębienia, należy sądzić, że jest to technika perspektywiczna, ale wymaga dokładnej optymalizacji parametrów i warunków mikroobróbki. Kolejną możliwość poprawy rezultatów stwarza zastosowanie laserów o impulsach nanosekundowych, które powinny spowodować wzrost udziału zjawisk parowania oraz ablacji w całym procesie, redukując tym samym zakres topnienia i powtórnego krzepnięcia materiału. Zalety mikroobróbki laserowej to bardzo krótki czas kształtowania i brak mechanicznego oddziaływania na delikatny przedmiot obrabiany, którym jest w tym przypadku mikrowiertło.



Rys. 6. Ilustracja sekwencji drażenia techniką laserową oraz profil wgłębienia o średnicy 150µm wykonanego testowo na części chwytowej wiertła z węglików spiekanych
 Fig. 6. Illustration of laser machining cycle and cross-section profile of test cavity with diameter of 150µm machined by laser in carbides twist microdrill on its shank

5. MIKROKSZTAŁTOWANIE ŚCIERNE

Oczywistym rozwiązaniem jest modyfikowanie geometrii części skrawającej technikami mikroobróbki ścierniej, ponieważ są one stosowane do wytwarzania nawet najmniejszych mikrowiertel. Praktyczne próby zostały wykonane narzędziami w postaci trzpieni oraz pastami diamentowymi. Pasty o coraz drobniejszych ziarnach zapewniły zarówno wysoką wydajność obróbki jak i wymaganą jakość kształtowanych powierzchni. Trzpienie o średnicy części roboczej 0,1-0,2mm zostały wykonane z węglików spiekanych. Wierzchołek miał kształt kulisty.



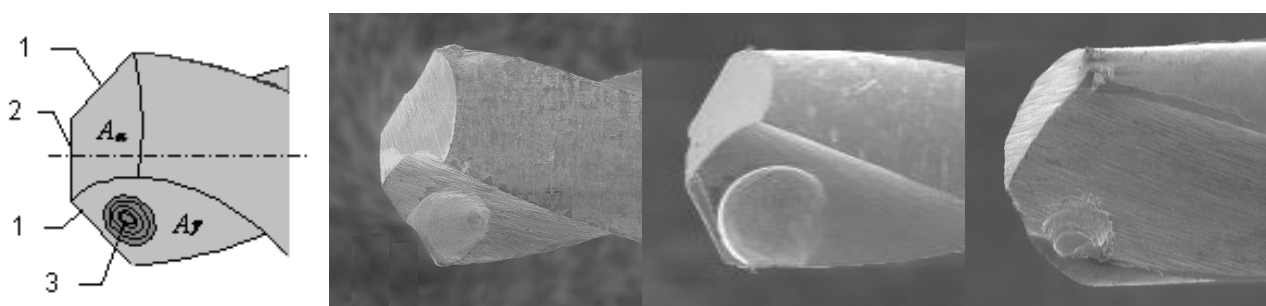
Rys. 7. Stalowe mikrowiertło piórkowe o średnicy $d=0,235\text{mm}$ z półkulistym wgłębieniem na powierzchni A_r wykonanym techniką ścierną
 Fig. 7. Cavity on face surface of spade steel microdrill with diameter $d=0.235\text{mm}$ machined using abrasive technique

Prędkość obrotowa wrzeciona wynosiła $n \approx (30 \div 40) \cdot 10^3 \text{ obr/min}$, czyli przy średnicy 0,1mm prędkość obróbki $v \approx 9 \div 12 \text{ m/min}$. Ruch posuwu realizowano ręcznie, obserwując strefę obróbki przez mikroskop. Konfiguracja trzpienia względem powierzchni natarcia powinna zapewniać zbliżoną wartość prędkości mikroobróbki ścierniej na całej powierzchni

kształtowanego wgłębienia, co wymaga prawie stycznego ustawienia trzpienia względem powierzchni natarcia. Jeśli trzpień jest ustawiony pod większym kątem, to powstaje charakterystyczny ślad na dnie wgłębienia, ponieważ w pobliżu osi obrotu prędkość liniowa jest bardzo mała (rys. 7).

6. PODSUMOWANIE

Próby technologiczne korekcji geometrii ostrzy przeprowadzono przy wartościach parametrów technologicznych, dobranych na podstawie informacji literaturowych, przy użyciu dostępnych środków technicznych. Jak się okazało, w niektórych przypadkach nie były one właściwe, co stwarza potrzebę optymalizacji procesów w celu poprawy końcowych rezultatów. Tym nie mniej można uznać, że wyniki badań są pozytywne, gdyż możliwość wprowadzania zmian geometrii ostrzy mikrowiertel została zweryfikowana praktycznie (rys. 8). Przy realizacji każdej techniki mikrokształtowania duże problemy stwarzało właściwe i dokładne pozycjonowanie ostrzy mikrowiertła względem narzędzi. Zgodnie z oczekiwaniami, w warunkach laboratoryjnych, najlepsze wyniki uzyskano techniką mikroobróbki ścierniej, a następnie elektroerozyjnej – tabela 1.



Rys. 8. Porównanie najlepszych wgłębień wykonanych: a) techniką mikroobróbki ścierniej, b) przez drążenie elektroerozyjne, c) przez drążenie laserowe; średnice wiertel $0,20 \pm 0,30$ mm

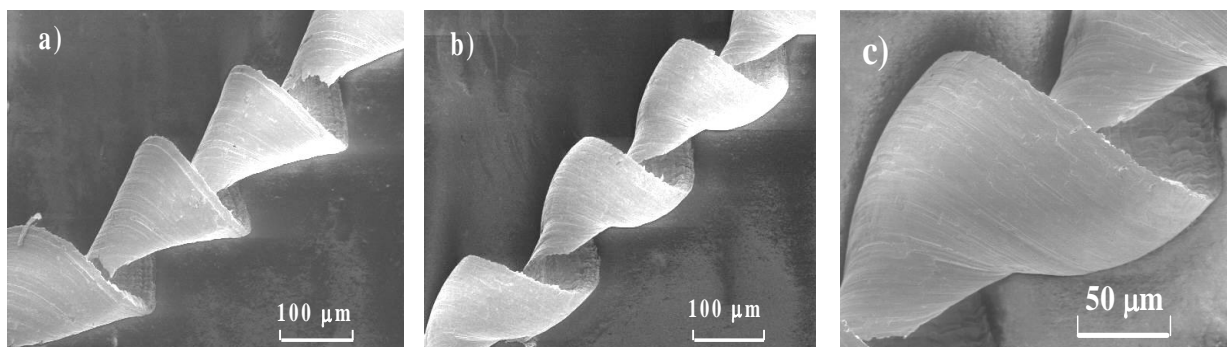
Fig. 8. Comparison of best cavities machined with: a) abrasive micromachining, b) μ EDM, c) laser machining; diameters of drills 0.20 ± 0.30 mm

Tabela 1. Zestawienie ogólnych wyników mikrokształtowania wgłębień na powierzchniach natarcia w mikrowiertłach
Table 1. Specification of general results for micromachining of shell-like cavities on face surface in microdrills

Technika kształtowania	Czas obróbki	Dokładność kształtu	Jakość powierzchni	Jakość krawędzi	Zmiany cieplne
Ścierna	sekundy	+	++	+	brak
μ EDM	minuty	+	+	+	niewielkie
Laserowa	< 1 s	-	-	-	duże

Wysoka gładkość powierzchni po modyfikacji technikami mikroobróbki ścierniej nie jest regułą. Dotyczy to zwłaszcza wgłębień i rowków kształtowanych narzędziem w postaci

trzczenia. Jak już wspomniano, wadą mikroobróbki elektroerozyjnej jest dosyć długi czas kształtowania. Z kolei drażenie laserowe nie zapewniło wystarczająco dobrej jakości powierzchni i krawędzi wgłębienia. Jednakże wydaje się, że po optymalizacji procesu może być dobrym sposobem, zwłaszcza przy modyfikacji geometrii mikrowiertel o średnicach mniejszych od 0,1mm.



Rys. 9. Porównanie kształtu wiórow formowanych wiertłem krętym $d=0,345$ mm: a) o standardowej geometrii, b) i c) z półkulistym wgłębieniem na powierzchni A_r , powstających przy wierceniu w mosiądzu M59.
Fig. 9. Chips produced when drilling in brass CuZn39Pb1 using twist microdrills $d=0.345$ mm: a) having standard geometry of cutting part, b) and c) with additional shell-like cavity on rake surface.

Wrywkowe próby wiercenia mikrowiertłami o standardowej i zmienionej geometrii potwierdziły korzystny wpływ modyfikacji powierzchni natarcia na proces formowania wióra, którego szerokość dla wiertła o średnicy $d=0,345$ mm zmniejszyła się z około $120\mu\text{m}$ do wartości $85\div 110\mu\text{m}$ (rys. 9) [9].

LITERATURA

- [1] KUDŁA L., 2009, *Specyfika procesu wiercenia mikrootworów*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika, 228, OW PW, Warszawa.
- [2] MASUZAWA T., 2000, *State of the Art of Micromachining*, CIRP Annals, 49/2/, 473-488.
- [3] OCZOŚ K. E., 1999, *Kształtowanie mikrocześci – charakterystyka sposobów mikroobróbki i ich zastosowanie*, Mechanik, 5-6, 107-114.
- [4] KUDŁA L., 2011, *Experimental investigation into fracture of microdrills in static and dynamic conditions*, Engineering Fracture Mechanics, 78/1, 1-12.
- [5] RUSZAJ A., 1999, *Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi*, Prace Instytutu Obróbki Skrawaniem, Kraków.
- [6] RAJURKAR K. P., YU Z. Y., KOZAK J., 2003, *Micromachining by EDM and ECM*, Proc. of the 1st Int. CIRP Sem. on Micro and Nano Technology, Copenhagen, 13-14 Nov., 45-48.
- [7] KUDŁA L., 2008, *Investigation into micromachining techniques applied for improvement of the geometry of microdrills*, Proc. of 3rd Int. Conf. CIRP-HPC. June 12-13th, Dublin, Ireland, 2, 529-538.
- [8] FALIŃSKI W., STĘPLEWSKI W., 2006, *Formowanie mikrootworów w płytkach drukowanych przy użyciu techniki laserowej*, Prace Szkoły Naukowej Obróbek Erozyjnych KBM PAN, 12, 47-56.
- [9] KUDŁA L., 2006, *Machining Properties of Microdrills with Modified Cutting Part*, Proceedings of the 6th euspen International Conference on Precision Engineering and Nanotechnology, Baden bei Wien, Vienna, Austria, II, 160-163.

EFFECTIVENESS OF ELECTRO-DISCHARGE, LASER AND ABRASIVE MICROMACHINING TECHNIQUES BY MODIFICATION OF CUTTING PART OF MICRODRILLS

Topic of reported work is the investigation into micromachining techniques applied for improvement of the geometry of microdrills with diameters of less than 1 mm. The majority of the microdrilling operations is executed with the microdrills having a standard geometry. However, the standard geometry of microdrills may be additionally modified for better microdrilling performance. Possible alterations of the microdrills' geometry could be very diverse but always they need only a slight material removal. Therefore, it is a typical problem for micromachining. Selected techniques suitable for this purpose, as such as electro-discharge, laser and abrasive micromachining, have been experimentally tested and discussed. For comparison of mentioned techniques, producing of the shell-like cavity on the face surface was selected. As a result of investigation into modification techniques, a verification of drilling processes, done without and with modifications of the microdrills, has been performed. In general, the results of the investigation are very promising.