

Techniki wykonywania mikrootworów (1)

Sposoby mechaniczne

Leszek Kudła

Dokonano przeglądu metod wykonywania mikrootworów w tworzywach konstrukcyjnych. W tej części przedstawiono najważniejsze sposoby mechaniczne, zaliczane do obróbki plastycznej, skrawaniem i ściernej. Są to techniki stanowiące zminiaturyzowane odmiany dziurkowania, wygniatania, wiercenia mikrowiertłami, obróbki rotacyjno-ściernej i drążenia ultradźwiękowego.

Mikrootwory wykonuje się w różnych elementach konstrukcyjnych urządzeń elektronicznych, mechanicznych, przepływowych i optycznych. Przykładami mogą być płytki obwodów drukowanych, panewki łożyskowych zegarowych, rozpylacze paliwa, dysze gazowe i dysze drukarek atramentowych. Są one wytwarzane w skali wielkoseryjnej lub nawet masowej. Znaczny obszar zastosowań elementów z mikrootworami stanowią wyspecjalizowane narzędzia lub elementy przyrządów i urządzeń, wykorzystywanych w produkcji, medycynie oraz aparaturze pomiarowej i badawczej. Określenie mikrootwór najczęściej odnosi się do wymiarów poprzecznych otworu mniejszych od 1 mm, ale pojawiają się też inne wartości graniczne. np. 100 μm , 0,5 mm i 2 mm [1]. Zależnie od stosunku długości do średnicy (lub innego wymiaru poprzecznego), mikrootwory można określać jako płytkie ($l/d < 3$), zwykłe ($3 \leq l/d \leq 7$) oraz długie ($l/d > 7$). Techniki wykonywania mikrootworów są bardzo zróżnicowane. Ich szczegółowy opis znacznie przekroczyłby ramy tego artykułu. Niektóre zostaną tylko zasygnalizowane, a wybrane scharakteryzowane dokładnie. W tej części przedstawiono sposoby mechaniczne, w następnej zostaną opisane sposoby erozyjne.

Metody wykonywania mikrootworów

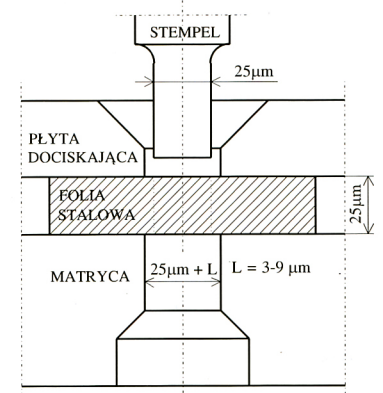
Otwory o wymiarach mniejszych niż 1 mm można kształtować bezpośrednio, w procesach objętościowego formowania elementów z ciekłego

metal, ze szkła, z proszków metali lub ceramiki oraz z tworzyw sztucznych, umieszczając w formach odpowiednie rdzenie. Inne sposoby wykonywania mikrootworów polegają na wykorzystaniu zjawisk powodujących usuwanie materiału (subtrakcję). Można je przyporządkować najważniejszym technikom wytwarzania: obróbce plastycznej (np. dziurkowanie), obróbce skrawaniem (np. wiercenie), obróbce ściernej (np. drążenie udarowo-ścierne) i obróbkom erozyjnym (trawienie fotochemiczne, drążenie elektroerozyjne, laserowe itd). Istnieją też techniki hybrydowe, polegające na łączeniu różnych sposobów w jednym procesie. W ostatnich dwu dekadach nastąpił dynamiczny rozwój nowych technologii, przedtem stosowanych w mikroelektronice. Są to techniki wytwarzania zintegrowanych mikrosystemów mechaniczno-elektronicznych, w których wykonuje się także mikrootwory [2, 3]. Inną oryginalną metodą jest perforowanie ultracienkich folii z tworzyw sztucznych rozprężonymi jonami ciężkich pierwiastków, umożliwiające wykonywanie membran z otworami o wymiarach 0,02 – 100 μm [4].

Sposoby obróbki plastycznej

Sposobami obróbki plastycznej, stosowanymi do wykonywania mikrootworów, są: dziurkowanie (wykrawanie) oraz wygniatanie (wgłębianie) [5]. Przy dziurkowaniu krawędzie stempla i płyty tnącej ściskają materiał, wywołując znaczne naprężenia wzdłuż linii cięcia. Następuje lokalne plastyczne odkształcenie ma-

teriału, a w dalszej kolejności powstanie mikropęknięć, które łącząc się prowadzą do naruszenia spójności. Materiał znajdujący się wewnątrz zarysu otworu zostaje w całości oddzielony od elementu w postaci tzw. odpadu. Zwykle w jednym takcie wykonuje się nawet kilkaset otworów. Narzędzia są wtedy bardzo rozbudowane, a przez to także kosztowne. Z tego względu dziurkowanie stosuje się głównie w warunkach produkcji masowej lub wielkoseryjnej. W taki sposób od dawna kształtuje się otwory łożyskujące w płytach montażowych w zwykłych płytkach drukowanych (bez metalizacji ścianek). Ze względu na wytrzymałość stempli, długość otworu (grubość materiału) nie powinna być większa od jego wymiarów poprzecznych. Dlatego tworzywa konstrukcyjne w tym przypadku najczęściej mają postać arkuszy, taśm lub folii. Obecnie w wyniku postępów miniaturyzacji możliwe jest wykonywanie mikrootworów walcowych lub kształtowych o wymiarach poprzecznych rzędu kilkudziesięciu mikrometrów [6, 7]. Na rys. 1 przedstawiono warunki perforowania folii ze stali



Rys. 1. Układ strefy roboczej tłoczni do wykonywania mikroperforacji w folii stalowej wg [6]

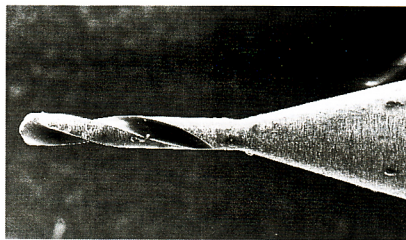
Leszek Kudła jest pracownikiem Instytutu Inżynierii Precyzyjnej i Biomedycznej Politechniki Warszawskiej

nierdzewnej narzędziami z węglików spiekanych, podane w publikacji [6]. Obróbkę prowadzono z bardzo małą prędkością ruchu stempla wynoszącą $\sim 150 \mu\text{m}/\text{min}$. Wartość siły cięcia wynosiła 1,3 – 2 N, zależnie od luzu między stemplem i matrycą (L). Geometria mikrootworu jest taka jak przy typowym procesie dziurkowania. Próby aplikacji tej techniki perforowania dotyczą różnych wariantów konstrukcyjnych dysz drukarek atramentowych oraz przesłon optycznych (tzw. *pinhole*).

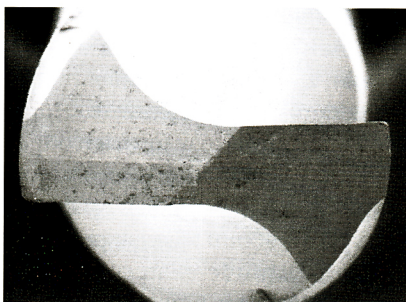
Drugi sposób – wygniatanie – polega na odkształcaniu plastycznym materiału (stopu metali) przez wgłębianie stempli o stopniowo zwiększanej smukłości [5]. Umożliwia wykonywanie otworów walcowych, stożkowych oraz kształtowych o wymiarach poprzecznych mniejszych nawet niż $50 \mu\text{m}$. Wygniatanie było dawniej szeroko wykorzystywane do produkcji sit z precyzyjną perforacją oraz przesłon optycznych i dysz przędzalniczych [8], najczęściej w połączeniu z obróbką ścierną (ścinięcie wybrzuszeń i zadziórów) lub trawieniem chemicznym. Obecnie zakres zastosowań tego sposobu jest niewielki.

Wiercenie

Wiercenie mikrootworów jest sposobem obróbki skrawaniem, gdyż nadmiar materiału jest usuwany w postaci bardzo drobnych wiórow. Wiercenie należy do sposobów bardzo uniwersalnych. Decyduje o tym dostępność miniaturowych wiertel, które są wytwarzane seryjnie, oraz prostota i efektywność obróbki. Ograniczenia dotyczą tylko właściwości mechanicznych materiału obrabianego. Chodzi o zapewnienie bezpiecznego odstępu między obciążającymi wiertło siłami skrawania a jego wytrzymałością mechaniczną. Wiercenie mikrootworów wykonuje się wiertłami krętymi, piórkowymi lub działowymi. Najmniejsze produkowane seryjnie wiertła kręte mają średnicę $40 \mu\text{m}$. Z powodu prostszej geometrii do wiercenia otworów o średnicy równej nawet pojedynczym mikrometrom stosuje się wiertła piórkowe. Na fot. 1 pokazano część skrawającą mikrowiertła kręte-



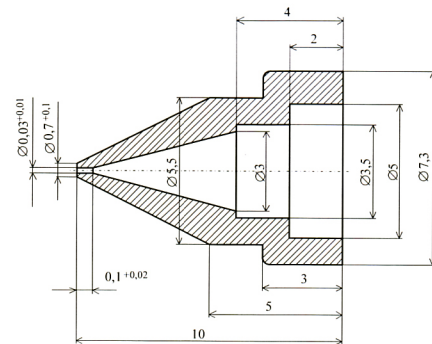
Fot. 1. Wiertło kręte o średnicy $80 \mu\text{m}$ ze stali szybko tnącej



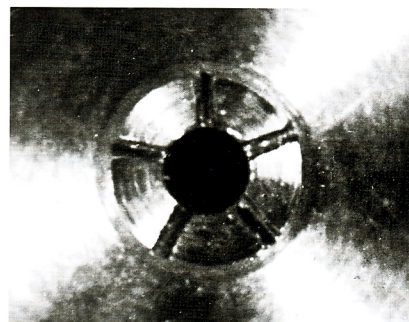
Fot. 2. Widok części wierzchołkowej wiertła o średnicy $0,5 \text{ mm}$ z węglików spiekanych

go, zaś na fot. 2 część wierzchołkową, z typowym szlifem płaskim (dwuszciniowym) powierzchni przyłożenia. Problem wytrzymałości i trwałości miniaturowych wiertel jest stale przedmiotem badań i owocuje nowymi rozwiązaniami technicznymi, takimi jak wiercenie z posuwem mikroskokowym [9] czy z detekcją stopnia zużycia narzędzia oraz fazy poprzedzającej złamanie [10]. Pomimo prostoty realizacji wiercenie mikrootworów jest procesem złożonym, o wzajemnym oddziaływaniu różnych cech obrabiarki, narzędzia i warunków technologicznych. Bardzo ważnym czynnikiem jest np. zapewnienie współosiowości mikro-wiertła i wrzeciona, wpływającej na wartość błędu rozbicia i na charakter obciążeń narzędzia [11]. Zakres stosowanych w różnych przypadkach prędkości obrotowych wynosi od 10^2 do ponad $10^5 \text{ obr.}/\text{min.}$, zaś posuwu od $1 - 100 \mu\text{m}/\text{obr.}$. W procesie obróbki, oprócz skrawania ostrzami, istotną rolę odgrywa deformowanie materiału przez ścin o zwiększonej długości względnej [12]. Dawniej rozwój techniki wiercenia mikrootworów był związany z przemysłem precyzyjnym, zaś ostatnio głównie z przemysłem elektronicznym (wytwarzanie płytek drukowanych o wysokich klasach dokładności). Wiercenie jest też powszechnie stosowane do wykonywania mikrootworów

w elementach przepływowych, takich jak dysze, zwężki i kapilary. Na rys. 2 i fot. 3 przedstawiono przykłady elementów mechanicznych z mikrootworami wykonywanymi przez wiercenie.



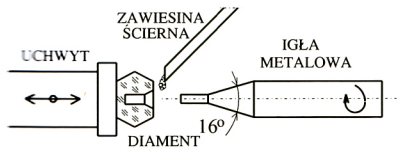
Rys. 2. Konstrukcja mikrokapilary dozującej z otworem $30 \mu\text{m}$



Fot. 3. Przekrój części sferycznej wtryskiwacza paliwa; średnica otworków rozpylających $0,25 \text{ mm}$

Sposoby obróbki ścierniej

Mikrootwory można również wykonywać stosując obróbkę ścierną. Narzędzie ma postać metalowej igły i realizuje ruch obrotowy (kształtowanie ściernie rotacyjne) lub drgający (drażnienie udarowo-ściernie albo ultradźwiękowe). Między narzędzie a przedmiot doprowadza się zawieszinę zawierającą ziarna materiału ściernego i wywiera odpowiedni nacisk. Ziarna, uzyskując energię kinetyczną od narzędzia, uderzają narożami o powierzchnię obrabianą powodując mikroskrawanie lub wykruszanie drobin materiału. Wykonywanie walcowych otworów wirującymi igłami i proszkiem ściernym jest jednym z najstarszych sposobów. Jeszcze do niedawna był on masowo stosowany przy wytwarzaniu panewek łożyskowych i ciągadeł diamentowych (rys. 3). Obróbkę najmniejszych otworów (o średnicach mniejszych



Rys. 3. Schemat wykonywania otworu w ciągadle sposobem obrotowo-ściernym

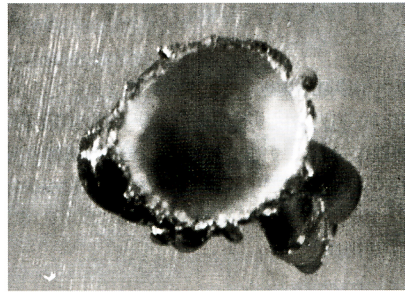
niż 0,3 mm) przeprowadzano igłami i luźnym ziarnem ściernym, zaś większych ściernicami trzpieniowymi diamentowymi o spoiwie metalowym spiekany (CuSn) lub galwanicznym (Ni) [13]. Ściernice do bezpośredniego kształtowania otworów w pełnym materiale (zwane niekiedy potocznie „wiertłami diamentowymi”) powinny mieć powiększoną grubość nasypu czołowego (fot. 4). Pomimo



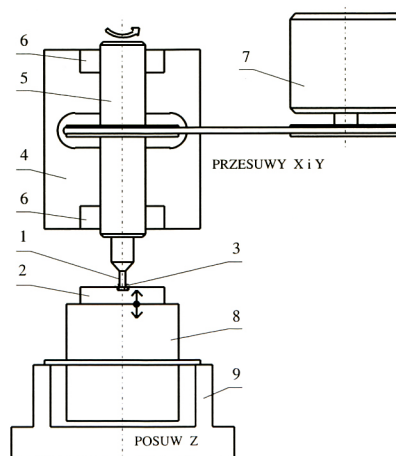
Fot. 4. Ściernica trzpieniowa diamentowa o średnicy 0,7 mm

stosowania dużych prędkości obrotowych (większych od 10^4 obr/min) wydajność objętościowa obróbki jest niewielka. Mała wydajność charakteryzuje także drążenie ultradźwiękowe, ale jego istotną zaletą jest możliwość wykonywania otworów o dowolnym przekroju poprzecznym, gdyż powstające zagłębienie odwzorowuje kształt narzędzia. Najlepsze wskaźniki obróbki ultradźwiękowej uzyskuje się przy drążeniu otworów w materiałach kruchych, takich jak szkło, ceramika, ferryty, krzem. Zwykle kompleks narzędzia składa się z przetwornika, mechanicznego wzmacniacza amplitudy (koncentratora) oraz narzędzia roboczego (erody). Elementy składowe muszą mieć wymiary dopasowane do długości fali dźwięku, co zapewnia uzyskanie na czole drgań o amplitudzie 20 - 25 μm [14]. Oprócz uprzywilejowanych drgań osiowych, w układzie narzędzia mogą powstawać niekontrolowane drgania poprzeczne. Powodują one zniekształcenie otworu, zaś nadmier-

ne naciski oraz brak odpowiednich zabezpieczeń prowadzą do znaczącego wykruszania krawędzi (fot. 5).



Fot. 5. Zniekształcenia otworu o średnicy ~0,35 mm w szkle sodowym, drążonego ultradźwiękowo



Rys. 4. Schemat mikroobróbki ultradźwiękowej wg [15]: 1) narzędzie robocze, 2) przedmiot, 3) zawieszina ścierna, 4) support X-Y, 5) wrzeciono, 6) łożyska, 7) silnik, 8) przetwornik ultradźwiękowy, 9) stół z posuwem roboczym

Drgania ultradźwiękowe może także wykonywać przedmiot obrabiany. Na rys. 4 przedstawiono schemat takiego właśnie stanowiska, na którym w krzemie i w kwarcu drążono mikrootwory o średnicach równych zaledwie 5 μm [15]. Średnica narzędzia wynosiła 4 μm , amplituda drgań 0,25 - 0,4 μm , zaś naciski robocze 29 - 59 μN . Narzędzie przygotowano stosując specjalną odmianę obróbki elektroerozyjnej. W stanowisku zostało ono zamocowane w stanowiącym wrzeciono trzpieniu, który ułożyskowano ślizgowo w pryzmach. Dzięki ruchowi obrotowemu trzpienia otwory uzyskały dokładny kształt walcowy. Współczynnik zużycia narzędzia wynosił od 0,4 do 0,8. Obróbka ścierna nie powoduje zmian strukturalnych w materiale, tak jak np. drążenie elektroerozyjne lub lasero-

we. Jednak porównanie wydajności i kosztów jednostkowych w wielu przypadkach przemawia zdecydowanie za technikami erozyjnymi.

Bibliografia

1. Oczo K. E.: Obróbka otworów – osiągnięcie w zakresie wiercenia i drążenia. *Mechanik*, 5-6/97, s. 175-187.
2. Mrugański Z., Rymuza Z.: *Mikrotechnika – MEMS*. PAK 6/93, s. 133-137.
3. Krause W.: *Fertigung in der Feinwerk- und Mikrotechnik*. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1996.
4. Oganessian J. T.: *Track Membranes, Production, Properties, Applications*. Proc. of the 3rd Int. Conf. on Particle Track Membranes and Their Applications. Jachranka 1993, s. 7-17.
5. Krasnikow W. F.: *Technologija miniaturnych izdelij*. Moskwa 1976.
6. Wakabayashi K., Onishi A., Masuzawa T.: *Micropiercing on Stainless Steel*. Bull. Japan Soc. of Prec. Eng. 1990, Vol. 24, nr 4, s. 277-278.
7. Okano K.: *Micromachining of Micro-machine Parts*. Int. J. Japan Soc. Prec. Eng. 1994, Vol. 28, nr 3, s. 196-199.
8. Mierzejewski H.: *System automatycznej perforacji filier włókienniczych PERFIL*. *Mechanik*, 1/1985, s. 39-42.
9. Iwata K., Moriwaki T.: *Basic Study of High Speed Micro Deep Drilling*. Annals of CIRP, Vol. 30/1, s. 27-30.
10. Tansel I. N.: *Monitoring Micro-Drilling Operations Using Neural Networks*. Key Eng. Materials, Vol. 138-140 (1998), s. 575-592, Trans Tech Publications, Switzerland.
11. Kudła L.: *Wpływ niewspółosiowości wiertła i wrzeciona na proces wiercenia mikrootworów*. *Mechanik* 7/98, s. 447-450.
12. Kudła L.: *Wiercenie mikrootworów*. Mat. III Konf. Nauk. Techn. Mechatronika '97, Warszawa 1997, t. II, s. 497-502.
13. Yang H., Kang S-W., Shyu R. F.: *The Investigation of Embedding Abrasive Grits onto the Microgrinding Tools by Nickel Electroforming*. Proc. of 1st Int. Conf. for Prec. Eng. and Nanotechnology. Bremen, Germany 31. V. -4. VI. 99, Vol. 1, s. 392-395.
14. Klocke F., Hilleke M.: *Der Weg in eine neue Dimension*. *Feinwerktechnik und Messtechnik*, Vol. 104 (1996), 1-2, s. 81-84.
15. Egashira K., Masuzawa T.: *Micro-ultrasonic Machining by the Application of Workpiece Vibration*. Annals of the CIRP Vol. 48/1/1999, s. 131-134.