

Ireneusz Bielski  
Teresa Tomaszewska

## EROZYJNE METODY WYKONYWANIA MAŁYCH OTWORÓW

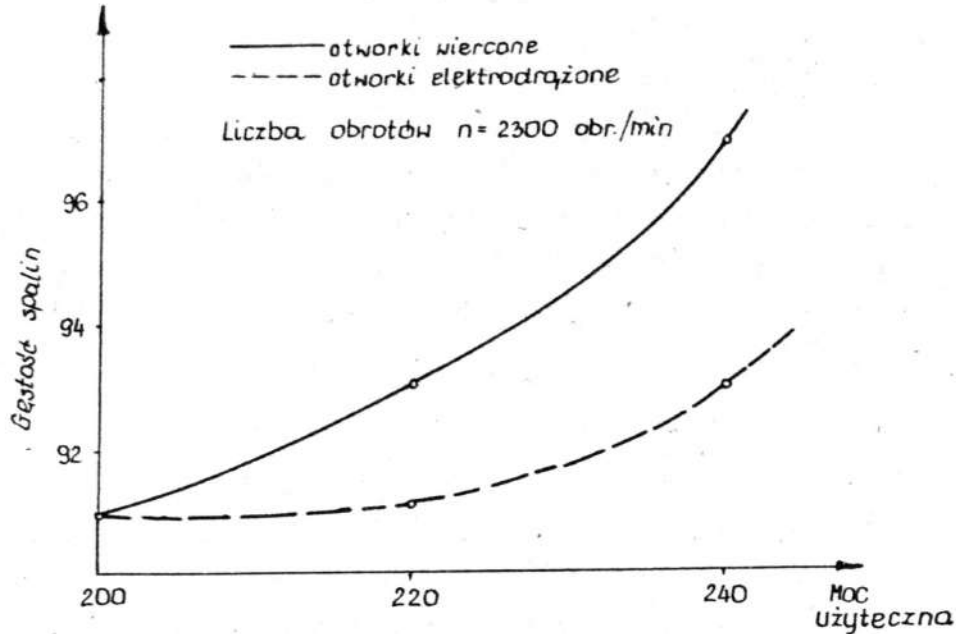
W pracy przedstawiono wiele erozyjnych metod wykonywania małych otworów wraz z podaniem wybranych parametrów obróbki i wskaźników technologicznych. Omówiono niektóre wady i zalety oraz dokonano porównania metod stosowanych do wykonywania małych otworów.

### 1. W p r o w a d z e n i e

Przez mały otwór rozumieć należy otwór o przekroju poprzecznym mniejszym od  $2 \text{ mm}^2$  [16]. Określenie "mikrootwór" odnosi się na ogół do wartości średnic mniejszych od  $0,1 \text{ mm}$  [8]. Małe otwory odgrywają poważną rolę we współczesnej technice. Największe zapotrzebowanie na otwory o przekroju mniejszym od  $2 \text{ mm}^2$  istnieje w przemyśle lotniczym, samochodowym oraz w elektronice. Konieczność wykonywania małych otworów występuje także w urządzeniach pneumatycznych i hydraulicznych wchodzących w skład aparatury pomiarowej oraz w urządzeniach automatyki mechanicznej. Są to m.in. elementy zaworów, dysze, zwężki o specjalnych przeznaczeniach np. w mechanizmach zegarków, narzędziach medycznych, urządzeniach chemicznych itp. Prawidłowo dobrana technologia wykonywania małych otworów może stanowić również oręż w walce z zanieczyszczeniem powietrza /rys. 1/.

W celu zmniejszenia gęstości dymów i spalin, stanowiących skażenie środowiska naturalnego, konieczne jest stosowanie w układach wtryskowych silników spalinowych otworów mniejszych niż  $0,3 \text{ mm}$ , oraz także otworów kształtowych [16].

Opanowanie technologii wykonywania otworów chłodzących o małych wymiarach w łopatkach turbin gazowych zbudowanych z materiałów żaroodpornych pozwoliło na około 200 - krotne zwiększenie



Rys. 1. Zależność gęstości spalin od wyboru technologii wykonywania małych otworów [16]

trwałości turbin [16]. Zapotrzebowanie na małe otwory i mikro-otwory tylko ze strony przemysłu lotniczego sięga  $5 \cdot 10^6$  otworów na dzień w odniesieniu do otworów chłodzących, a przecież na tym nie wyczerpują się jego potrzeby. Problem nawiercania małych otworów jest więc bardzo ważny, a jednocześnie jego rozwiązanie napotyka na rozmaite trudności, przy czym stopień trudności zależy od rodzaju materiału obrabianego oraz kryteriów stawianych wykonywanym otworom i jest odwrotnie proporcjonalny do wymiarów poprzecznych otworu.

Istnieje wiele sposobów wykonywania małych otworów. Najbardziej rozpowszechnione to: obróbka skrawaniem /wiercenie/, obróbka udarowo-ścierna /ultradźwiękowa/, oraz obróbka elektroerozyjna, obróbka elektrochemiczna, obróbka strumieniem elektronów /elektronowa/, obróbka strumieniem fotonów /laserowa/.

Wchodzą one w skład grupy obróbek erozyjnych, wykorzystujących do kształtowania materiałów energię nie mechaniczną. Na skutek zwiększania się w elementach maszyn udziału materiałów o podwyższonych własnościach mechanicznych /a zatem z reguły trudnoobrabianych/ wzrasta znaczenie i stopień rozpowszechniania tych obróbek, ponieważ dla metod obróbki erozyjnej własności mechaniczne materiałów obrabianych nie stwarzają granicy stosowalności.

## 2. O b r ó b k a e l e k t r o e r o z y j n a

Obróbka elektroerozyjna jest to obróbka polegająca na usuwaniu warstw wierzchnich obrabianych materiałów w postaci mikrocząsteczek w stanie stałym, ciekłym lub gazowym w wyniku zjawisk fizycznych, które zachodzą w tych materiałach na skutek wyładowań elektrycznych [1,6].

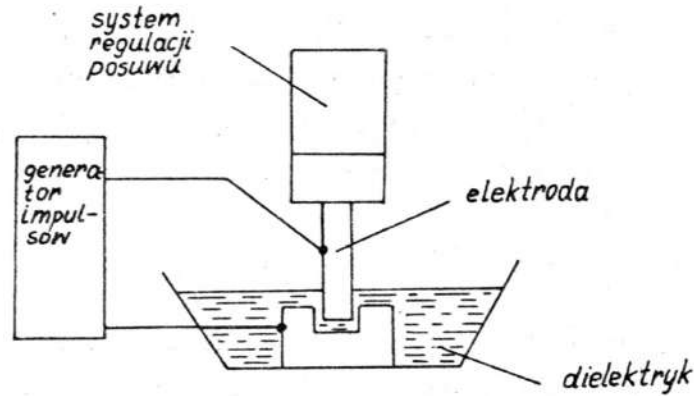
Z odmian obróbki elektroerozyjnej szersze znaczenie przemysłowe mają: obróbka elektroiskrowa i elektroimpulsowa. Przedmiot obrabiany i elektroda robocza zanurzone w dielektryku znajdują się pod napięciem. W chwili powstawania odpowiednich warunków następuje przeskok iskry, powodując, na skutek dużej koncentracji energii na znikomo małej powierzchni, ubywanie materiału w postaci mikrocząsteczek /rys. 2/.

Przebieg procesu uzależniony jest od wielu czynników, a mianowicie: parametrów elektrycznych, czynników związanych z materiałem obrabianym i geometrią otworu, czynników związanych z elektrodą roboczą - jej kształtem i materiałem, czynników związanych z cieczą dielektryczną.

Wszystkie te zagadnienia mają wpływ na wskaźniki technologiczne drążenia, takie jak:

-  $Q_v$  - objętościowa wydajność erozji [ $\text{mm}^3/\text{min}$ ]

$$Q_v = \frac{V}{t} \quad [\text{mm}^3/\text{min}] ,$$



Rys. 2. Zasada obróbki elektroerozyjnej [6]

gdzie:

$V$  - objętość wyerodowanego materiału obrabianego [ $\text{mm}^3$ ],

$t$  - czas drążenia [min];

-  $m_V$  - względny objętościowy wskaźnik zużycia elektrody roboczej

$$m_V = \frac{V_E}{V} ,$$

gdzie  $V_E$  - zużycie elektrody roboczej [ $\text{mm}^3$ ];

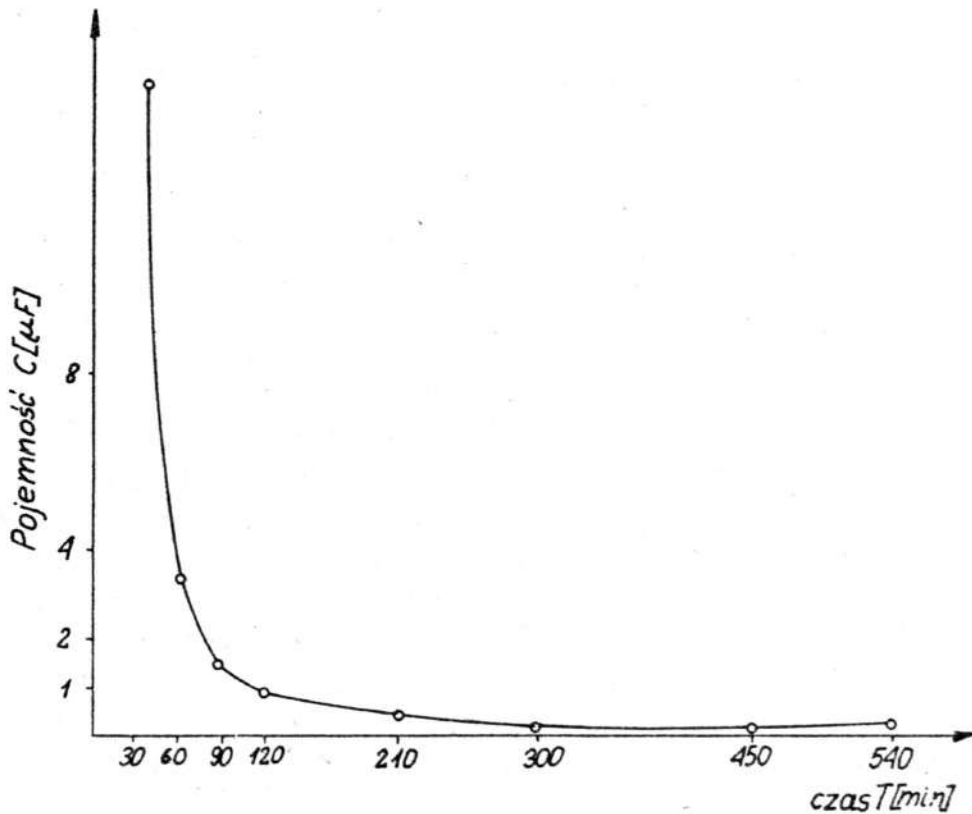
-  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ] - parametr chropowatości powierzchni,

- dokładność obróbki zależna głównie od czynników kinematycznych.

Wydajność obróbki, a zatem i czas drążenia uzależnione są między innymi od charakterystyk obwodu prądu roboczego. Dla obróbki węglików spiekanych wykorzystuje się najczęściej generatorzy zależne typu RC i RCL.

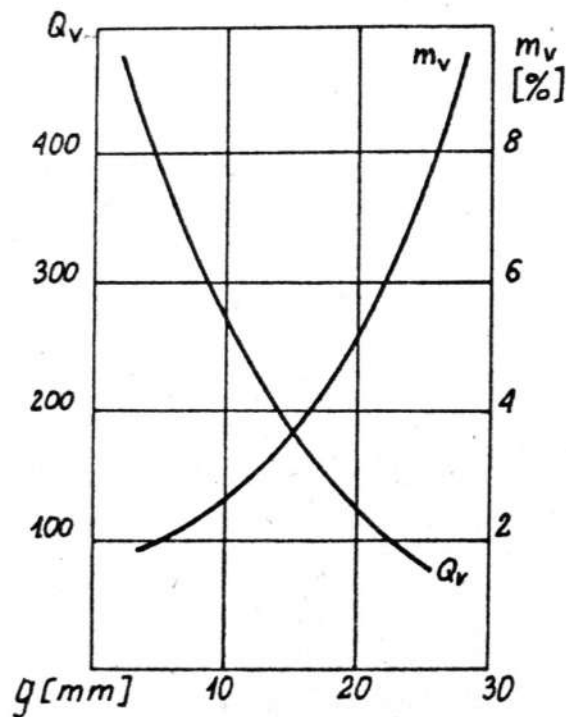
Jedną z głównych wielkości charakteryzujących obwód elektryczny z ww. generatorami jest pojemność  $C$ . Wzrost pojemności w pewnym zakresie powoduje większą wydajność obróbki /skróce-

nie czasu obróbki/ /rys. 3./ . Przy wykonywaniu otworów o dużym stosunku głębokości do średnicy interesujący jest przebieg zmian wydajności obróbki i zużycia elektrod następujący wraz z powiększaniem się głębokości otworu /rys. 4./ . Zwiększanie się stosunku  $g/d$  powoduje szybki wzrost zużycia elektrod i znaczny spadek wydajności drążenia [6]. Wydajność wykonywania otworów i zużycie elektrod zależne są przede wszystkim od rodzaju generatora i jego charakterystyk. Budowane obecnie generatory pozwalają uzyskiwać lepsze parametry obróbki przy zużyciu elektrod od 0,01 + 2 % w zależności od parametrów elektrycznych. Za główny czynnik powodujący zużywanie się elektrody uważa się gwałtowny wzrost tempe-



Rys. 3. Wykres zależności czasu drążenia płytek z węglików spiekanych od pojemności  $U_r = 160 - 200 \text{ V}$ ,  $\phi = 4 \text{ mm}$ ,  $g = 7 \text{ mm}$  [17]

ratury elektrody w punkcie wyładowania, gdzie gęstość mocy jest rzędu  $10^5$  do  $10^8$  W/cm<sup>2</sup> [7]. Toteż pogarszanie się warunków odprowadzania ciepła ze strefy obróbki, związane z rosnącą głębokością otworu, powoduje przyspieszone zużywanie elektrod. Duże znaczenie ma także ciecz dielektryczna, jej rodzaj, ciśnienie i sposób przepłukiwania szczeliny iskrowej. Dla generatorów zasobnikowych najkorzystniejszą cieczą jest nafta kosmetyczna [4]. Wprowadzenie do dielektryka dodatków polaryzujących może poprawić charakterystyki procesu [4]. Przy wykonywaniu małych otworów



Rys. 4. Wykres zmian wydajności obróbki i zużycia elektrod w zależności od głębokości otworu [6]

należy uwzględnić kształt elektrody oraz jej sztywność. Jest to szczególnie ważne przy obróbce otworów kształtowych o niewielkim przekroju i wymaganej dużej dokładności wykonania.

Obróbka elektroerozyjna wyróżnia się szeregiem zalet. Najważniejsze z nich to [16]:

- możliwość odtwarzania kształtu elektrody o dowolnym stopniu skomplikowania,
- możliwość obrabiania wszelkich materiałów będących przewodnikami prądu elektrycznego,
- małe siły występujące pomiędzy obrabianym przedmiotem a narzędziem,
- łatwość automatyzacji procesu.

Dzięki tym walorom omawiana metoda znalazła szerokie zastosowanie do wykonywania małych otworów.

Orientacyjne parametry obróbki i osiągi w zakresie wykonywania małych otworów zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Przykładowe parametry techniczne elektroerozyjnego drażenia małych otworów

Minimalna średnica /praktycznie/	Maksymalna względna głębokość otworu	Osiągalne tolerancje	Napięcie	Ciśnienie płukania	Elektrody
[mm]	$[\frac{K}{d}]$	[mm]	[V]	[bar]	-
0,02 - 0,03	~ 20 - 80	$\pm 0,002$	80 - 300	< 16	Cu, W i stopy

W materiałach żaroodpornych i żarowytrzymałych pracujących w temperaturach 1200 - 1500°C /np. otworki chłodzące w łopatkach turbin silników odrzutowych/ wykonuje się metodą elektroerozyjną otwory o średnicach 0,08 - 2 mm z tolerancją 0,05 - 0,1 mm, a w elementach precyzyjnych - nawet 0,002 - 0,005 mm. Nie znaczy to jednak, że proces drażenia otworów o małych wymiarach został całkowicie opanowany.

Szczególnie duże trudności występują przy obróbce głębokich otworów bez możliwości płukania szczeliny iskrowej. Aby nie dopuścić do powstawania drgań poprzecznych elektrody - w szczegól-

ności dla  $d < 0,5$  mm - konieczne jest wymuszanie odpowiednio dobranych drgań wydłużonych. Do wykonywania elektrod stosuje się drut wolframowy, bowiem wolfram charakteryzuje się znaczną odpornością elektroerozyjną i dużym modułem sprężystości. Elektrody wolframowe używa się powszechnie dla  $d < 0,4$  mm. Długość elektrod dochodzi do  $20d$ , jednak opanowany został już sposób dokładnego wykonywania elektrod o średnicy  $d = 0,2 - 0,4$  mm i długości  $60$  mm [13]. Elektrody te wykorzystuje się stosując prowadzenia kapilarne.

Dla zapewnienia odpowiednich wskaźników technologicznych obróbki, oprócz starannie wykonanych elektrod, konieczne jest używanie precyzyjnych drążarek. M.in. są to drążarki Charmilles-Raycon 3. Przykładowo na obrabiarce Raycon typ SH-1 w laboratoriach firmy Philips uzyskano otwory o średnicy  $d = 5 \mu\text{m}$ . Wykonanie otworu  $d = 0,02$  mm elektrodą wolframową w płytce ze stali chromoniklowej o grubości  $0,15$  mm trwa  $3$  minuty / $R_a = 0,06 \mu\text{m}/$ . Natomiast wykonanie otworu o średnicy  $d = 0,4$  mm i długości  $4$  mm, z dokładnością  $\pm 4 \mu\text{m}$  i  $R_a = 1 \mu\text{m}$  trwa  $6,5$  minuty [12]. Jako dielektryk stosuje się w tych przypadkach wodę, która zostaje dejonizowana w obrabiarce.

Wyniki uzyskiwane w skali przemysłowej i przy stosowaniu obrabiarzek wysokiej klasy zbliżone są do wyników uzyskiwanych w laboratoriach i już w tej chwili stawiają obróbkę elektroerozyjną na czele metod wykorzystywanych do wykonywania otworów o małych wymiarach.

### 3. Elektrochemiczne metody wykonywania małych otworów

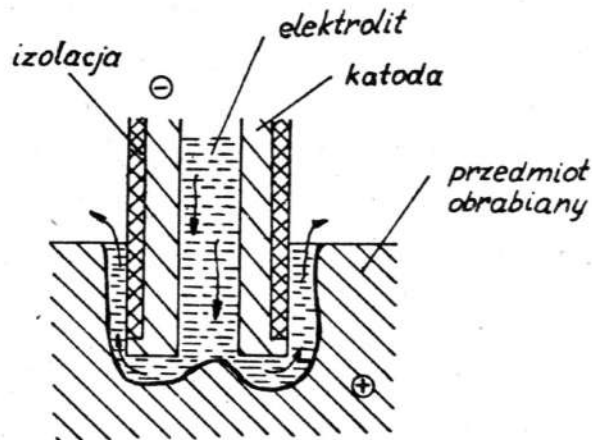
Wszystkie odmiany obróbki elektrochemicznej opierają się na zasadzie sterowanej elektrolizy w obwodzie prądu stałego, przy napięciu niższym od  $30$  V [9].



Reakcja elektrolizy wywoływana jest przez przyłożenie napięcia stałego między elektrodą a obrabianą częścią przy zapewnieniu przepływu elektrolitu w szczelinie pomiędzy tymi elementami. Sposoby wykonywania otworów można podzielić na 4 grupy [16] :

- drążenie elektrochemiczne /dziurkowanie/,
- STEM /Shaped Tube Electrolytic Machining/, czyli elektrolityczna obróbka rurkowa,
- electrostream, czyli obróbka kierowanym strumieniem elektrolitu,
- electrojet, czyli obróbka strumieniem elektrolitu kierowanym przez dyszę.

Proces drążenia elektrochemicznego polega na wtryskiwaniu pod ciśnieniem roztworu azotanu lub azotynu o odpowiednio dobranym stężeniu za pomocą elektrody o kształcie rurki odpowiednio izolowanej /rys.5./.



Rys. 5. Zasada drążenia elektrochemicznego [9]

Używanie rurki jako elektrody ogranicza stosowalność tej metody w dziedzinie mikrootworów. Elektrody, wykonywane głównie ze stali nierdzewnej lub stopów tytanu, posiadają średnicę najmniej 1 mm. Pozwala to na wykonywanie otworów zawierających się

w strefie górnej granicy dla małych otworów, według przyjętej definicji [16]. Rurki pokryte są izolacją, z reguły z gumy syntetycznej, zapewniającą odbywanie się procesu wyłącznie w strefie nieizolowanego czoła elektrody. Opracowane nowe metody wykonywania elektrod rurekowych pozwalają na zmniejszenie ich średnicy poniżej 1 mm /do około 0,8 mm/ [5].

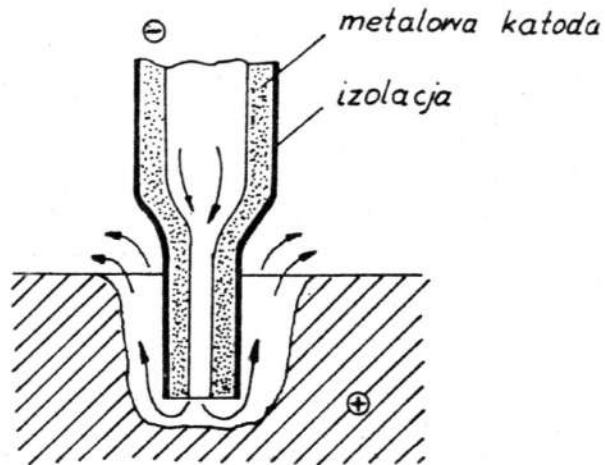
Odpowiednio dobrany system posuwu umożliwia wprowadzenie elektrody w głąb materiału. Prędkości posuwu w tym sposobie są rzędu 2,5 mm/min [16].

Największą trudność sprawia usuwanie wodorotlenków wytwarzających się podczas obróbki. Ogranicza to średnice otworów do 1,5 mm i głębokość drążenia do około 120 - 130 mm.

W elektrolitycznej obróbce rurekowej w charakterze elektrolitu stosuje się kwas siarkowy  $H_2SO_4$ , przy czym jego pH wynosi 1 - 3 at, a stężenie - około 10%. Metoda ta /rys. 6/ pozwala na wykonywanie otworów cylindrycznych o minimalnej średnicy około 0,75 mm, a przy tym umożliwia uzyskiwanie głębokości do 360 mm. Wymaga ona jednak przestrzegania specjalnych środków ostrożności, aby uniknąć nadmiernego wydzielania się wodoru - w powiązaniu z cyrkulacją elektrolitu może spowodować ono wibrację elektrody. Stosowane tutaj napięcia są wyższe [9] jak przy dziurkowaniu elektrochemicznym.

Konieczne jest ponadto uwzględnianie co 8 - 20 s inwersji napięcia na okres 0,3 - 0,5 s, po to, aby usunąć złogi osadu metalicznego, jaki tworzy się na powierzchni elektrody roboczej. Stała kontrola napięcia obróbki pozwala wpłynąć odpowiednio na wymiar drążonego otworu. Prędkość drążenia ustalona eksperymentalnie musi pozostać stała podczas danej czynności obrabiania, ponieważ jest ona w prostej relacji z wymiarem podstawowym, geometrią i stanem powierzchni obrabianego otworu.

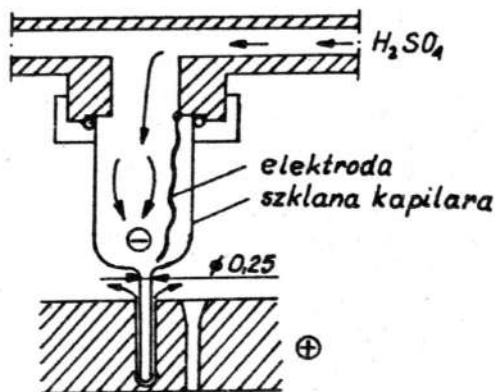
Duże znaczenie dla wszystkich odmiar obróbki elektrochemicznej ma temperatura elektrolitu. Dla metody elektrolitycznej ob-



Rys. 6. Zasada metody elektrolitycznej obróbki rurkowej /STEM/[16]

róbki rurkowej najlepsze wyniki uzyskuje się przy temperaturze  $38 - 50^{\circ}\text{C}$  [16] i natężeniu wypływu elektrolitu wynoszącym  $8,5 \text{ litra na } 1000 \text{ mm}^3$  usuwanego metalu. Dopuszczalne odchyłki nie powinny być większe niż 10%.

Technika obróbki kierowanym strumieniem elektrolitu /rys.7/ stanowi odmianę elektrolitycznej obróbki rurkowej, ale umożliwia ona otrzymywanie w skali produkcyjnej otworów o średnicach  $d = 0,25 \text{ mm}$  i głębokościach do  $10 \text{ mm}$ . Różnica pomiędzy tymi metodami polega na tym, że w miejsce elektrody metalowej w sposobie electro-stream wprowadza się dysze szklane z wydłużoną końcówką. Bardzo mały wymiar wewnętrzny końcówki /do  $0,15 \text{ mm}$ / nie pozwala na to, aby elektroda mogła sięgać jej wylotu. W związku z tym trzeba stosować w tej metodzie napięcia znacznie wyższe niż w metodzie elektrolitycznej obróbki rurkowej [16]. Napięcie uzależnione jest również od rodzaju obrabianego materiału, wymiarów otworu i stanu powierzchni. Urządzenie posuwowe dla tego sposobu obrabiania musi być bardziej precyzyjne niż w przypadku innych

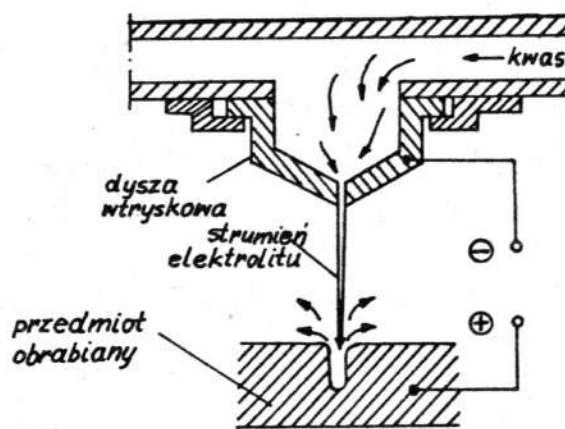


Rys. 7. Zasada obróbki elektrostrumieniowej /electrostream/ [16]

odmian obróbki elektrochemicznej, co związane jest z dużą kruchością i łamliwością stosowanych szklanych dysz elektrodowych. Znacznie wyższe musi być też ciśnienie wtrysku elektrolitu, a zabiegi filtrowania elektrolitu, badania przewodności elektrycznej, intensywności cyrkulacji muszą być kontrolowane i sterowane z dokładnością znacznie przewyższającą dokładność wystarczającą w metodzie elektrolitycznej obróbki rurkowej. Przy użyciu tej techniki istnieje możliwość obróbki większej ilości otworów jednocześnie, dzięki stosowaniu szklanych dysz grzebleniowych, z tym, że liczba rurek oraz ich posuw muszą być bardzo starannie dobrane na podstawie przeprowadzonych prób. Niskie natężenie prądu w czasie obróbki - około 500 mA [16] - utrudnia jednak kontrolę prędkości penetracji w zamkniętym obwodzie informacji. System ten nie znalazł jednak szerszego zastosowania ze względu na złożoność procesu i małą operatywność.

W dziedzinie wykonywania małych otworów wykorzystuje się również metodę "electrojet" /rys.8/, która polega na zastosowaniu szybkiego strumienia elektrolitu z uniknięciem niedogodności,

jakich nastęrcza przepuszczanie elektrolitu przez elektrody rurkowe.



Rys. 8. Zasada obróbki strumieniem elektrolitu kierowanym przez dyszę /"elektrojet drilling"/ [16]

Również tutaj używa się wysokiego napięcia i kwaśnych elektrolitów. W metodzie tej musi być sprawowana doskonała kontrola wypływu elektrolitu w celu zapobieżenia deformacji strumienia przed osiągnięciem celu - całkowitego wykonania przedmiotu. Sposobem tym można uzyskiwać średnice  $d = 0,25$  mm o głębokości otworu do około 2,5 mm. Nie eliminuje się jednak problemów, jakie występowały w sposobie electro-stream, a więc występuje niebezpieczeństwo obsługi oraz duży koszt oprzyrządowania.

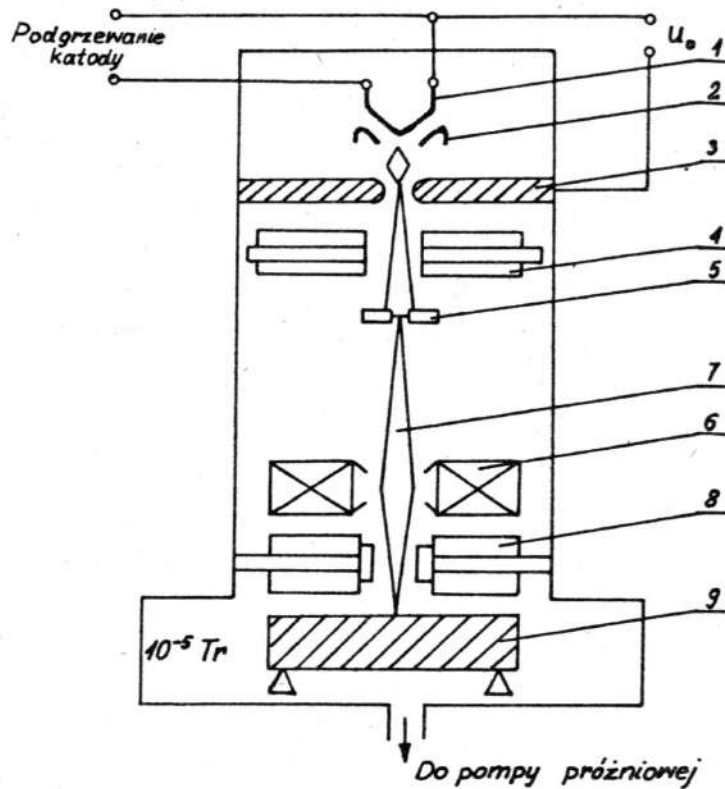
Przedstawione odmiany obróbki elektrochemicznej, opartej na reakcji anodowo-katodowej, znacznie różnią się pomiędzy sobą parametrami, efektami, a więc także i zakresem zastosowań /tablica 2/. Dla wykonania konkretnego otworu w materiale obrabianym można dobrać taką odmianę obróbki elektrochemicznej, która spełniać będzie założone kryteria oceny jakości wykonywanego otworu.

#### 4. Obróbka wiązką elektronów

Głównym zjawiskiem wykorzystywanym w tej obróbce jest proces odparowania metalu pod wpływem ciepła wytwarzanego podczas bombardowania metalu wiązką elektronów.

Sposób wytwarzania wiązki elektronów /rys. 9/ jest podobny do wzbudzania emisji promieni Roentgena. Elektrony są wysyłane poprzez podgrzaną do temperatury 2500 - 3000°C katodę, a następnie przyspieszane za pomocą dużej różnicy potencjałów /do 150 kV/. System justacyjny pozwala ustawić główną oś strumienia tak, aby przez przesłoneę przechodziła tylko centralna jego wiązka. Soczewka magnetyczna skupia rozproszony częściowo strumień, który przez system sterujący zostaje skierowany na odpowiednie miejsce przedmiotu obrabianego. Za pomocą systemu sterującego otrzymuje się wychylenie strumienia na powierzchni przedmiotu obrabianego do 4 mm [6]. W metodzie tej można uzyskać gęstości mocy w granicach  $10^8 - 10^{12}$  W/cm<sup>2</sup>. Ponieważ wiązka elektronów generowana jest w próżni i sama obróbka także odbywa się w próżni, potrzebna jest osłona zdolna do utrzymania próżni rzędu  $10^{-4} - 10^{-5}$  Tr. Omawiana metoda służy głównie do wykonywania mikrootworów. Najmniejsza możliwa do uzyskania średnica otworu zależy od wielu czynników, przy czym największe znaczenie ma żądana głębokość otworu [10]. Jest ona w przybliżeniu proporcjonalna do czasu oddziaływania wiązki elektronowej. Rośnie ona również ze wzrostem ładunków impulsów, który powoduje jednak wzrost średnicy wiązki elektronowej, a zatem i średnicy wykonywanego otworu.

Zasadniczym ograniczeniem minimalnej średnicy otworu jest ładunek przestrzenny oraz błędy odwzorowania wprowadzone przez soczewki magnetyczne. Wzrost prądu wiązki i zmniejszenie napięcia przyspieszającego powoduje wzrost średnicy wiązki wskutek zwiększenia oddziaływania ładunku przestrzennego w wiązce, a co za tym idzie - wzrost średnicy otworu [10]. Metodą tą można wykonywać otworki



Rys. 9. Schemat działania obrabiarki elektronowej [6]  
1 - katoda, 2 - pierścień Wehnelta, 3 - anoda, 4 - system justacyjny, 5 - przysłona, 6 - soczewka magnetyczna, 7 - strumień elektronów, 8 - system sterujący, 9 - przedmiot obrabiany

o średnicy od kilku mikrometrów do około 0,3 mm.  
Wykonanie otworu o średnicy  $d = 0,25$  mm i głębokości 10 mm wymaga około 30 s. czasu. W odniesieniu do otworów o głębokości do 0,5 mm wiązka elektronowa może być używana do szybkiego wykonywania mikrootworów /100 obrotów na sekundę/. W przypadku, gdy jeden impuls wystarcza do wykonania otworu, czynnikiem limitującym szybkość wytwarzania jest prędkość przesuwu obrabianego przedmiotu lub głowicy generującej wiązkę elektronową. Jakość otworów uzyskiwa-

nych tą metodą nie jest najlepsza - są one stożkowe, z wyraźną strefą wpływów cieplnych wokół otworu. Metoda ta ma szereg wad [16]:

- wysoka ocena urządzenia,
- długi cykl obróbki związany z koniecznością wytworzenia wysokiej próżni przed każdą operacją,
- wysokie koszty eksploatacji,
- niebezpieczeństwo pracy związane z oddziaływaniem wiązki elektronów /zapobiega się temu stosując osłony ołowiane przy  $U_0 > 30 \text{ kV/}$ .

Z tych względów obróbka tą metodą nie jest zbyt rozpowszechniona i wykonuje się w ten sposób jedynie otwory w materiałach trudnoobrabialnych lub specjalnych, wymagających w trakcie drążenia zachowania próżni ze względu na duże powinowactwo z tlenem zawartym w powietrzu.

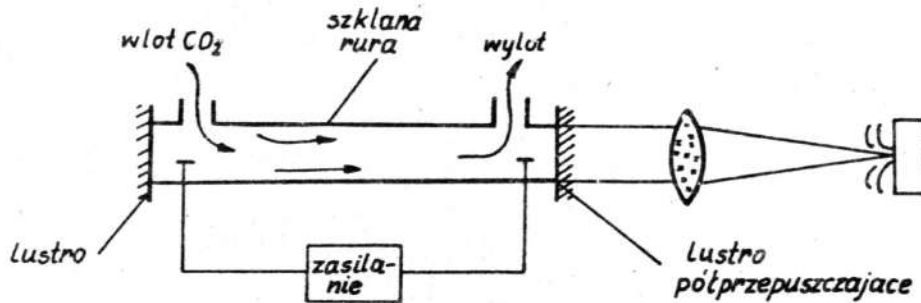
##### 5. O b r ó b k a s t r u m i e n i e m f o t o n ó w

W wykonywaniu małych otworów znalazły zastosowanie lasery zarówno z medium gazowym, jak i krystalicznym. W laserach gazowych w charakterze medium stosuje się  $\text{CO}_2$ . Zasada działania laserów gazowych  $\text{CO}_2$  jest taka sama jak laserów krystalicznych i polega na wzbudzeniu elektronów i skierowanej emisji fotonów. Schemat układu przedstawia rys. 10.

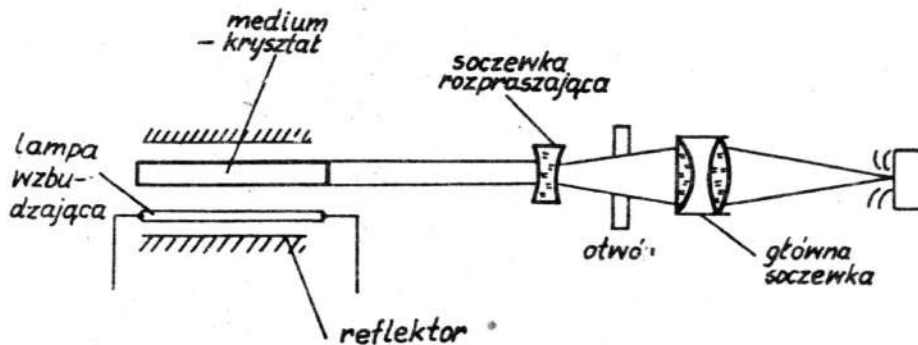
Długości fali, z jakimi pracuje ten laser, są rzędu  $10,6 \mu\text{m}$ , co pozwala uzyskiwać otwory o średnicy minimalnej około  $1,25 \text{ mm}$ . Wynika to z trudności zogniskowania promieni świetlnych. Poziom wykorzystania energii w tych laserach jest niewielki - wynosi około 15% [16].

Częściej do wykonywania otworów stosuje się lasery rubinowe i neodymowe o energii impulsu  $10 \text{ mJ} - 20 \text{ J}$ . Od czasu i energii





Rys. 10. Normalny laser gazowy typu CO<sub>2</sub> [11]



Rys. 11. Schemat lasera krystalicznego [17]

impulsów zależy wydajność obróbki, średnica i jakość wykonanego otworu a także wielkość strefy wpływów cieplnych wokół otworów [14]. Otwory o średnicy wylotu 10 - 500  $\mu$  w metalach i półprzewodnikach, diamentach i innych materiałach mają postać krateru o kształcie okrągłym i nieregularnej linii brzegowej oraz przekroju wzdłużnym - stożkowym [18]. Zbieżność przekroju poprzecznego stożka zależy od grubości materiału, średnicy wylotowej oraz ilości i energii użytych impulsów laserowych [14]. Maksymalna grubość przebijanych elementów nie przekracza 2 - 3 mm. W przypadku gdy

kształt i chropowatość powierzchni otworu są bardzo istotne, drażenie laserowe jest operacją wstępną i otwór musi podlegać dalszej obróbce nielaserowej. Wskaźniki drażenia laserowego niektórych materiałów zawiera tablica 3.

Tablica 3. Przykłady drażenia laserowego niektórych materiałów [14]

Materiał	Grubość płytki /μm/	Średnica otworu /μm/
złoto	100	4
stal	100	6
wolfram	200 3000	4 100
rubin	400	10
aluminium	400 1000	12 20
ceramika	700	40

Metoda ta znajduje zastosowanie nie tylko do wykonywania otworów w materiałach trudnoobrabialnych klasycznymi metodami, ale również w materiałach takich jak guma [15], w której uzyskuje się dokładne otwory o średnicach 0,012 - 1,25 mm w częściach takich jak: zawory, zasuwki i inne.

Laserem można wykonywać otwory praktycznie w każdym materiale /przy gęstości mocy  $10^8 - 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> uzyskuje się szybkość wzrostu temperatur 10 - 20 mln °K/s [14]/, jednak zakres ekonomicznie uzasadnionych zastosowań jest jeszcze stosunkowo niewielki.

## 6. P o r ó w n a n i e m e t o d s t o s o w a n y c h d o w y k o n y w a n i a m a ł y c h o t w o r ó w

Pojawienie się wielu nowych materiałów o specjalnych właściwościach spowodowało powstanie i rozwój nowych sposobów obróbki. Aktualny stan, parametry sposobów obróbki stosowanych do wykonywania małych otworów oraz przydatność tych sposobów do obróbki podstawowych grup materiałów zawierają tablice 4 i 5.

Najbardziej uniwersalne jest drażenie strumieniem elektronów i fotonów /laserowe/. Należy traktować to jednak jako dane orientacyjne nie uwzględniające indywidualnych przypadków. Jak wynika z zestawienia, najmniejsze otwory uzyskiwać można mikrowierceniem, drażeniem elektronowym i laserowym, uzyskując niedokładności 20 - 50% wymiaru podstawowego.

Mikrowiercenie jednak stosować można dla ograniczonej grupy materiałów, uznawanych z reguły jako dobrze skrawalne. Natomiast minimalne otwory uzyskiwane drażeniem elektronowym lub laserowym możliwe są do osiągnięcia jedynie w przypadku obróbki otworów o bardzo małej głębokości, gdyż przy większych głębokościach powstają duże błędy kształtu otworu w przekroju wzdłużnym, a także duże strefy materiału odkształconego termicznie wokół obrobionego otworu. Dla otworów długich o średnicy  $d > 0,3$  mm najkorzystniejsze są metody elektrochemiczne, zapewniające najwyższą dokładność. Spośród wszystkich metod jedynie metoda elektroiskrowa daje prawidłową formę obrzeży otworu. Przy mikrowierceniu występują zadziory, przy drażeniu ultradźwiękowym - odpryski, przy obróbce elektrochemicznej - zaokrąglenia krawędzi. Termiczny zaś charakter obróbki elektronowej i laserowej sprawia, że na wylocie tworzą się mikrowylewy z roztopionego w trakcie obróbki materiału. Dla każdej z tych metod można osiągnąć chropowatość powierzchni w szerszym zakresie /np. przy drażeniu elektroiskrowym  $R_a = 0,06 - 40 \mu\text{m}$ / w zależności od stosowanych parametrów obróbki.

Wykorzystanie więc określonego sposobu wykonywania konkretnych otworów wymaga uwzględnienia szeregu czynników, po to, aby spośród znanych sposobów wybrać najkorzystniejszy ze względu na przyjęte kryteria technologiczne i ich hierarchizację, uwzględniając także dostępność i rozpowszechnienie tego sposobu oraz kryterium ekonomiczne.

## 7. W n i o s k i

Przegląd literatury i przeprowadzona analiza metod wykonywania małych otworów pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Najbardziej uniwersalne jest drażnienie strumieniem elektronów i fotonów /laserowe/.
2. Dla otworów długich o średnicy  $d > 0,3$  mm najkorzystniejsze są metody elektrochemiczne.
3. Ze względu na prawidłowe formy obrzeży otworu najkorzystniejsza jest obróbka elektroerozyjna.

B i b l i o g r a f i a

- [1] Albiński K., Metody i środki obróbki erozyjnej. Referat sprawozdawczy, III Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna np.: Postępy w Teorii i Technice Obróbki Metali, Kraków 1967.
- [2] Botden T.P.J., Nieuwe ontwikkelingen in de microbewerking. Niet - conventionele bewerkingstechniken. Ingenieur 1970, nr 45.
- [3] Charmilles - Raycon SH-101, SH-201. Prospekty.
- [4] Fiema L., Badania doświadczalne cieczy dielektrycznych dla drążarek elektroerozyjnych. IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna. Postępy w Teorii i Technice Obróbki Materiałów. Kraków 1973.
- [5] Joslin F.R., Electrode for small hole electro-chemical drilling. Patent USA 3.647.674. 7.III.1972.
- [6] Kaczmarek J., Podstawy obróbki wiórowej, ścierniej i erozyjnej. Warszawa, WNT 1971.
- [7] Kobayashi K., Takahashi Y., Ishikawa N., Takagi S., Najnowsze postępy w dziedzinie obróbki elektroiskrowej. Mitsubishi Denki Engineer. 1974, nr 1.
- [8] Kudła L., Rozwój techniki wiercenia otworów o średnicach mniejszych od 1 mm. Pomiar, automatyka, kontrola. 1974, nr 6.
- [9] Lang W., Kleinbearbeitung mit Funkenerosion und elektrochemischen Verfahren. Fertigung. 1974, nr 4.
- [10] Mokrauz I., Szówko W., Szymański H., Mikroobróbka wiązką elektronową. Prace Naukowe Instytutu Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej. 1973, nr 1/10.
- [11] Moorhead A.J., Laser Welding and Drilling Applications. Welding Journal. 1971, nr 2.
- [12] Opracowanie zbiorowe, Funkenzerspannung mit Mikron-Präzision. Industriemeister 1969, nr 1.
- [13] Opracowanie zbiorowe, Gebruik van speciale elektroden verlaagt kost prijs van het vonkerosieproces. Voor het boeven van ga ten van kleine diameter met grote diepte. Electronica. 1973, nr 742.
- [14] Opracowanie zbiorowe, Lavorazione ad asportazione mediante Laser. Macchine. 1973, nr 3.
- [15] Opracowanie zbiorowe, Laser drills small accurate holes in rubber. Materials Engineering. 1971, nr 2.

- [16] Peacock R., Schmitt P., Mikrobchrunge. Fertigung. 1974, nr 1.
- [17] Woliński W., Nowicki M., Laserowa obróbka materiałów. Prace Naukowe Instytutu Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej. 1973, nr 1/10.
- [18] Steininger Z., Badania wpływu różnych czynników na jakość i wydajność obróbki elektroiskrowej ciągadeł ze spieków. IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Postępu w Teorii i Technice Obróbki Materiałów, Kraków 1973.

Tablica 2: Porównanie metod stosowanych do elektronicznej obróbki otworów o małych wymiarach [16]

	Dziurkowanie elektrochem. <i>Electrochemical drilling</i>	Obróbka elektrodami rurkowymi <i>Shaped Tube Electrolytic Machining</i>	Obróbka elektrostrumieniowa <i>Electro-Stream</i>	Obróbka kierowanym strumieniem elektrolitu <i>Electro-jet</i>
Minimalna średnica otworu (praktycznie) [mm]	~ 2	0,8	0,125	0,05
Maksymalna głębokość otworu	60 ÷ 80 d	~ 100 d	~ 50 d	~ 30 d
Osiągane tolerancje [mm]	±0,02	±0,02	±0,02	±0,05
Elektrolit	zasadowy NaNO <sub>2</sub>	kwaśny H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kwaśny H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kwaśny H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Napięcie [V]	12 ÷ 20	20 ÷ 100	300 ÷ 600	300 ÷ 500
Ciśnienie płukania [bar]	15 ÷ 20	4 ÷ 6	4 ÷ 6	50 ÷ 100
Elektrody	Izolowane; Cu stal nierdzewna, rurki tytanowe	Izolowane stal nierdzewna, rurki tytanowe	rurka kapilarna szklana	dysza platynowa
Niektóre problemy	Trudności wykonawcze i wysokie koszty elektrody	Trudności wykonawcze i wysokie koszty elektrody	Trudności wykonawcze i wysokie koszty elektrody	Trudności wykonawcze i wysokie koszty elektrody
		Niebezpieczeństwo w użyciu (kwas, wysokie napięcie)	Niebezpieczeństwo w użyciu (kwas, wysokie napięcie)	Niebezpieczeństwo w użyciu (kwas, wysokie napięcie)
		Problemy filtracji	Duże problemy filtracji; krótka żywotność elektrod	Duże problemy filtracji; krótka żywotność elektrod
			Wykruszanie się	Korozja

Tablica 4: Porównanie parametrów technicznych metod wykonywania otworów o małych wymiarach

Metoda Wielkość	Mikrowiercenie	Drażenie ultradźwię- kowe	Drażenie elektroiskrowe	Drażenie elektrolityczne	Drażenie laserowe	Drażenie elektronowe	Uwagi
Minimalna uzyskana średnica otworu [mm]	≈ 1	100	5	300	≈ 1,5	≈ 1	1) otwór o średnicy 0,1 [mm]
Tolerancje mniejszych otworów [mm]	0,2	30	10 3.)	10	≈ 0,5	≈ 0,5	2) otwór o średnicy 1,0 [mm]
Osiągana chropowatość powierzchni Ra [μm]	0,2 ÷ 10	0,3 ÷ 20	1 ÷ 20	< 1	0,2 ÷ 10	0,2 ÷ 10	3) 0,06 [μm] wg [28]
Maksymalny osiągany stosunek długości do średnicy	1) 5 ÷ 120	5 ÷ 30	÷ 100 2.)	÷ 200	÷ 30	÷ 30	



Tablica 5: Przydatność różnych metod do obróbki podstawowych grup materiałów [8]

Metoda	Materiał												
	stopy żelaza		stopy nieżelazne			stopy tworzyna sztuczne			spieki		inne		
	stale	żeliwo	Cu, Al, Mg i ich stopy	W, Ti, Nb, Mo, i ich stopy	Ta, Sn, Pt i ich stopy	Au, Ag, Pt i ich stopy	termo-utwardzalne	termo-plastyczne	elastometry	węglik metali	ceramika	szkło	kamienie szlachetne
Mikrowiercenie	3	2	3	1	3	3	2	2		1	1	1	
Ultradźwiękowa	1	3	1	2	1	1	1			3	3	3	3
Elektroiskrowa	3	3	3	3	1	1				3			
Elektrolityczna	3	3	3	3	2	3				3			
Laserowa	3	3	3	3	3	3	1	1	1	3	1	3	3
Elektronowa	3	3	3	3	3	3	1	3	1	3	2	3	3

3 – obrabialność bardzo dobra

2 – obrabialność dobra

1 – obróbka jest możliwa przy zastosowaniu specjalnych środków bez oznaczeń – obróbka jest niemożliwa lub niezbadana