

DK 534.8—8:621.7

# Ultra zvok kot tehnološko sredstvo za obdelavo materialov

FRANC GOLOGRANC

(Nadaljevanje in konec)

## IV. OBDELAVA S POMOČJO ULTRAZVOČNE EROZIJE

Medtem ko se pri ultrazvočnem čiščenju izrablja ultrazvočna energija za odstranjevanje umazanije s površine obdelovancev, lahko nekatere efekte, ki nastajajo v ultrazvočnem polju, izkoriščamo tudi za doseganje trajnih fizikalnih sprememb na površinah obdelovancev. Tako je s primerno koncentracijo ultrazvočne energije možno doseči namerno erozijo, ki lahko rabi kot tehnološko sredstvo za obdelavo najrazličnejših materialov.

V sodobni industrijski proizvodnji se mimo karbidnih trdin vse bolj uporabljajo tudi razni nekovinski materiali kot n. pr. steklo, keramika, naravni in sintetični kamni itd. Oblikovanje teh pa je do sedaj povzročalo velike težave. Konvencionalne metode tehnološke obdelave z odrezovanjem (n. pr. struženje, vrtanje, freziranje in druge) namreč odpovedujejo, če je material obdelovanca trši od orodja. Zaradi tega so bile za obdelavo takih materialov prej nekoč potrebne zapletene in drage procedure, ki so v znatni meri oteževale in omejevale uporabnost. Radikalno spremembo pri obdelavi nekaterih trdnih materialov je v zadnjih letih prinesla elektroerozivna metoda, o kateri je SV pisal v št. 3/4 in 5/1958. Vendar je ta postopek omejen na obdelavo materialov, ki so prevodniki električnega toka. Nasprotno pa je ultrazvočna erozija postopek, ki omogoča obdelavo tudi najtrših materialov-nevodnikov.

### 1. Načelo delovanja

Proces ultrazvočne obdelave temelji na erozivnem delovanju, ki ga pod vplivom visokofrekvenčnih mehaničnih nihanj orodja povzroča majhni, zelo trdi in ostrorobi kristalčki brusilnega sredstva, ki izpolnjuje prostor med orodjem in obdelovancem. To brusilno sredstvo je treba s pomočjo določene tekočine dovajati na čelno stran nihajočega orodja, ki se istočasno — pod majhnim pritiskom — primika k obdelovancu. Pri tem prihaja do drobljenja oziroma odnašanja materiala z obdelovanca, istočasno pa tudi do obrabe orodja in brusilnih zrn. Orodje lahko izdolbe v obdelovancu obliko, ki natanko ustreza njegovemu profilu, s čimer je dana možnost za izdelavo poljubno oblikovanih izvrtin in izrezov. Medtem ko je obdelava s konvencionalnimi metodami tem težja, čim trši in krhkejši je material obdelovanca, je pri ultrazvočni eroziji ravno obratno. Obdelava z ultra zvokom je možna samo pri najtrših in krhkih materialih, in sicer ne

glede na njihovo električno prevodnost. Ta lastnost odpira ultrazvočni eroziji zelo široko področje uporabnosti v raznih vejah industrijske proizvodnje.

Po načinu odzemanja materiala lahko razlikujemo pri ultrazvočni eroziji dve vrsti obdelave, in sicer obdelavo s čelno ploskvijo ter obdelavo s stranskimi ploskvami nihajočega orodja.

Slika 23 a) prikazuje orodje, ki niha longitudinalno in se s spodnjo čelno ploskvijo posredno dotika obdelovanca. Med obema je namreč suspenzija brusilnega sredstva. Zaradi vzdolžnega nihanja orodja udarjajo ostrji kristalčki brusilnega sredstva v površino obdelovanca in klešejo iz nje mikroskopsko majhne delce materiala. Pojav lahko do določene mere primerjamo z delovanjem pnevmatičnega orodja, s to razliko, da imamo pri ultrazvočni obdelavi na voljo veliko število posameznih majhnih orodij v obliki brusilnih zrn. Ker se robovi brusilnih zrn obrabljajo, deloma pa se zrna tudi oddrabljajo, je treba skrbeti za stalno in intenzivno mešanje suspenzije brusilnega sredstva.

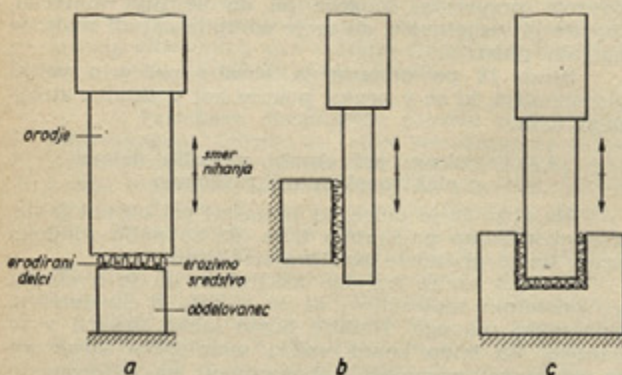
Slika 23 b) prikazuje drug način odzemanja materiala, pri katerem je obdelovalna ploskev paralelna s smerjo nihanja orodja. Ta način obdelave je v bistvu podoben lepanju. Pod vplivom menjajočega se relativnega gibanja med orodjem in obdelovancem drgnejo brusilna zrna po obeh površinah in s svojimi ostrimi robovi posnemajo material z obdelovanca in deloma tudi z orodja.

Kombinacija obeh načinov je prikazana na sliki 23 c). Ta ustreza ultrazvočnemu vrtanju, pri katerem se pojavlja erozija istočasno v obeh smereh, t. j. v globino in širino.

Kinematiko konvencionalnih načinov obdelave lahko prenesemo tudi na obdelavo z ultra zvokom, s pomočjo katerega lahko materiale režemo, vrtamo, graviramo, lepamo, škrabamo ali poliramo, pri čemer so osnovnemu relativnemu gibanju med orodjem in obdelovancem superponirane visokofrekvenčne oscilacije orodja.

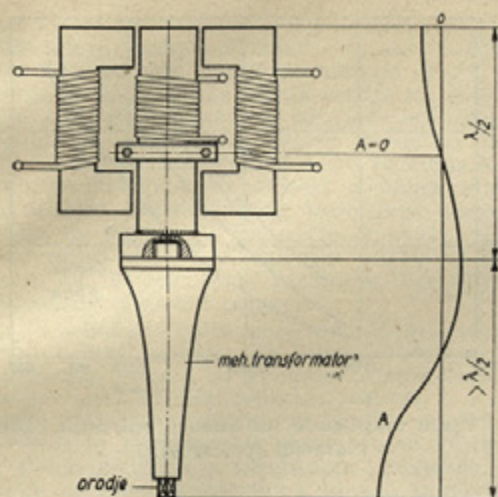
Ker pri ultrazvočni obdelavi nimamo opravka z odrezovanjem, temveč se material obdelovanca drobi v prah, je ta postopek uporaben samo za obdelavo razmeroma krhkih in trdnih, ne pa tudi za obdelavo mehkih in žilavih materialov. Nasprotno pa mora biti orodje izdelano iz mehkejšega in žilavega materiala, v katerega se zrna lahko vtiskajo, ne da bi se pri tem material, iz katerega je izdelano, drobil. Brusilno sredstvo mora biti seveda trše ali vsaj enako trdo kakor material obdelovanca.

Čeprav mehanizem procesa pri ultrazvočni obdelavi še ni podrobno znan, lahko po dosedanjih izsledkih trdimo, da je odzemanje materiala v bistvu mehanično. Vzroke za erozijo materiala pripisujejo predvsem velikim tangencialnim in normalnim napetostim, ki nastajajo pri udarjanju brusilnih zrn ob površino obdelovanca, pri čemer prihaja do krhkega loma zaradi velikih specifičnih tlakov med ostrimi robovi zrn in površino obdelovanca. Zavoljo močnega zvočnega tlaka v ultrazvočnem polju med orodjem in obdelovancem lahko prodira tekočina, v kateri je suspendirano brusilno sredstvo, v nastale razpoke in raze ter s tem podpira mehanične porušitve materiala. Verjetno pospešuje erozijo tudi kavitacija, ki povzroča močno turbulenco suspenzije v ultrazvočnem polju in omogoča hitrejšo zamenjavo obrabljenih zrn brusilnega sredstva z novimi. Erozija je najintenzivnejša na ploskvah, ki so pravokotne na smer nihanja orodja. Zato je tudi obraba orodja največja na čelni strani,



Sl. 23. Načini odzemanja materiala pri ultrazvočni obdelavi





Sl. 24. Shema vibratorja v obliki palice

medtem ko se profil prečnega prereza orodja menja med obdelavo samo zelo malo.

Ultrazvočna erozija pomeni popolnoma novovrsten način obdelave, ki je najprimernejši za obdelavo stekla, kremenca, diamantov, ahata, rubina in drugih naravnih in sintetičnih kamnov, porcelana, keramike, magnetičnih jekel, vseh vrst karbidnih trdin, germanija in nekaterih drugih trdih materialov. Manj prikladen je postopek za obdelavo kaljenih oz. nekaljenih jekel, popolnoma neuporaben pa za obdelavo bronca, svinca in drugih mehkih snovi.

Kot erozivno sredstvo se največkrat uporablja prah borovega karbida ( $B_4C$ ) in silicijevega karbida (SiC) ter korunda ( $Al_2O_3$ ), medtem ko obdelujejo diamante z diamantnim prahom. Tekočina, v kateri je suspendirano erozivno sredstvo, omogoča brusilnim zrncem predvsem lahek dostop do mesta obdelave, rabi za odvajanje erodiranih materialnih delcev in hlajenje ter tvori hkrati dober akustični spoj med orodjem in obdelovancem, ki je potreben za učinkovit prenos ultrazvočne energije.

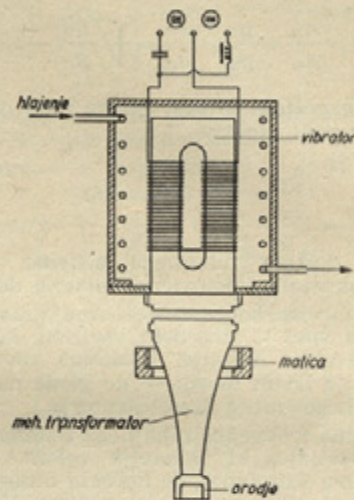
Frekvenca nihanja orodja je pri obdelavi z ultra zvokom razmeroma majhna, vendar gre nad 16 kHz — že zaradi siceršnjih akustičnih motenj. Najobičajnejše so frekvence v območju od 20 do 30 kHz. Za proizvajanje visokofrekvenčnih mehaničnih nihanj prihajajo v poštev le magnetostriksijski oz. piezomagnetični vibratorji, ki so se v območju nizkih ultrazvočnih frekvenc izkazali kot najprimernejši za racionalno pretvarjanje energije. Mimo tega so — kakor je že omenjeno — ti kovinski vibratorji zelo odporni ter najmanj občutljivi.

Slika 24 prikazuje enostavno obliko longitudinalno nihajočega piezomagnetičnega vibratorja za ultrazvočno napravo majhne moči. Pri večjih napravah ima vibrator obliko okvira. Slika 25. Dimenzije vibratorja so izbrane tako, da je njegova lastna frekvenca enaka frekvenci generatorja. Tuljava, skozi katero teče visokofrekvenčni izmenični tok, rabi za vzbujanje okvira v nihanje z lastno frekvenco. Istočasno lahko teče skozi tuljavo tudi enosmerni tok za vnaprejšnje magnetiziranje okvira, kar omogoča doseganje optimalnega izkoristka.

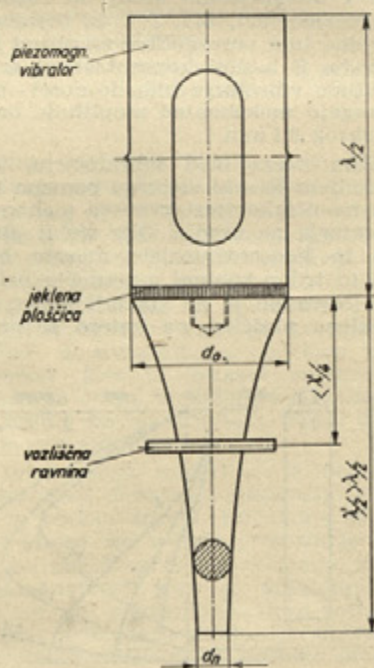
Ker je pri ultrazvočni erozivni obdelavi potrebna zelo močna koncentracija ultrazvočne energije, mora vibrator pri določeni frekvenci in masi nihati z največjo možno amplitudo, ki pa znaša pri piezomagne-

tičnih materialih in normalnih dolžinah vibratorjev komaj nekaj tisočink milimetra ( $10-20 \mu$ ).

Velikost amplitude končnega dela vibratorja je namreč omejena zaradi periodičnega menjavanja napetosti v materialu, ki lahko pri velikih amplitudah povzročajo porušitev piezomagnetičnega materiala. Ker so te amplitude za erozivno obdelavo premajhne, jih je treba s pomočjo posebnega akustičnega transformatorja povečati. Ta transformator, ki je v bistvu držalo za orodje, posreduje trdno zvezo med vibratorjem in orodjem. Izdelan je iz materiala zelo velike zrušilne trdnosti, največkrat iz žilavega orodnega jekla in prečunan na resonančno frekvenco vibratorja. Njegova



Sl. 25. Shema ultrazvočne glave z vibratorjem v obliki okvira



Sl. 26. Piezomagnetični vibrator z mehaničnim transformatorjem



naloga je, da prenaša energijo ultrazvočnega nihanja od vibratorja na orodje oziroma obdelovanec in glede na svojo geometrično obliko omogoča primerno povečanje amplitude nihanja.

V splošnem imajo ti mehanični transformatorji — ali koncentradorji — stopničasto ali konično obliko, pri kateri je zožitev lahko eksponentialna, kvadratna ali linearna. Resonančna dolžina je odvisna od koničnosti in s tem od želenega razmerja povečave. Praktično se največkrat uporablja taka oblika, pri kateri je prečni prerez stožca eksponentialna funkcija njegove dolžine. Pri tem so razmerja med amplitudami in tlaki na zgornjem in spodnjem koncu stožca obratno sorazmerni razmerju obeh premerov

$$\frac{A_n}{A_o} = \frac{p_n}{p_o} = \frac{d_o}{d_n} = \sqrt{\frac{S_o}{S_n}}$$

medtem ko je gostota ultrazvočnega toka obratno sorazmerna površini ploskve

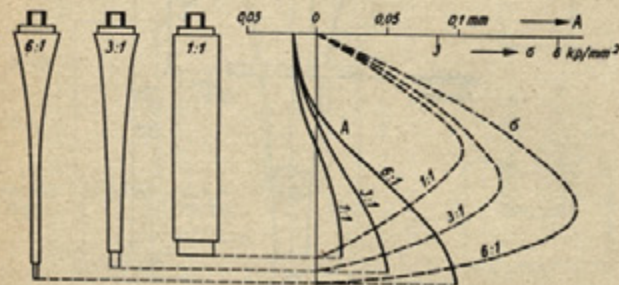
$$\frac{j_n}{j_o} = \frac{S_o}{S_n} \quad (\text{Slika 26})$$

Celotna dolžina nihajnega sistema mora biti enaka mnogokratniku polovične valovne dolžine ( $\lambda/2$ ).

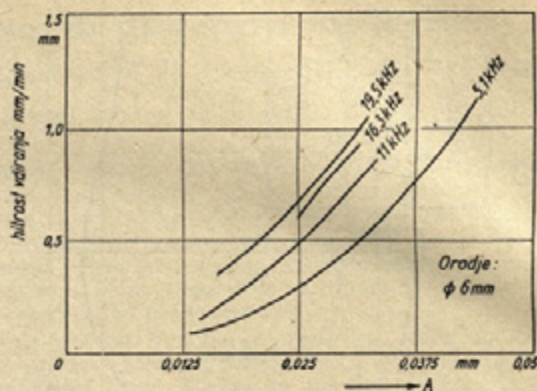
Sistem vibrator-koncentrador-orodje mora biti popolnoma togo vpet v nihajnem vozlišču, ker bi sicer nastajalo preveliko dušenje. Vozliščna ravnina mora ostati vedno na istem mestu — ne glede na obliko in mehanično obremenitev koncentradorja.

Resonančna frekvenca nihajnega sistema vibrator-koncentrador-orodje, ki sestavlja celoto, mora biti enaka frekvenci vzbujanja, če hočemo dosegati maksimalne amplitude. Ker pa vpliva orodje na koncu koncentradorja kot dodatna masa, ki zmanjšuje njegovo lastno frekvenco, je treba dimenzije koncentradorja zmerom prilagajati velikosti orodja. Po navadi je pri vsaki napravi na voljo večje število koncentradorjev, na katere je možno pritrjati orodja raznih oblik in velikosti. Slika 27 prikazuje tri značilne oblike koncentradorjev z ustreznimi orodji in različnim predstavnim razmerjem 6:1, 3:1, 1:1. Iz posameznih krivulj je razvidna tudi porazdelitev amplitud in napetosti v materialu. S takimi koncentradorji se dajo povečati amplitude vibratorja tudi do deset- in večkrat, tako da dosega maksimalne amplitude orodja velikostni red okrog 0,1 mm.

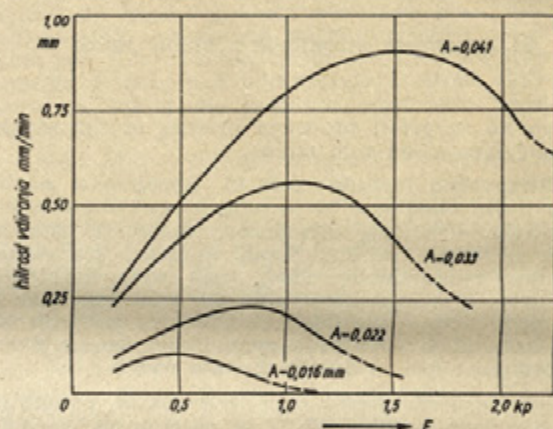
Mehanična zveza med vibratorjem, koncentradorjem in orodjem je zelo velikega pomena in v veliki meri vpliva na učinkovitost prenosa mehanične energije od vibratorja na orodje. Obe stični ploskvi med vibratorjem in koncentradorjem morata biti popolnoma ravni in trdno spojeni s pomočjo primerne vijake zveze. Navadno je na spodnji konec vibratorja naložena jeklena ploščica, na katero se pritrjajo iz-



Sl. 27. Shema porazdelitve amplitud in napetosti o v mehaničnem transformatorju



Sl. 28. Vpliv amplitude na hitrost vdiranja orodja v material (pri steklu)



Sl. 29. Optimalni statični pritisk naleganja orodja (pri različnih amplitudah)

menljiva držala za orodje. Za boljši akustični spoj je treba stični ploskvi namazati z oljem ali mastjo.

Orodje, ki je na tanjšem koncu koncentradorja, je navadno nanj trdo naloženo ali privarjeno. Zveza med njima mora biti trdna in brezhibna, ker dosega gostota ultrazvočnega toka na tem mestu zaradi močne koncentracije tudi do 10 W/mm<sup>2</sup>. Orodja so izdelana največkrat iz žilavih orodnih jekel, vendar zadostujejo tudi navadna ogljikova jekla. Zaradi tega njihova izdelava, tudi pri zapletenih oblikah, ne povzroča težav.

Ultrazvočna glava z vibratorjem, koncentradorjem in orodjem je navadno pomična v vertikalni smeri v preciznih vodilih z zelo majhnim trenjem. Teža glave je po navadi kompenzirana z vzmetjo ali protutežjo, s posebnimi konstruktivnimi ukrepi pa mora biti poskrbljeno za to, da nalega orodje na obdelovanec vselej z določenim pritiskom, ki omogoča potrebno pristavljanje orodja k obdelovancu.

## 2. Vplivne veličine

Pri vrednotenju končnih rezultatov pri tehnološki obdelavi materialov s pomočjo ultra zvoka je treba mimo učinkovitega erozivnega učinka upoštevati tudi doseženo mersko in oblikovno natančnost in kvaliteto površin ter relativno obrabo orodja. Te vrednosti izhajajo neposredno iz poteka delovnega procesa na določeni erozivni napravi — v odvisnosti od danih delovnih pogojev.



Efektivni erozivni učinek, t. j. volumen v časovni enoti erodiranega materiala ( $\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) je predvsem odvisen od frekvence in amplitude nihanja orodja ter od statičnega pritiska, ki ga izvaja orodje na obdelovanec. Mimo teh parametrov, ki so predvsem odvisni od konstruktivne izvedbe ultrazvočne glave, pa vplivajo še številni drugi faktorji kot n. pr. fizikalne lastnosti materiala obdelovanca, velikost in oblika orodja, trdota in velikost brusilnih zrn, viskoznost tekočine in koncentracija suspenzije ter način obdelave. Medsebojna odvisnost vseh teh vplivnih veličin je zelo zapletena in žal še zelo malo raziskana, kar otežuje izbiro optimalnih delovnih pogojev.

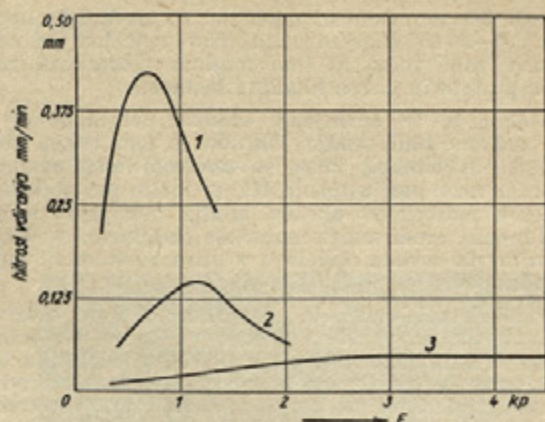
Slika 28 prikazuje vpliv amplitude nihanja orodja na erozivni učinek oziroma na hitrost obdelave pri vrtnanju v steklo. Podane so krivulje za štiri različne frekvence pri sicer enakih delovnih pogojih, t. j. pri konstantnem statičnem pritisku in profilu orodja. Iz poteka krivulj je razvidno, da raste hitrost vdiranja orodja v steklo približno s kvadratom amplitude. Ta odvisnost pa ni vedno kvadratična, ampak je odvisna od optimalne vrednosti statičnega pritiska in velikosti brusilnih zrn. Vpliv frekvence na erozivni učinek je v splošnem manjši.

Hitrost obdelave dosega največjo vrednost pri nekem optimalnem statičnem pritisku, ki je odvisen od velikosti amplitude. Slika 29. Povečanje amplitude ima za posledico, da se pomakne optimalni pritisk nateganja pri določeni frekvenci v območje večjih vrednosti. V splošnem se giblje pritisk nateganja v območju od 0,1 do 5 kp.

Hitrost obdelave in optimalni pritisk pa sta odvisna tudi od velikosti obdelovane ploskve, kakor je razvidno s sl. 30. Pri majhnih ploskvah je nastavljanje optimalnega pritiska nateganja zelo kritično.

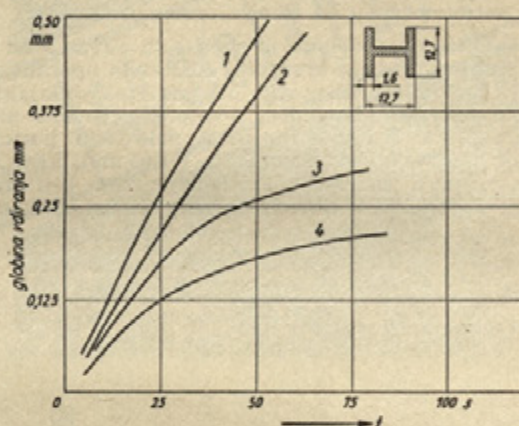
Hitrost obdelave narašča nadalje z velikostjo brusilnih zrn, vendar samo, če so dimenzije orodja velike v primeri z velikostjo zrn. Slika 31 prikazuje nekaj značilnih krivulj, ki se nanašajo na enako obliko orodja, a pri različni granulaciji (zrnatosti) brusilnega sredstva.

Poizkusi z različnimi materiali obdelovancev in različnimi brusilnimi sredstvi kažejo, da narašča erozija s trdoto brusilnega sredstva in vpliva na rezultate pri obdelavi tudi oblika brusilnih zrn in njihova zrušilna trdnost. Tako je n. pr. erozivni učinek pri ob-



Sl. 30. Optimalni statični pritiski nateganja kot funkcije prereza orodja

(1 —  $\phi$  6,3 mm, 2 —  $\phi$  12,7 mm, 3 —  $\phi$  38,1 mm)



Sl. 31. Vpliv zrnatosti erozijskega sredstva na hitrost obdelave

(1 — zrnatost 100, 2 — zrnatost 400, 3 — zrnatost 500, 4 — zrnatost 600)

| Material            | Eroziivni učinek<br>v $\text{mm}^3/\text{min}$ |                     | Razmerje<br>med eroziivnim<br>orodjem in<br>obdelovan-<br>cem v % | Delovni pogoji:                                                                                            |
|---------------------|------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                     | z<br>izsesavanjem                              | brez<br>izsesavanja |                                                                   |                                                                                                            |
| Steklo              | 1000                                           | 200                 | 1                                                                 | Frekvenca: 22 kHz<br>Moč: ca 300 W<br>Orodje: svetlo vlečeno jeklo<br>cev $\phi$ 8/10                      |
| Ferit               | 800                                            | 150                 | 1                                                                 |                                                                                                            |
| Germanij            | 800                                            | 180                 | 3                                                                 | Efekt površina erodirne<br>ploskve: 28 $\text{mm}^2$<br>Neh transformator: pre-<br>mer spodnjega konca 5mm |
| Ogije, grafit       | 500                                            | 100                 | 1                                                                 |                                                                                                            |
| Kremenov kristal    | 400                                            | 100                 | 2,5                                                               | Globina vdiranja:<br>brez izsesavanja 0,5mm<br>z izsesavanjem 0,20mm                                       |
| Silicij             | 400                                            | 80                  | 3                                                                 |                                                                                                            |
| Ahat                | 320                                            | 60                  | 5                                                                 | Eroz. sredstvo: borov kar-<br>bid, zrnatost 280<br>(pri diamant: diam. prah)                               |
| Trda keramika       | 250                                            | 50                  | 6                                                                 |                                                                                                            |
| Biser na matica     | 250                                            | 50                  | 6                                                                 |                                                                                                            |
| Spinel              | 100                                            | 25                  | 6                                                                 |                                                                                                            |
| Dural               | 40                                             | 6                   | 20                                                                |                                                                                                            |
| Rubin, safir        | 30                                             | 8                   | 10                                                                |                                                                                                            |
| Karbidna Irdina     | 30...40                                        | 5...7               | 50...80                                                           |                                                                                                            |
| Borov karbid        | 2,5...10                                       | 1...4               | 50                                                                |                                                                                                            |
| Med (Pt 58)         | 12                                             | 2                   | 40                                                                |                                                                                                            |
| Kromovo jeklo (12%) | 10                                             | 1,8                 | 120                                                               |                                                                                                            |
| Jeklo za avtomate   | 7                                              | 1,5                 | 100                                                               |                                                                                                            |
| Brzozno jeklo       | 8                                              | 1,8                 | 200                                                               |                                                                                                            |
| Diamant             | —                                              | 0,005               | 1000                                                              |                                                                                                            |

Tab. III. Eroziivni učinek in obraba orodja  
(po Lehfeltdtu)

delavi z borovim karbidom znatno večji kakor pri uporabi silicijevega karbida ali korunda.

Eroziivni učinek je v znatni meri odvisen tudi od fizikalnih lastnosti obdelovanega materiala, predvsem od njegove krhkosti. Podatki za obdelavo nekaterih materialov so razvidni iz tabele III. Hitrosti obdelave so največje pri steklu in določenih vrstah keramičnih materialov, medtem ko so pri kovinah znatno manjše. Rezultati se nanašajo na obdelavo pri normalni temperaturi. Ker je krhkost materialov pri nizkih temperaturah večja, bi obdelava s takimi pogoji utegnila dati znatno boljše rezultate. V tej smeri do sedaj še ni bilo nobenih raziskav.

Količina erodiranega materiala je nadalje odvisna od učinkovitosti dovajanja suspenzije v prostor med orodjem in obdelovancem. Dovajanje lahko poteka tudi z več strani. Pri velikih prerezih je treba še posebej paziti na enakomernost cirkulacije, zlasti pri vrtnanju globokih izvrtin, kjer je najbolje dovajati suspenzijo pod kurkom, s pogoji celo skozi votlo orodje. Ta način je zelo prikladen, vendar je uporaben le, če ga dopušča oblika obdelovanca oziroma orodja.

Tudi glede koncentracije suspenzije brusilnega sredstva obstaja neka optimalna vrednost, ki je odvisna od delovnih pogojev, vrste brusilnega sredstva,

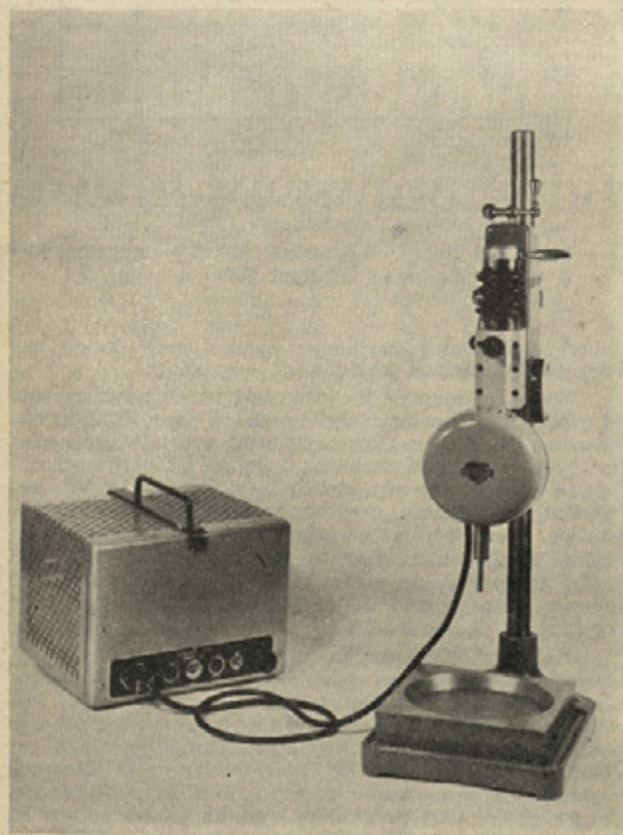


velikosti zrn ter lastnosti tekočine. Po navadi se uporablja 30—50 % koncentracija. Kot tekočina je navadno v rabi voda, ki ima majhno viskoznost, zadostno gostoto in dobre hladilne lastnosti.

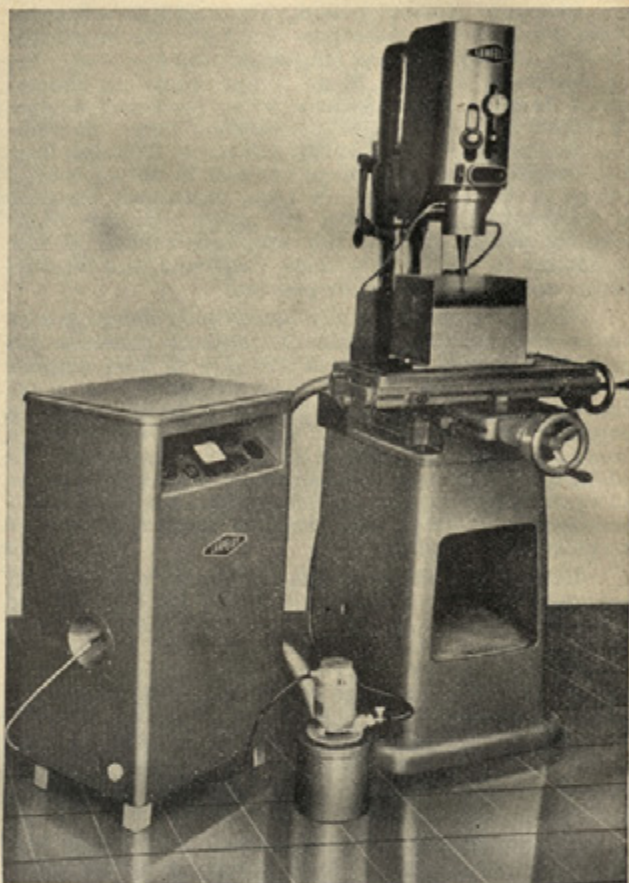
Kakor je že omenjeno, erodira pri obdelavi z ultra zvokom tudi orodje. Obraba je tem večja, čim mehkejši in čimbolj žilav je material obdelovanca. Kakor je razvidno iz tabele III, je lahko pri obdelavi določenih materialov obraba orodja nekajkrat večja od volumena erodiranega materiala obdelovanca. V takih primerih seveda obdelava z ultra zvokom ni najprikladnejša.

Pri izdelavi izvrtin in poglobitev, t. j. pri erozivnem vrtanju se obrablja orodje ne samo na čelni, ampak tudi na stranskih ploskvah. Ker je obraba le-teh na spodnji strani večja kakor zgoraj, postaja orodje in s tem tudi izvrtina konična. Zaradi tega je treba pri zelo natančni obdelavi uporabljati več orodij in morda tudi različna brusilna sredstva. Pri tem je navadno prvo orodje za nekaj desetink milimetra manjše od nazivne mere, drugo je manjše za nekaj stotink, tretje pa ima pravo mero. Medtem ko se uporablja pri prvem orodju zelo grobo sredstvo, je pri nadaljnjih operacijah potrebno zmerom finejše erozivno sredstvo.

Natančnost obdelave je predvsem odvisna od velikosti zrn erozivnega sredstva, od števila uporabljenih orodij ter od preciznosti kinematike podajalnega ustroja, t. j. od natančnosti, s katero je vodena ultrazvočna glava. Pri enem samem delovnem postopku se dajo dosegati natančnosti do  $\pm 0,05$  mm, ki v številnih primerih zadostuje. Pri tem pa mora biti orodje precej daljše kakor izvrtina, tako da lahko končno



Sl. 32. Namizni model 60 W — ultrazvočne vrtalne naprave (The Mullard Equipment Ltd. — London)



Sl. 33. Erozivna vrtalna naprava »DIATRON« (Dr. Lehfelddt & Co., Heppenheim)

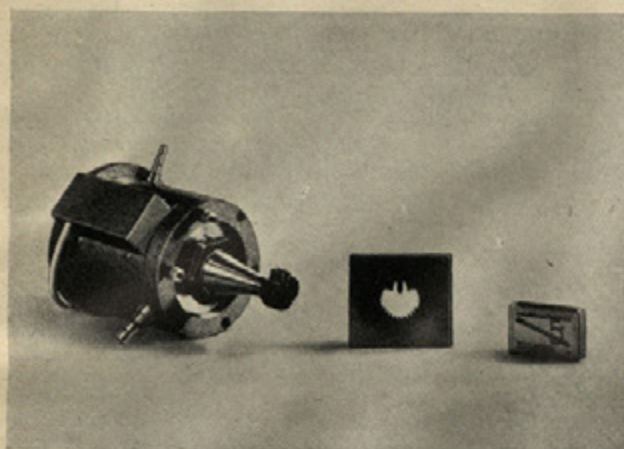
obdelavo dovršujejo stranske stene orodja. Pri vrtanju skozi lukenj z več zaporednimi orodji se dajo dosegati natančnosti tudi do 0,001 mm, potrebno pa je pri tem posebno fino brusilno sredstvo. Podobno kakor natančnost obdelave je tudi kvaliteta površine v največji meri odvisna od velikosti zrn brusilnega sredstva.

### 3. Naprave za erozivno obdelavo

Naprave za ultrazvočno erozivno obdelavo spominjajo po zunanem videzu predvsem na elektroerozijske stroje. Električni del, t. j. visokofrekvenčni generator, ki napaja ultrazvočno glavo s potrebnim visokofrekvenčnim tokom in večkrat tudi z enosmernim tokom za vnaprejšnje magnetiziranje vibratorja, je po navadi spravljen v posebni kaseti ali omari. Mehanični del sestavljajo stojalo z delovno mizo, akustična glava z vodilom in mehanizmom za pristavljanje ter naprava za obtok suspenzije brusilnega sredstva, t. j. posoda za tekočino, črpalka in ustrezni cevovodi ter naprava za hlajenje ultrazvočne glave.

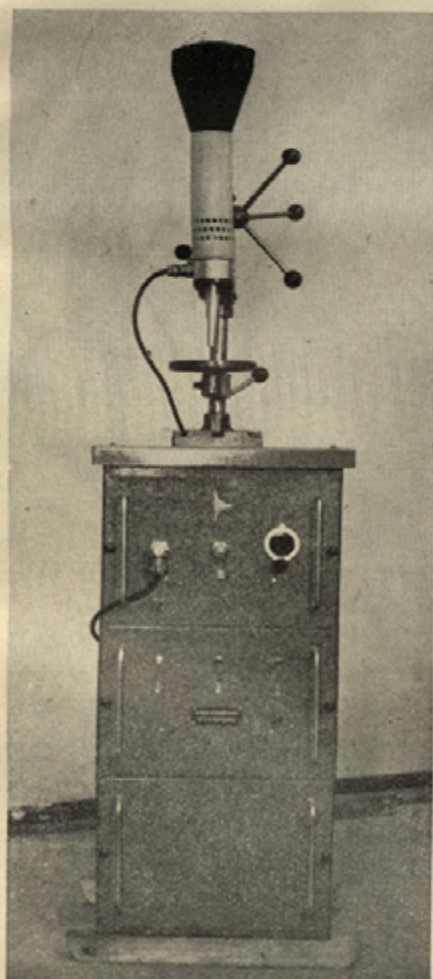
Slika 32 prikazuje enostaven namizni model naprave za ultrazvočno vrtanje, pri kateri znaša moč vibratorja 60 W pri frekvenci 20 kHz. Vibrator te naprave ima obliko palice s kvadratičnim prečezom  $18 \times 18$  mm. Sestavljen je iz lamelirane pločevine iz niklja ter je togo vpet v sredini, t. j. v vzdolžni ravnini, kjer je velikost amplitude enaka 0 (slika 24). Dolžina vibratorja znaša polovico valovne dolžine delovne frekvence. Navitje vibratorja je priključeno na oscilator, medtem ko sta stranski tuljavi, ki rabita za vnaprejšnje magnetiziranje, priključeni na enosmerno





Sl. 34. Ultrazvočna vrtilna glava z matrico  
(Dr. Lehfelt & Co., Heppenheim)

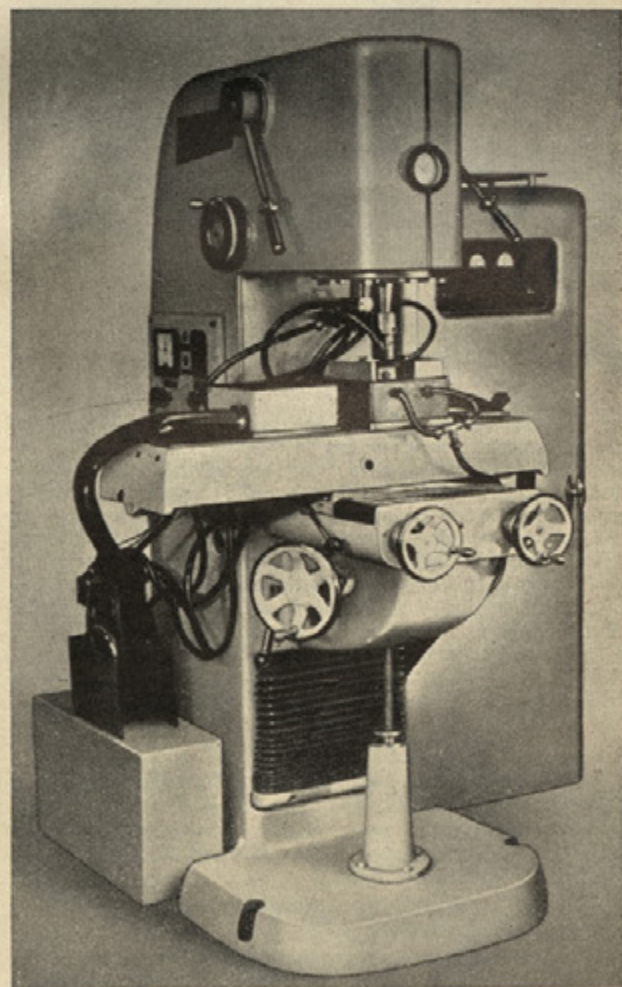
napetost. Spodnji konec palice nosi ploščico iz nerjavnega jekla, na katero se privije mehanični transformator, t. j. držalo za orodje. S to napravo se dajo izdelovati izvrtine s premerom od 0,15 do približno 20 mm, z maksimalno globino do okrog 12,5 mm.



Sl. 35. Ultrazvočna vrtilna naprava »PERFOSONIC« — 1500 W (Réalisations ultrasoniques — MEAUX)

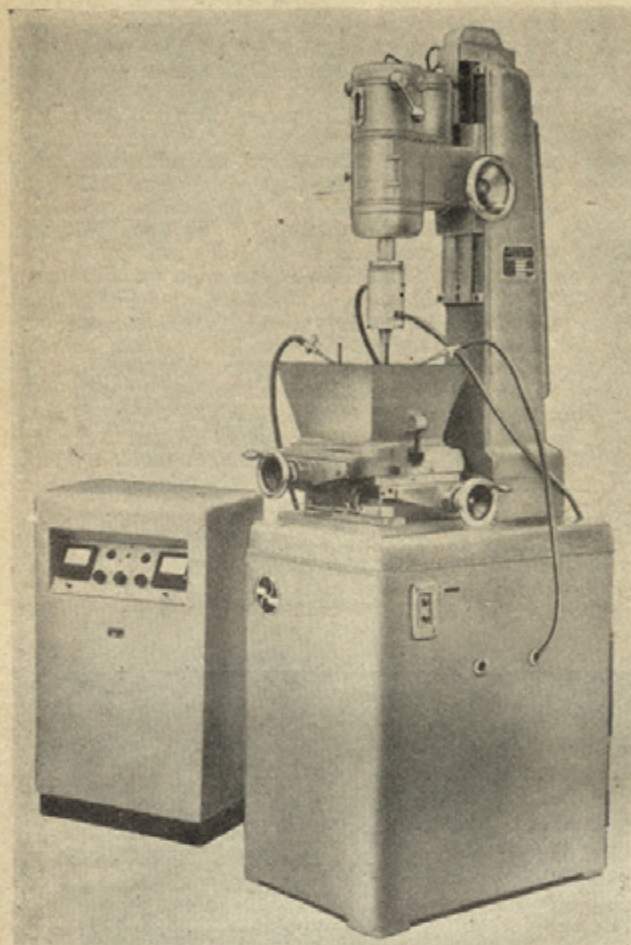
Slika 33 kaže erozivno vrtilno napravo »Diatron«, ki je zelo podobna preciznemu vrtilnemu stroju. Obdelovanec je vpet na mizi, ki se lahko premika v dveh koordinatah v vodoravni ravnini. S tem je dana možnost za natančno nastavljanje orodja. Ultrazvočna glava, ki nosi vibrator in orodje, je pomična v posebnih vodilih v vertikalni smeri navzgor in navzdol. Težo glave izravna vzmet, vendar le deloma, tako da je statični pritisk v smeri pristavljanja orodja, ki se mora prilagajati velikosti obdelovane ploskve, možno spreminjati v območju 0,05 do 2 kp. Posebna merilna ura je namenjena za kontrolo pritiska in premikanja orodja. Samodejna regulacija pristavljanja orodja k obdelovancu in uravnavanje statičnega pritiska omogoča delno avtomatizacijo delovnega postopka. Levo od vrtilne naprave je visokofrekvenčni generator, na katerem so vsi potrebni kontrolni instrumenti in elementi za regulacijo. Posebna črpalka rabi za obtok suspenzije brusilnega sredstva. Visokofrekvenčni generator oddaja moč 600 W pri frekvenci 22 kHz. Efektivna moč vibratorja znaša 400 W. Podatki o erozivnem učinku in relativni obrabi orodja za to napravo so razvidni iz tabele III.

Slika 34 predstavlja posnetek ultrazvočne glave z orodjem in obdelano matrico. Prerez skozi to glavo pa je shematično prikazan na sliki 25. Vibrator je potopljen v olju, poseben cevni sistem, skozi katerega



Sl. 36. Ultrazvočna vrtilna naprava »SONORODE« — 2 kW (Kerry's Ultrasonics Ltd. — Mullard Equipm. Ltd., London)





Sl. 37. Ultrazvočna vrtalna naprava »UZB — 3«  
(Prvomajska — Radioindustrija, Zagreb)

se pretaka voda, pa skrbi za hlajenje glave. Mehanični transformator, na katerem je naloženo orodje, se s pomočjo matice privija na vibrator. Maksimalna amplituda orodja znaša okoli 0,1 mm. S to napravo je možno vrtati izvrtine z najmanjšim premerom 0,3 mm — pri majhnih globinah — in največjim premerom 40 do 50 mm. Natančnost obdelave znaša  $\pm 0,02$  mm pri srednji in  $\pm 0,01$  mm pri fini granulaciji brusilnega sredstva.

Sliki 35 in 36 prikazujeta še dva druga tipa erozivnih naprav inozemskega izvora s 1500 W in 2000 W.

Domač ultrazvočni vrtalni stroj z generatorjem za 200 W, ki je skupen izdelek »Prvomajske« in »Radioindustrije« v Zagrebu, prikazuje slika 37.

#### 4. Primeri obdelave

Kot tehnološki postopek je ultrazvočna erozija ta čas v glavnem v rabi za

- izdelavo in popraviljanje vsakovrstnih orodij za štančanje in rezanje ter stiskalniških orodij in matric iz karbidnih trdin,

- za brušenje in oblikovanje rezalnih orodij iz keramike in karbidnih trdin,

- za izdelavo in obdelavo najrazličnejših elementov iz karbidnih trdin, feritov in drugih sintranih materialov,

- za obdelavo steklenih delov za razne optične naprave in delov iz keramike za elektrotehnično industrijo,

- za obdelavo kremenca, raznih polprevodnih materialov (germanija, silicija) in izolatorjev,

- za obdelavo dragih kamnov v juvelirstvu in urarski industriji,

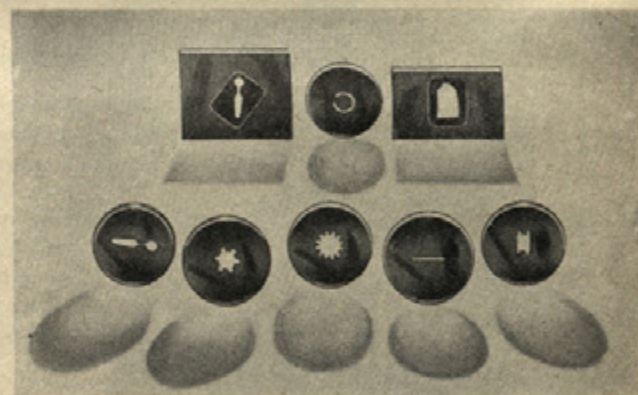
- za rezanje navojev, vrtanje zelo majhnih lukenj in zarez ter izdelavo krivih lukenj v delih iz karbidnih trdin, keramičnih materialov itd.

Velika prednost postopka je v tem, da je možno vrtati, vrezavati in izrezavati najbolj komplicirane oblike in profile v obdelovance iz najtrših materialov.

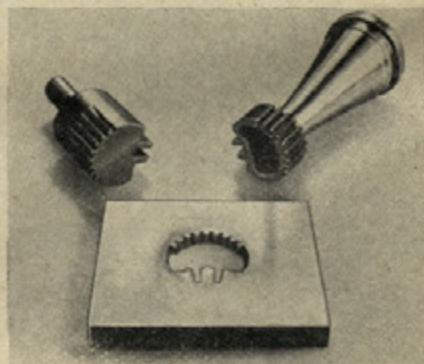
Slika 38 predstavlja vrsto majhnih matric iz karbidne trdine, ki so bile izdelane s pomočjo ultra zvoka, in sicer vsaka v eni uri oz. celo manj, z natančnostjo  $\pm 0,02$  mm. Za obdelavo teh deloma zapletenih profilov je potrebno le orodje iz jekla z ustrezno negativno obliko, ki pa se da izdelovati mnogo lažje in hitreje. Tudi če je zaradi natančnosti izdelave potrebnih več orodij, je prihranek na času še vedno znaten.

Pri orodjih za štančanje se lahko izdeluje vrtalno orodje za obdelavo matrice oz. rezalne plošče obenem in iz istega materiala kakor rezalni pestič. Slika 39. Oba dela sta obdelana v eni operaciji na frezalnem ali brusilnem stroju in nato po sredi prerezana. Desna polovica rabi kot orodje za izdelavo matrice, leva pa se zakali in uporablja pozneje kot pestič. Obe orodji in matrica so v tem primeru izdelani iz jekla, medtem ko je matrica na sliki 40 izdelana iz karbidne trdine.

Ker je pri ultrazvočnem erozivnem vrtanju brusilno sredstvo tudi med stranskimi stenami orodja in

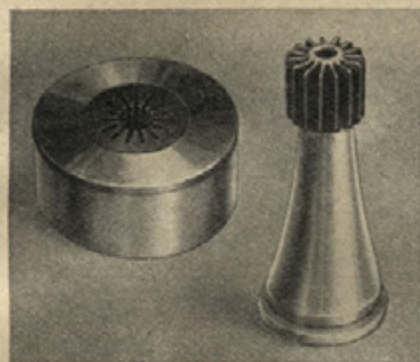


Sl. 38. Rezalne matrice iz karbidne trdine  
(Dr. Lehfelddt & Co., Heppenheim)

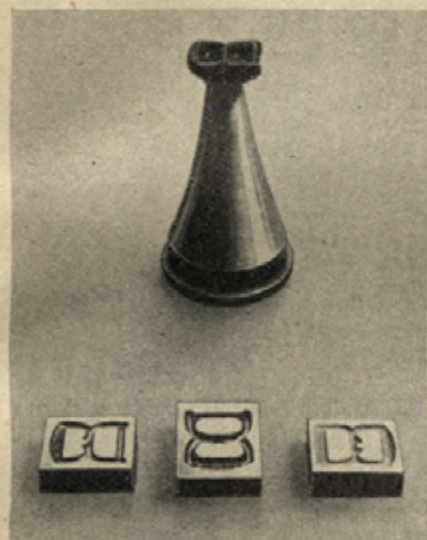


Sl. 39. Rezalna orodja iz orodnega jekla  
(Dr. Lehfelddt & Co., Heppenheim)





Sl. 40. Rezalno orodje iz karbidne trdine (Dr. Lehfeldt & Co., Heppenheim)



Sl. 41. Orodja za vtiskavanje — matrice iz karbidne trdine (Dr. Lehfeldt & Co., Heppenheim)

obdelovanca, je dimenzija izvrtine na zgornji strani navadno nekoliko večja kakor spodaj. Obdelana izvrtina je torej rahlo konična. Taka koničnost pa je pri rezalnih orodjih za štancanje ravno zaželena. Ker je izvrtina tudi na izstopni strani orodja večja za najmanj dvojni premer brusilnih zrn — pri zrnih s  $\phi 50 \mu$  torej okrog 0,1 mm — mora biti orodje izdelano pod mero, da bi dosegli potrebno natančnost.

Ultrazvočni postopek omogoča tudi izdelavo stikalniških orodij in orodij za vtiskavanje z najbolj zapletenimi oblikami. Slika 41 kaže posnetek orodja in ustrezne matrice za vtiskavanje iz karbidne trdine. Ker se orodje na čelni strani precej obrablja, je treba včasih uporabljati več orodij zapovrstjo, da se doseže želena natančnost reprodukcije.

Obsežno področje za uporabo ultrazvočne obdelave je proizvodnja transistorjev. Materiali, iz katerih so izdelani — germanij in silicij — so dovolj krhki in trdi, da se dajo zelo dobro obdelovati. Zelo gospodaren je dalje postopek tudi za rezanje kristalov, pri čemer se lahko uporabljajo orodja, ki omogočajo več rezov istočasno. Tudi erozivna obdelava feritnih materialov (keramičnih materialov z magnetnimi lastnostmi), ki se uporabljajo za izdelavo raznih elementov na področju industrijske elektronike, je zelo preprosta in cenena.

Nasteti primeri so seveda samo del tehnoloških operacij, ki se dandanes že izvajajo s pomočjo ultrazvoka. Z nadaljnjim izpopolnjevanjem postopka pa se utegne njegova uporabnost še znatno razširiti.

Z ultrazvočno erozivno metodo je moderna obdelovalna tehnika pridobila nov pomemben postopek za končno obdelavo najrazličnejših materialov, ki v številnih primerih uspešno nadomešča klasične postopke in omogoča reševanje mnogih tehnoloških problemov, ki so bili do sedaj skoraj nerešljivi. Odlikuje se predvsem z veliko storilnostjo, natančnostjo in odlično kvaliteto površin pri obdelavi najtrših materialov. Obdelovanci niso izpostavljeni termičnim obremenitvam, ki bi povzročale kakršne koli deformacije ali spremembe v strukturi materiala. Delo pri strojih je preprosto in varno, kvalificirano strokovno osebje je potrebno samo pri izdelavi in montaži orodij. Orodja so izdelana iz navadnih materialov po običajnih postopkih, njihova obraba je pri obdelavi krhkih materialov razmeroma majhna. Potrebna brusilna sredstva so poceni, diamantni prah se uporablja le pri obdelavi diamantov.

Glavne pomanjkljivosti postopka so za zdaj:

- omejena velikost oz. masa orodja (maks. do 90  $\phi$ ),
- težave s pritrdjevanjem orodja na vibrator ter
- odvisnost rezultatov pri obdelavi od velikega števila parametrov.

Za uspešno izpopolnitev postopka v tej smeri pa je potrebno še precej raziskovalnega dela.

Pri obdelavi trdih in krhkih materialov — nevodnikov, ultrazvočna erozija ta čas praktično nima tekmeča. Obdelava električno prevodnih materialov poteka pri nekaterih elektroerozivnih postopkih sicer znatno hitreje, vendar jih glede na natančnost in kvaliteto površin prekaša postopek z ultra zvokom.

#### Literatura

Bergmann, L.: Der Ultraschall und seine Anwendung in Wissenschaft und Technik. Hirzel Verl. Stuttgart 1954.

Lehfeldt, W.: Ultraschall in der Feinbearbeitung. DEVA-Fachverlag, Stuttgart 1958.

Matauschek, J.: Einführung in die Ultraschall-technik. VEB Verlag Technik, Berlin 1957.

Neppiras, E. A.: Ultrasonics in industry. Research 6 (1953), S. 271.

Atherton, L.: Cleaning by Ultrasonics. British Communications and Electronics March, 1957.

Brockelsby, C. F.: Ultrasonic Machining. Journal of the Institution of Electrical Engineers, Vol. 4, April 1958, S. 168.

Neppiras, E. A. — Foskett, R. D.: Ultrasonic Machining. Phillips Technical Review 1956-57, S. 325 in 368.

(Iz tega dela so povzete slike 27 do 31.)

Lehfeldt, W.: Die industriellen Anwendungen des Ultraschalls. Industrie-Rundschau H. 2/3 — 1957.

Kogan, M. G. — Tuzlukov, V. A.: Ultrazvukovi stanoki dlja obrabotki tverdyh materialov. Vestnik Mašinstroenija 11/1958, S. 92.

Dikušin, V. I. — Barke, V. N.: Ultrazvukovaja erozija i ee zavisimost ot kolebatelnykh harakteristik instrumenta. Stanki i instrument 5/1958, S. 19.

Rozenberg, L. D. — Jahimović, D. F.: Ultrazvukovi sposobi obrabotki tverdyh i hrupkiy materialov. Vestnik Mašinstroenija 2/1959, S. 51.

Avtor: Ing. Frane Goligranc, Oddelek za strojništvo FES na Univerzi v Ljubljani