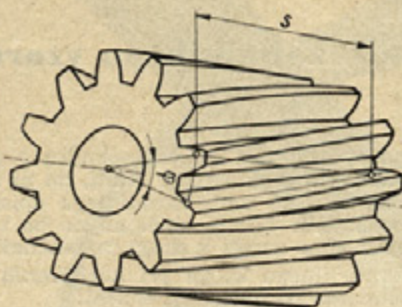




Slika 2

razmeroma preprosto mogoče prirediti tudi frezalni stroj, ki ima med priborom dober univerzalni delilnik. Izdelati je treba samo primeren tipalnik, za kar lahko uporabimo merilno urico (komparator), če ji na konico dodamo manjši vzvod, na koncu izoblikovan v kroglico.

Poglavitna prednost opisanega načina določanja kota poševnosti β_o s pomočjo meritve dolžine vzpona je v tem, da je meritev povsem neodvisna od premera, na katerem izvajamo meritev. Ni torej treba poznati premera delilnega kroga niti paziti, na katerem premeru merimo.

Poizkusni zobniki, določeni po opisani metodi in izdelani na Institutu za mehansko tehnologijo oddelka za strojništvo, so pokazali po vgraditvi, da nalegajo povsem natančno po celotni širini zob, kar je za trajnost zobnika izrednega pomena.

Računski primer: Na nekem zobniku so bile z direktnim merjenjem dobljene naslednje vrednosti:

$$z = 16 \text{ zob}, d_k = 72,50 \text{ mm}, d_f = 57,42 \text{ mm}$$

S primerjanjem s pomočjo standardnega orodja sta bili ugotovljeni vrednosti:

$$m_n = 3,5, h = 7,70 \text{ mm}$$

Na aparatu za merjenje vzpona sta bili dobljeni vrednosti:

$$s = 36,870 \text{ mm in } \varphi = 36^\circ$$

Iz vstavljanja teh vrednosti v označene enačbe izhaja:

$$(6): L = \frac{360^\circ \cdot 36,870}{36^\circ} = 368,70 \text{ mm}$$

$$(5): \sin \beta_o = \frac{3,5 \cdot 16}{368,70}, \beta_o = 28^\circ 30'$$

$$(1): d_o = \frac{3,5 \cdot 16}{\cos 28^\circ 30'} = 63,72 \text{ mm}$$

$$(3): 63,72 = 57,42 + 2 \cdot 7,70 - 2 \cdot 3,5 \cdot (1 + x), x = 0,3$$

Dejanska globina rezanja je potem:

$$h' = \frac{d_k - d_f}{2} = \frac{72,50 - 57,42}{2} = 7,54 \text{ mm}$$

Zobje so torej skrajšani, skrajšanje pa znaša:

$$x \cdot m = h - h' = 7,70 - 7,54 = 0,16 \text{ mm.}$$

Avtor: ing. Hinko Muren, Oddelek za strojništvo Univerze v Ljubljani

DK 534.8—8:621.7

Ultra zvok kot tehnološko sredstvo za obdelavo materialov

FRANC GOLOGRANC

(Nadaljevanje)

II. PROIZVAJANJE ULTRA ZVOKA IN TEHNIČNA IZVEDBA ULTRAZVOČNIH ODDAJNIKOV

Za proizvodnjo ultrazvočnih valov služijo razne mehanične naprave (ultrazvočne piščali in sirene) ter elektroakustični vibratorji. Ultrazvočne piščali se uporabljajo v raznih izvedbah za proizvodnjo ultra zvoka v zraku ali plinih in dajejo frekvenco do 120 kHz, medtem ko se s pomočjo ultrazvočnih siren daje dosegati intenzivna ultrazvočna valovanja v zraku s frekvencami največ do 50 kHz. Za praktično uporabo prihajajo pri obravnavanih postopkih v poštev le elektroakustični oddajniki, ki omogočajo pretvarjanje električne energije v mehansko ozir. zvočno energijo.

Trdna telesa lahko vzbujamo v nihanje s pomočjo magnetostriksijskega (ozir. piezomagnetičnega) ali elektrostriksijskega (ozir. piezoelektričnega) efekta, ki nastajata pri določenih materialih in povzročata pod vplivom magnetnega ali električnega polja elastične napetosti ozir. elastične deformacije predmeta, izdelanega iz takega materiala. Palice, plošče in druge oblike takih vibratorjev nihajo v magnetnem ali električnem polju s frekvenco nihanja polja. Amplitude tega nihanja dosegajo največjo vrednost v primeru resonance, ki nastane takrat, če je lastna frekvenca mehanskega nihanja vibratorja enaka frekvenci vsiljenega nihanja. Prenos ultrazvočnega nihanja na kako snov je možen le tedaj, če se oddajna ploskev vibratorja neposredno ali posredno po kakih drugih snovi dotika s to snovjo. Pri tem se širijo ultrazvočni valovi v smeri nihanja končnih ploskev vibratorja, t. j. v smeri nastajajočih deformacij.

1. Magnetostriksijski oddajniki

Po magnetostriksijskem načelu se izrablja pojav, pri katerem feromagnetni materiali, n. pr. nikijeva palica, v magnetnem polju spreminjajo dolžino. Če postavimo tako palico v sredo tuljave, skozi katero teče visokofrekvenčni električni tok, se bo palica zaradi nihanja magnetnega polja periodično raztezala in krčila. To mehanično nihanje ozir. spreminjanje dolžine palice je izvor ultrazvočnih valov, ki izstopajo iz obeh koncev palice s frekvenco izmeničnega toka v tuljavi.

Slika 4 prikazuje longitudinalno nihanje take, na obeh koncih proste palice, in sicer v osnovni, drugi in tretji harmonični frekvenci. Pri tem je elongacija Δl , ki nastaja v smeri osi x (vzdolžni smeri) narisana kot funkcija koordinate x za dve različni fazi nihanja. S puščicama je označena smer premikanja posameznih elementarnih delcev v določenem trenutku. Ker v vozlišču delci mirujejo — elongacij torej ni — je možno na tem delu palice pritrditi, ne da bi to vplivalo na potek nihanja.

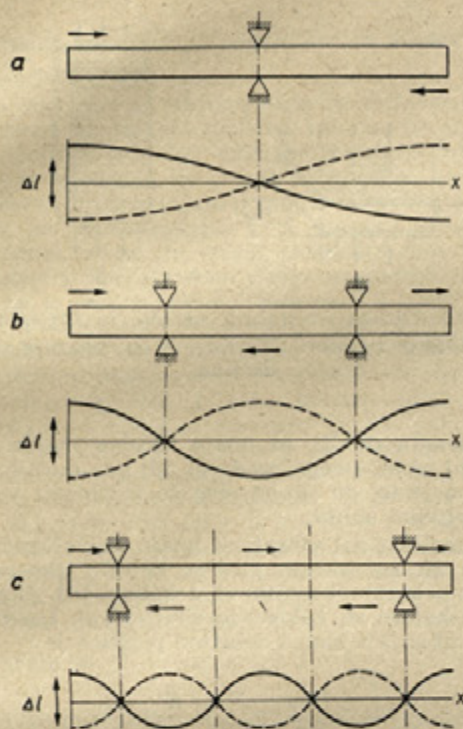
Lastna frekvenca longitudinalnega nihanja palice z dolžino l je podana z enačbo

$$f = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{k}{l}$$

pri čemer je $n = 1, 2, 3, \dots$ red harmoničnega nihanja,

E = modul elastičnosti,

ρ = gostota materiala.



Sl. 4. Longitudinalno nihanje na obeh koncih proste palice

a) v osnovni, b) v drugi in c) v tretji harmonični frekvenci

V osnovni frekvenci je dolžina palice l enaka

$$\text{polovični valovni dolžini} = \frac{\lambda}{2}.$$

Izraz

$$k = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

pomeni za določen material karakteristično velikost, ki jo v literaturi označujejo kot frekvenčno konstanto.

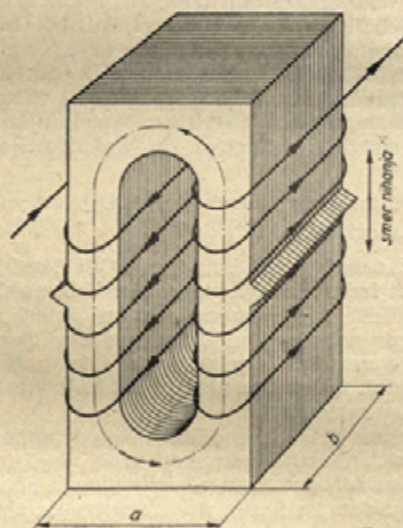
Ta znaša n. pr. za nikelj 2 350 m/s. Palica iz niklja mora biti torej pri frekvenci 10 kHz dolga 235 mm, pri frekvenci $f = 100$ kHz le še 23,5 mm. Maksimalne amplitude nihanja nastajajo takrat, če sta lastna frekvenca palice in frekvenca oddajnika izmeničnega toka v resonanci. Te amplitude pa so zelo majhne in znašajo pri osnovni frekvenci le približno 10^{-3} l mm.

Prednosti magnetostrikijskih akustičnih oddajnikov ali vibratorjev so robustna izvedba, neobčutljivost pri preobremenitvah in možnost uporabljanja nizkih obratovalnih napetosti. Pomanjkljivi so glede na to, da so uporabni samo za proizvodnjo nizkih frekvenc od 20 do največ 175 kHz, ker se pri višjih frekvencah zelo poslabša izkoristek elektromehanične transformacije zaradi magnetičnih izgub v materialu.

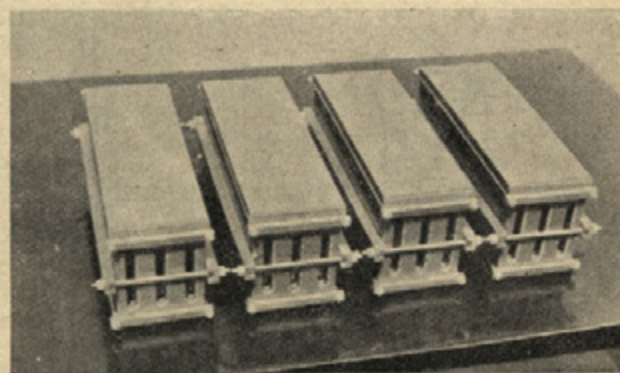
Za doseg optimalnega učinka mora biti magnetostrikijski efekt materiala, iz katerega je izdelan vibrator, čimvečji, magnetične izgube in mehanično dušenje čimmanjše. Magnetostrikijski efekt ni odvisen samo od vrste materiala, temveč tudi od poprejšnje mehanične in termične obdelave, vnaprejšnjega magnetiziranja, jakosti magnetnega polja in temperature.

Med številnimi znanimi magnetostrikijskimi materiali se največ uporabljajo nikelj in zlitine niklja, kobalta in nekaterih drugih kovin. V zadnjih letih pa uporabljajo pri izdelavi piezomagnetičnih vibratorjev tudi sintrane nikelj-cinkove ferite, ki jih je mogoče izdelovati v vsaki poljubni obliki.

Najenostavnejša izvedba magnetostrikijskega vibratorja obstaja načeloma iz masivne feromagnetične palice, ki jo obdaja tuljava. Ta enostavna oblika pa ima celo vrsto pomanjkljivosti, predvsem majhno površino sevanja in velike izgube, ki jih povzročajo vrtilinasti tokovi v masivnem jedru. Zaradi tega izdelujejo praktično največ ploščate, lamelirane vibratorje, ki so sestavljeni iz večjega števila posameznih lamel iz izolirane tanke pločevine, ki zmanjšujejo omenjene izgube. Slika 5 prikazuje eno izmed mnogih možnih oblik takega ploščatega vibratorja. Površina sevanja je povečana s tem, da je vibrator sestavljen iz velikega števila pločevin v določeni obliki. Slika 6 je posnetek štirih magnetostrikijskih vibratorjev (brez navitja) v velikosti 85×250 mm za frekvenco $f = 20$ kHz. Razen prikazanih so možne tudi še druge oblike n. pr. cevasta, obročasta ter razne specialne oblike, ki lahko rabijo tudi za koncentracijo ultrazvočnih valov.



Sl. 5. Oblika ploščatega piezomagnetičnega vibratorja



Sl. 6. Posnetek štirih magnetostrikijskih vibratorjev brez navitja (Schoeller & Co., Frankfurt/M.)

2. Piezoelektrični oddajniki

Za proizvodnjo ultrazvočnih frekvenc nad 200 kHz se uporabljajo piezoelektrični oddajniki. Pri teh rabi za proizvodnjo mehanskih nihanj recipročni piezoelektrični efekt, ki temelji na odkritju bratov Curie ter obstaja v tem, da povzročajo mehanske deformacije nekaterih kristalov v smeri kristalografske osi električno polarizacijo in obratno, da električno polje deformira tak kristal v določeni osi.

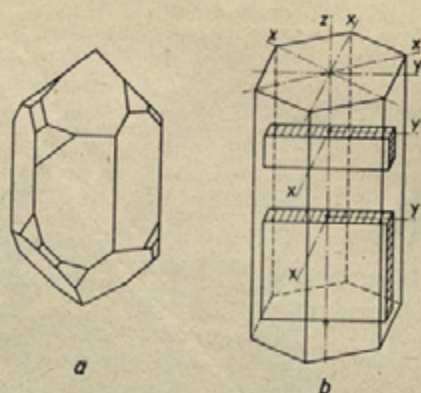
Piezoelektrični efekt nastaja tako pri naravnih kakor tudi pri sintetičnih kristalih. Za ultrazvočne namene se največ uporablja kremenov kristal, ki ga uvrščamo v trigonalni kristalni sistem (sl. 7a). Ima tri polarne (električne) osi, ki so med seboj električno enakovredne ter eno nepolarno simetrijsko os. Če tak kristal postavimo v električno polje, tako da se smer električnega polja ujema s smerjo ene izmed polarnih osi, se bo kristal deformiral, pri čemer se v smeri polarne osi skrči, pravokotno na to smer pa raztegne ozir. obratno. Deformacija kristala je največja, če deluje električno polje v smeri ene izmed polarnih osi. Zato morajo biti ploščice, ki rabijo kot vibratorji pri ultra zvoku, izrezane iz kristala tako, da sta dve paralelni ploskvi pravokotni na eno izmed polarnih osi.

Slika 7b prikazuje normalno orientacijo kristalnega reza ultrazvočnih vibratorjev iz kremenca. Slika 8 kaže dve, tako iz kristala izrezani ploščici. Prva niha v smeri debeline, druga v smeri dolžine. Ploskvi, ki stojita pravokotno na električni osi x , sta obloženi s kovinsko oblogo. Ti dve elektrodi priključimo na visokofrekvenčno izmenično napetost, ki vzbuja v ploščici elastično nihanje s frekvenco oddajnika. Pri tem nastajajo elastične napetosti in deformacije v dveh smereh.

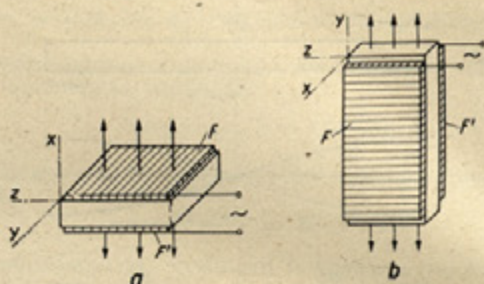
- a) v smeri električnega polja, t. j. osi x ,
b) v smeri osi y .

Prvi efekt označujemo kot recipročni longitudinalni, drugega kot transversalni piezoelektrični efekt. Pri tem imajo napetosti in deformacije v eni smeri nasprotni smisel kakor napetosti in deformacije v drugi smeri. Maksimalna amplituda se pojavlja takrat, če sta mehanska lastna frekvenca ploščice in frekvenca električnega polja v resonanci.

Kremenov kristal se odlikuje po kemični obstojnosti, veliki trdnosti, obstojnosti proti vlagi in majhni temperaturni odvisnosti piezoelektričnega efekta. Njegova slaba stran pa je, da ima razmeroma slab piezoelektrični efekt, tako da so pri obratovanju teh oscilatorjev potrebne zelo visoke električne napetosti. Namesto dragega kremenca uporabljajo v novejšem času za ultrazvočne namene keramične vibratorje iz barije-



Sl. 7. Orientacija kristalnega reza pri kremenovem kristalu
a — oblika kristala, b — orientacija reza



Sl. 8. Oblika kristalnih ploščic iz kremenca
a) za nihanje v smeri debeline, b) za nihanje v smeri dolžine

vega titanata (BAT), ki imajo izredno močan piezoelektrični efekt. Druga prednost teh keramičnih vibratorjev pa je ta, da jih je mogoče izdelovati v skoraj vsaki poljubni obliki.

Piezoelektrični vibratorji imajo največkrat obliko okroglih ali kvadratnih ploščic, katerih dimenzije so velike v primerjavi z njihovo debelino, t. j. dimenzijo, v smeri katere se valovanje širi (sl. 8a). Lastna frekvenca nihanja v smeri debeline ploščice je

$$f_d = \frac{n c_d}{2d} = \frac{n}{2d} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{k_d}{d}$$

pri čemer je:

- k_d = frekvenčna konstanta,
 $n = 1, 2, 3, \dots$ red harmoničnega nihanja,
 c_d = zvočna hitrost v smeri debeline,
 E = modul elastičnosti,
 ρ = gostota.

Pri ploščici iz kremenca znaša konstanta za nihanje v smeri debeline ploščice $k_d = f d = \text{konst} = 2870 \text{ m/s}$. Pri frekvenci 100 kHz bi torej morala biti ploščica debela 28,7 mm. Taki vibratorji se uporabljajo za frekvenčno območje nad 200 kHz. Zaradi transversalnega efekta nastajajo v nihanju kristalnih ploščic še druga nihanja (upogibno, strižno), mimo tega pa so z osnovno frekvenco lahko sklopljene še višje harmonične vrste.

Druga vrsta piezoelektričnih vibratorjev ima obliko dolge, ozke ploščice ali palice. Pri teh niha palica longitudinalno v smeri dolžine (sl. 8b). Osnovna frekvenca je podana z izrazom

$$f_l = \frac{n c_l}{2l} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{k_l}{l}$$

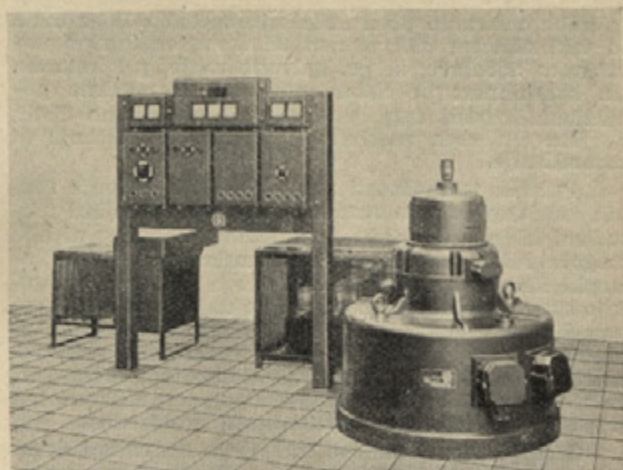
iz česar izhaja, da je frekvenca zopet odvisna od dimenzije, v smeri katere se valovanje širi, t. j. od dolžine palice in od konstante k_l za nihanje v tej smeri, ki znaša pri kremenju $k_l = 2700 \text{ m/s}$. Ploščica lahko niha tudi z višjimi harmoničnimi frekvencami. S takimi vibratorji je mogoče dosegati ultrazvočne frekvence od 20 do 200 kHz. Njihova slaba stran je ta, da je čelna ploskev, iz katere izhajajo ultrazvočni valovi, relativno majhna.

Razen obeh obravnavanih osnovnih oblik piezoelektričnih vibratorjev obstaja še cela vrsta specialnih oblik, ki omogočajo tudi koncentracijo ultrazvočne energije. Posebne možnosti dajejo pri teh keramični piezoelektrični materiali, n. pr. barijev titanat, ker so iz njih izdelani vibratorji uliti ali stiskani, zaradi česar je izvedljiva vsaka poljubna oblika, kakršne pri kristalih ni mogoče doseči.

3. Izvedbe ultrazvočnih oddajnikov in generatorjev

Elektroakustični oddajniki so sestavljeni v glavnem iz dveh delov: mehaničnega in električnega. Izvedbe in oblike so zelo različne, ravno pa se po namenu uporabe, potrebni moči in frekvenci. Magnetostrikijski vibratorji se zaradi mehanične neobčutljivosti dostikrat uporabljajo popolnoma nezaščiteni. Največkrat pa so vibratorji, t. j. neposredni oddajnik ultrazvočnih valov, in ostali električni deli (tuljave, kondenzatorji itd.) združeni v tako imenovani akustični glavi, ki je konstruktivno izvedena v obliki zaprte posode. Piezoelektrični vibratorji morajo biti včasih še posebej zaščiteni, zlasti če so neposredno izpostavljeni kakršnim koli posebnim mehaničnim, električnim ali kemičnim vplivom. V takem primeru oddaja vibrator mehansko energijo navzven preko pokrova ali posebne membrane, ki posreduje akustični spoj s sredstvom, meječem na zunanjo steno membrane. Pri tem mora biti membrana izvedena tako, da prehajajo ultrazvočni valovi iz vibratorja v sredstvo čim bolj neovirano. Prenos energije mora biti čimmanj dušen, da se preprečujejo izgube in nevšečno razvijanje toplote. Pogostoma je potrebno tudi hlajenje. Propustnost ultra zvoka skozi membrano ozir. steno je odvisna od debeline stene in je največja pri $d = n \frac{\lambda}{2}$.

Elektromehanični in elektroakustični izkoristek magnetostrikijskih vibratorjev znaša pri nizkih frekvencah (20 kHz) med 50 in 80 % in se zmanjša pri 200 kHz na 20 %. Maksimalna jakost ultrazvočnega sevanja, ki se da doseči pri teh vibratorjih, je 0,07 do 0,10 W/mm² pri prenosu ultrazvočne energije v vodo. Pri piezoelektričnih vibratorjih je izkoristek odvisen od številnih faktorjev, znaša pa pri dobrih izvedbah tudi do 80 %. Z ravnimi ploščicami iz kremenovega kristala je možno dosegati v vodi jakost do 0,50 W/mm².



Sl. 10. Visokofrekvenčni motorni generator za 12 KW (Schoeller & Co., Frankfurt/M)

Keramični piezoelektrični vibratorji ne dopuščajo tako velikih obremenitev, največ 0,05 ... 0,10 W/mm², pa tudi izkoristek je znatno manjši.

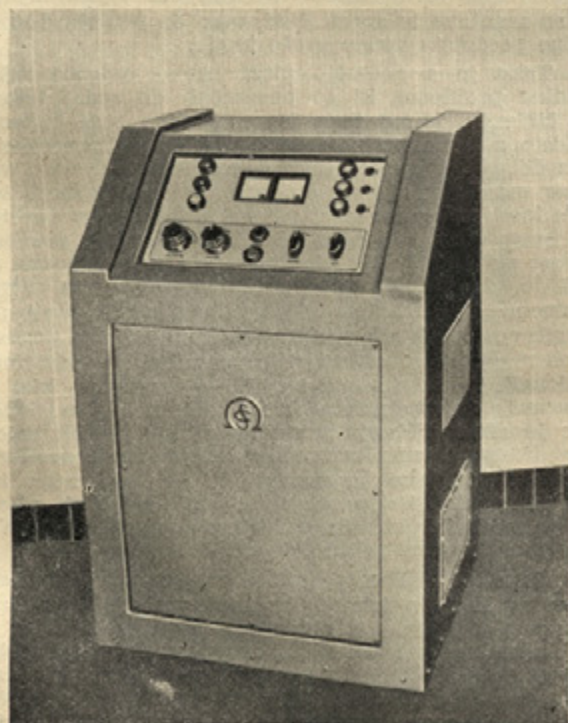
K ultrazvočnemu oddajniku spada še visokofrekvenčni generator, ki napaja električni del vibratorja z visokofrekvenčno električno energijo preko posebnega dovodnega kabla. Moč in frekvenco generatorjev je možno spreminjati v določenih mejah. Zelo važno pa je, da ostane nastavljena frekvenca konstantna, ker je treba napajati oddajnik ultra zvoka z resonančno frekvenco, če želimo dobiti optimalni izkoristek. Za področja visokih frekvenc prihajajo kot izvor energije v poštev le elektronski cevni generatorji, ki so za manjše moči do okrog 3 ... 4 kW tudi najprimernejši. Slika 9 prikazuje tak visokofrekvenčni generator z izhodno močjo 1,5 kW. Električni izkoristek pri cevnih generatorjih je razmeroma slab in znaša 40 do največ 70 odstotkov.

Za večje moči in nizke frekvence se uporabljajo tudi motorni generatorji, pri katerih poganja poseben elektromotor visokofrekvenčni generator. Izkoristek teh generatorjev je običajno manjši od 50 %. Na sliki 10 je prikazan tak generator za frekvence 22 kHz z izhodno močjo 12 kW. Frekvence je možno spreminjati v območju ± 5 %. Iz posnetka je razvidna tudi stikalna plošča ter del za vnaprejšnje magnetiziranje in regulacijo. S takimi generatorji je možno napajati tudi večje število magnetostrikijskih vibratorjev istočasno. V podrobnosti električne opreme za napajanje ultrazvočnih oddajnikov na tem mestu ne bomo posegali.

III. POSTOPEK ČIŠČENJA IN RAZMAŠČANJA PREDMETOV Z ULTRA ZVOKOM

Pri uporabi ultra zvoka za čiščenje so predvsem zanimivi vplivi energije ultrazvočnega valovanja na površine raznih obdelovancev. Pri tem gre v glavnem za efekte, ki nastajajo v zelo intenzivnih ultrazvočnih poljih na meji tekočega in trdnega sredstva. Ti efekti povzročajo na prizadetih površinah določene spremembe, ki se dajo izkoriščati za zelo učinkovito čiščenje in razmaščanje različnih obdelovancev.

V industrijski proizvodnji kvaliteta izdelkov pogosto ni odvisna samo od precizne mehanske obdelave, ampak tudi od čistoče obdelanih površin in odstranitve vseh morebitnih ostankov od obdelave. Pri tem gre lahko za najrazličnejše vrste umazanije, maščob ali ostankov polirnih in brusilnih sredstev, ki jih



Sl. 9. Visokofrekvenčni cevni generator za 1500 W (Schoeller & Co., Frankfurt/M)

je treba odstraniti pred nadaljnjo uporabo. Pogostoma so taki očiščeni deli namenjeni še za naknadno površinsko obdelavo, n. pr. galvaniziranje, pri katerem sta brezhibnost in čistost površine še posebno pomembna. Zaradi tega je doseganje ekstremno čistih površin cilj vseh sodobnih postopkov za čiščenje in razmaščanje.

Potrebe in možnosti za industrijsko čiščenje raznih izdelkov so zelo raznovrstne. Z dosedanjimi metodami čiščenja številnih praktičnih problemov ni bilo mogoče rešiti tehnično in ekonomsko zadovoljivo. Postopki kemičnega ali elektrolitskega čiščenja omogočajo sicer popolno razmaščanje, ne dajo pa se z njihovo pomočjo hkrati odstranjevati netopljivi delci, ki se močno drže površine, tako da je v številnih primerih potrebno še poznejše ročno čiščenje bodisi z brisanjem, krtačenjem ali izpihovanjem s stisnjenim zrakom, kar je posebno neprikladno v množinski proizvodnji.

Izdelki finomehanske industrije z raznimi drobnimi navoji, utori, zarezi, izvrtinami s premerom nekaj desetink milimetra itd. se dajo ročno čistiti le s težavo brez nevarnosti, da bi se hkrati ne poškodovali zelo občutljivi deli. Mimo tega je ravno za take precizne dele potrebna izredna stopnja čistosti, če naj zanesljivo opravljajo funkcijo. Tudi v optiki in urarski industriji, industriji merilnih instrumentov in najrazličnejših sestavnih delov za elektrotehniko, radio-tehniko itd. je treba čistiti predmete, pri katerih so potrebne skrajno čiste površine tudi na zelo nedostopnih mestih. Pri večjih izdelkih so ti problemi morda nekoliko preprostejši, vendar je n. pr. naknadna ročna obdelava poliranih delov neekonomična, ker je za odstranjevanje ostankov polirnega sredstva iz navojev, zarez, gravur itd. potrebno mnogo časa.

Iz prakse vemo, da tečejo kroglični ležaji znatno mirneje, če so dobro očiščeni. Tudi drobne luknjice, oljni kanali pri delih eksplozijskih motorjev in drugih strojev se samo z izpiranjem ne dajo temeljito očistiti. Prav tako težavno je čiščenje notranjih sten tankih dovodnih cevi v šobah za vbrizgavanje, pri medicinskih instrumentih in injekcijskih iglah ter številnih drugih delih. Ultra zvok ustvarja prav na tem področju znatne prednosti pred vsemi drugimi postopki.

1. Tehnološke značilnosti čistilnega postopka

Že pri obravnavanju fizikalnih lastnosti ultra zvoka so bili nakazani vplivi izredno velikih sil, ki nastajajo pri pospeševanju elementarnih delcev snovi v ultrazvočnem polju. Te sile delujejo tudi na delce umazanije in ostanke po obdelavi na površini predmeta, ki je izpostavljen ultrazvočnemu sevanju, tako da je možno odstraniti delce čisto mehanično. Pri tem je načelno vseeno, ali gre pri omenjenem delcu za trdno snov — torej za ostanek od obdelave ali izsušeno umazanijo — ali za plast tekočine, n. pr. maščobe. Gibalna energija se namreč pri razširjanju ultrazvočnega valovanja v tekočini prenaša tudi na delce umazanije na ploskvah, ki so izpostavljene ultrazvočnemu sevanju, pri čemer so relativne amplitude gibanj teh delcev odvisne od velikosti delcev in frekvence nihanja. Tekočina, v katero so potopljene obdelovanci, se mora seveda dotikati njihove površine ozir. umazanije, ker sicer ne more priti do prenosa ultrazvočne energije in želenih učinkov.

Mehanizem ultrazvočnega čiščenja je zelo zapleten in še zmerom ni popolnoma pojasnjen. Vendar si razlagajo nastajajoče efekte v splošnem kot posledico stalnih tlačnih sprememb v ultrazvočnem polju in nekaterih sekundarnih pojavov v zvezi z že omenjeno kavitacijo. Pri tem gre predvsem za razplinjanje tekočine, v katero so potopljene deli za čiščenje ter disperzijo delcev trdnih snovi v tej tekočini. Pod vplivom močnega ultrazvočnega sevanja prihaja v te-

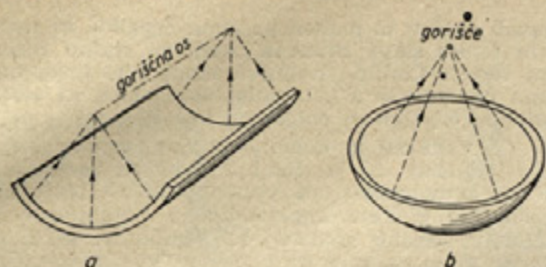
kočini do izločanja plinov, in sicer v obliki vidnih gibanj, ki se mehurčkov, ki jih običajno spremlja močan sikajoč šum. To gibanje plinskih mehurčkov se pojavlja samo, če prekoračijo tlaki in ultrazvočnem polju določeno kritično vrednost, t. j. mejo, pri kateri se prične proces kavitacije. Nastale votline delujejo kot izhodišča eksplozij podobnih hitrih izparevanj čistilne tekočine, ki nastajajo in zginevajo na številnih statistično porazdeljenih najmanjših mestih površine. Pri tem iztrgujejo ozir. izsesavajo delce umazanije z veliko silo iz posameznih por v površini in jih dispergirajo v tekočino. Razen omenjenega razplinjanja vpliva na proces kavitacije tudi nihanje plinskih mehurčkov, ki lahko pri resonančni frekvenci povzroča močne mehanične učinke.

Kot negativen pojav kavitacije smo že označili dušenje, t. j. absorpcijo energije v ultrazvočnem polju. Ultrazvočni valovi se namreč lahko odbijajo ali razpršujejo tudi pri zadevanju na votle prostore, ki jih morebiti povzroča kavitacija v ultrazvočnem polju, t. j. v prostoru med oddajnikom in predmetom. Mimo tega lahko povzroča kavitacija tudi korozijo površine, če je sevanje premočno ali traja predolgo, na kar je treba posebno paziti pri čiščenju zelo občutljivih poliranih ali lepanih površin.

Pri čiščenju in razmaščanju površin z ultra zvokom je razen opisanih mehaničnih vplivov pomembno še delovanje primernih kemičnih sredstev, ki omogočajo topljenje maščob ozir. razmehčanje mastnih vezi v umazaniji. Zato se postopek čiščenja opravlja vedno v posebni čistilni posodi, v kateri je tekoča topilo, ki rabi obenem kot sredstvo za prenos ultrazvočne energije na površino obdelovancev. Kot topila prihajajo v poštev bencin, alkohol, petrolej, triklorilen, tetra-kloroglik, pa tudi alkalične tekočine in voda, ki so ji primešana čistilna sredstva. Naloga teh je, da topijo in mehčajo različne plasti umazanije ali prevleke, ki jih želimo odstraniti (n. pr. lake, olja itd.). Zato je treba pri izbiri primerne topila upoštevati tudi kemično sestavo umazanije. Kemični vpliv se poveča še zaradi intenzivnega mehaničnega premikanja topila, ki se stalno menjava in sproti čisti, tako da prihaja do površine predmeta vedno sveže topilo.

Tako je s pomočjo ultra zvoka mogoče rešiti številne probleme, ki so povzročali do sedaj težave pri čiščenju. Mimo tega je omogočeno tudi čiščenje nedostopnih mest v notranjosti različnih konstrukcijskih delov, ker prihajajo ultrazvočni valovi skozi vse trdne snovi skoraj brez dušenja. Umazanija mora seveda imeti neke možnost odtoka iz tako slabo dostopnih mest, vendar za to ni potrebna nikakršna posebna hitrost pri pretakanju čistilnega sredstva. Ugodno je tudi to, da delujejo sile praktično po vsem ultrazvočnem polju, medtem ko je učinek izplakovanja pri drugih postopkih čiščenja minimalen ali pa ga pogosto sploh ni, ker je gibanje čistilnega sredstva v izvrtinah in drugih teže dostopnih mestih — torej tam, kjer se umazanija najraje nabira in najbolj drži — najslabše. Ker je efekt čiščenja posledica nihanja vseh delov, ki so izpostavljeni ultrazvočnemu sevanju, je dostikrat možno čistiti tako že sestavljene dele aparatov, instrumentov itd. Pri popravilih (n. pr. pri urah, pisalnih in računskih strojih, električnih števcih itd.) lahko to prinaša znatne prihranke pri delovnem času.

Na učinek čiščenja z ultra zvokom vplivajo predvsem velikost in jakost ultrazvočnega polja ter frekvenca. Pri izbiri teh glavnih vplivnih veličin, ki so v določeni medsebojni odvisnosti, je treba razen določenega načela o čiščenju in želenem efektu upoštevati tudi vrsto in velikost delov, ki so namenjeni za čiščenje. V splošnem so uporabne nizke frekvence v območju 20...100 kHz kakor tudi visoke frekvence v območju od 400...1000 kHz. Zahtevano frekvenčno območje določa tudi uporabo sredstva za proizvajanje

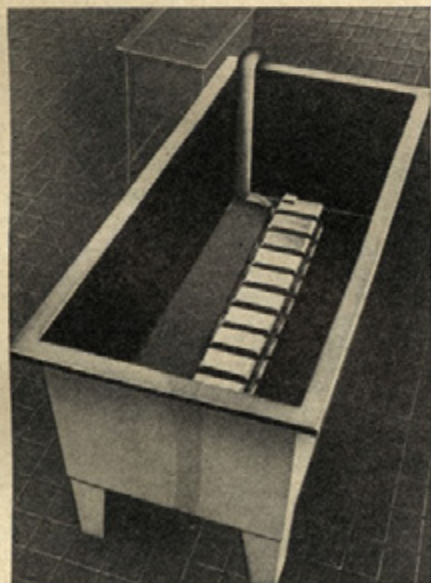


Sl. 11. Koncentracija ultrazvočne energije pri valjasti in sferični obliki piezokeramičnega vibratorja

ultrazvočnih valov. Kakor je že omenjeno, se uporabljajo za nizke frekvence v glavnem magnetostriksijski oddajniki, za visoke frekvence pa piezoelektrični oddajniki.

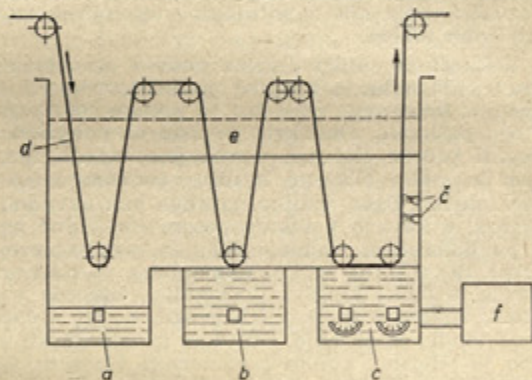
Glede izbire primerne frekvence kažejo nekatere dosedanje ugotovitve in izkušnje, da je potek čistilnega procesa ugodnejši pri nizkih frekvencah. Prvič že zaradi kavitacije, ki je v tem frekvenčnem območju intenzivnejša, drugič pa so amplitude nihanja, ki močno vplivajo na efekt čiščenja, pri nizkih frekvencah znatno večje. Tudi nihanje obdelovancev ugodno vpliva na potek čiščenja — posebno na težko dostopnih mestih. Ker so pri večjih predmetih lastne frekvence nižje kakor pri manjših delih, je zaradi tega boljše uporabljati nižje frekvence. Razen tega nastajajo pri visokih frekvencah t. j. pri majhnih valovnih dolžinah močne sence, ki motijo potek čiščenja. Sevanje je namreč pri visokih frekvencah močno usmerjeno, tako da porazdelitev ultrazvočne energije v večji posodi ni enakomerna in nastajajo za predmeti, ki so izpostavljeni ultrazvočnemu sevanju, sence. Te so tem izrazitejše, čim višja je frekvenca. Nadalje vpliva na izbiro frekvence tudi vrsta umazanije oziroma sredstva, ki ga želimo odstraniti s površine predmeta. Pri tem so ravno za odstranjevanje raznih lakov, smol, zasmoljenih odpornih olj, ščitnih lakov itd. nizke frekvence primernejše.

Če želimo doseči dober čistilni učinek, je važna tudi oblika vibratorja ozir. oddajnika ultrazvočnih valov. Kakor je že rečeno, je oblika oddajne ploskve lahko ravna ali ukrivljena. Največ so v rabi ravne



Sl. 12. Čistilna posoda z vrsto magnetostriksijskih vibratorjev (Schoeller & Co., Frankfurt/M.)

ploskve, pri katerih lahko dosega gostota ultrazvočnega toka maksimalno 10 do 20 W/cm². Z vibratorji iz piezokeramičnih materialov v posebnih oblikah, ki omogočajo konvergentno sevanje ultra zvoka, pa se dajo doseči tudi mnogo večje gostote ultrazvočnega toka. Sliki 11 a in 11 b prikazujeta valjasto in sferično obliko oddajne ploskve na vibratorju. Pri prvi je ultrazvočna energija koncentrirana v goriščni osi, t. j. v premici, pri drugi pa v gorišču, t. j. v točki. Možno so seveda še druge oblike koncentradorjev. Koristno območje, v katerem poteka proces čiščenja, je pri konvergentnih vibratorjih znatno manjše kakor pri ravnih, zato pa je jakost ultrazvočnega polja pri prvih mnogo večja, kar omogoča intenzivnejši potek procesa. Kakšna oblika vibratorja je v določenem primeru najprimernejša, je odvisno tudi od vrste čistilnega postopka in oblike ter velikosti predmetov za čiščenje. Pomembno je, da je celotni volumen ultrazvočnega polja v čistilni posodi čimbolj izkoriščen. Zato morajo biti deli v polju kar najbolj strnjeni, da se obseva čimvečje število predmetov hkrati. Delj pa vendarle ne smejo biti preblizu, da ne bi zasenčili drugih. Pri večjih delih je možno uporabljati tudi več vibratorjev hkrati, pri čemer je njihov položaj navadno prilagojen velikosti delov ter kapaciteti čistilne naprave. V splošnem poteka čiščenje z ultra zvokom zelo hitro. Tako



Sl. 13. Shema čistilne naprave s tremi prekat in transportno napravo

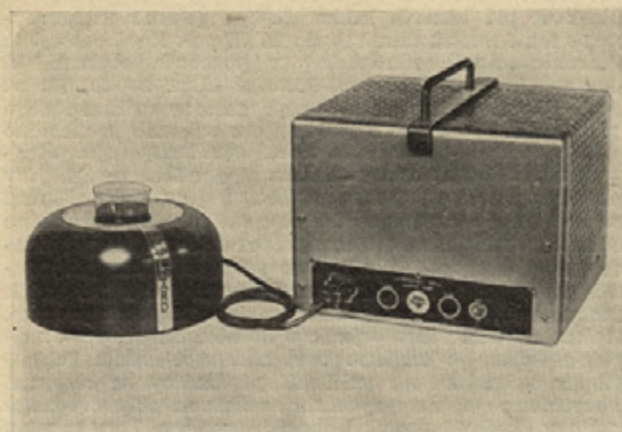
a — prekat z vročo kopeljo za čiščenje vnaprej, b — prekat za izplakovanje, c — prekat za čiščenje z ultra zvokom z dvema piezokeramičnima vibratorjema, č — šobe za izplakovanje z destilatom čistilnega sredstva v prvem prekatu, d — transportna veriga, e — kondenzacijska cona, f — visokofrekvenčni generator

je n. pr. za popolno očiščenje dokaj zapletenih delov pri jakosti 20 W/cm² potrebnih le 20 do 30 sekund, pogosto pa zadostujejo tudi krajši časi.

2. Naprave za čiščenje z ultra zvokom

Ker je problematika čiščenja in razmaščanja površin skoraj v vsakem primeru drugačna, se praktične izvedbe ultrazvočnih čistilnih naprav zelo razlikujejo med seboj. Največkrat je konstrukcijo take naprave treba prilagajati krajevnim potrebam. Pri tem je treba mimo že omenjenih tehničnih možnosti za razne konstruktivne izvedbe vibratorjev in visokofrekvenčnih generatorjev upoštevati tudi število, velikost in vrednost obdelovancev, ki naj bodo očiščeni v določenem času, torej faktorje, od katerih je v veliki meri odvisna gospodarnost novega postopka. Tu velja pripomniti tudi, da so take čistilne naprave sorazmerno drage in za čiščenje cenjenih izdelkov iz množinske proizvodnje neekonomične.

Načelno sestoji vsaka naprava za čiščenje z ultra zvokom iz dveh glavnih delov:



Sl. 14. Namizna čistilna naprava za majhne dele z generatorjem 20 kHz, 175 W (Mullard Ltd., London)

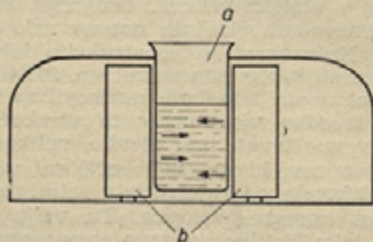
a) iz primerne kopeli, t. j. posode za čistilno sredstvo z enim ali več ultrazvočnimi oddajniki in

b) iz visokofrekvenčnega generatorja, ki napaja ultrazvočni oddajnik s potrebnim visokofrekvenčnim električnim tokom.

Velikost in oblika čistilne posode sta odvisni od geometričnih oblik in količine predmetov, ki naj bodo očiščeni v določenem času ter od poteka celotnega čistilnega postopka. Dostikrat je namreč potrebno razdeljevati proces čiščenja v več posameznih faz, pri čemer je lahko čiščenje z ultra zvokom samo ena izmed teh faz. Taka čistilna naprava ima navadno več prekatov, v katerih potekajo posamezne delne operacije po določenem vrstnem redu, n. pr.: vnaprejšnje čiščenje (brez ultra zvoka, namenjeno za odstranitev največje in lahko topljive umazanije), čiščenje z ultra zvokom, izpiranje (brez ultra zvoka, n. pr. s curkom čistega topila) in sušenje. Od vrste in odpornosti umazanije je odvisno, koliko posameznih vmesnih faz je potrebnih in v kakšnem zaporedju se vrstijo.

Ker sta gostota ultrazvočnega toka in velikost sevalnih ploskev vibratorjev omejeni, je za doseganje večjih moči potrebnih več vibratorjev, ki sestavljajo skupaj za določeno čistilno napravo potrebno sevalno površino. Tako je s pomočjo večjega števila magnetostriksijskih vibratorjev možno sestavljati razmeroma velike oddajne ploskve, ki omogočajo tudi enakomernjšo porazdelitev ultrazvočnega polja v čistilni posodi. Slika 12 prikazuje notranjost večje čistilne posode, pri kateri znaša skupna sevalna ploskev 12 magnetostriksijskih vibratorjev 1500 cm². Tudi s keramičnimi vibratorji se dajo po tej poti sestavljati večje sevalne površine, medtem ko z vibratorji iz kremenovega kristala ni mogoče dosegati razsežnih homogenih ultrazvočnih polj.

Ker se čistilno sredstvo kmalu onesnaži, je treba skrbeti za njegovo občasno zamenjavo. Pri večjih na-



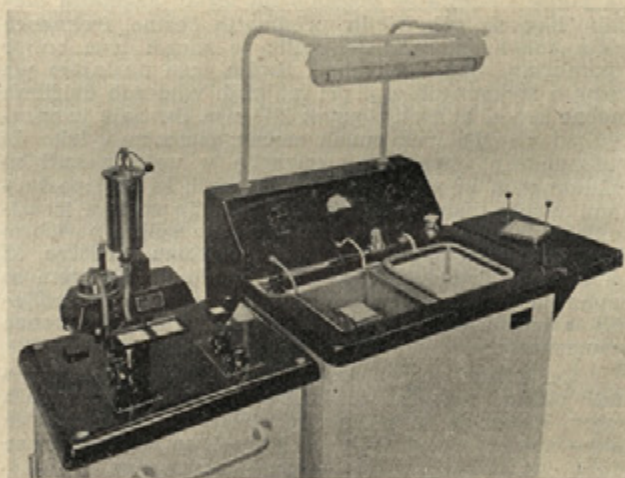
Sl. 15. Shema čistilne naprave z radialnim sevanjem ultra zvoka

a — steklena čaša s topilom, b — vibrator

pravah rabi v ta namen posebna črpalka, ki tlači nečisto topilo skozi filter in skrbi za stalno regeneracijo topila. Čistilna naprava mora biti torej opremljena dodatno še z ustreznim agregatom, ki sestoji iz motorja, črpalke in enega ali več filtrov.

Od velikosti in količine predmetov za čiščenje je dalje odvisno, ali je čistilna naprava zamišljena za ročno, avtomatično ali polavtomatično polnjenje in praznjenje čistilne kopeli. Ročno potapljanje predmetov v čistilno sredstvo in pomikanje skozi ultrazvočno polje prihaja tu v poštev le pri manjših napravah oz. takrat, če se zaradi majhne količine predmetov ne izplača avtomatičen transport, n. pr. pri laboratorijskih napravah. Pri čistilnih avtomatih pa je potrebna primerna transportna naprava, ki omogoča, da se posamezni predmeti v določeni legi in s primerno hitrostjo pomikajo skozi ultrazvočno polje. Običajno se v ta namen uporablja posebna veriga, na kateri so predmeti obešeni, oz. pri manjših delih posebne košarice, ki potujejo skozi posamezne kopeli. Shematično skico take avtomatične čistilne naprave s tremi različnimi kopelmi prikazuje slika 13.

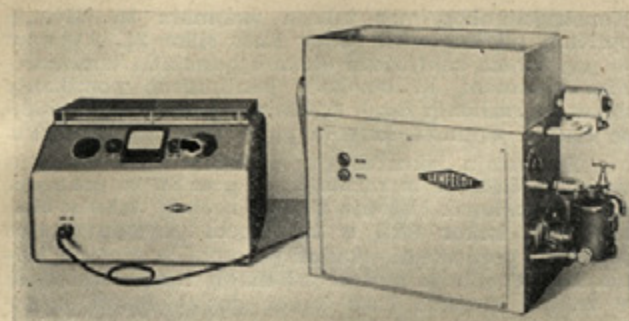
Pri čiščenju z ultra zvokom niso vedno potrebna organska topila. V mnogih primerih zadostujejo tudi alkalične kopeli. To je posebno ugodno takrat, če je



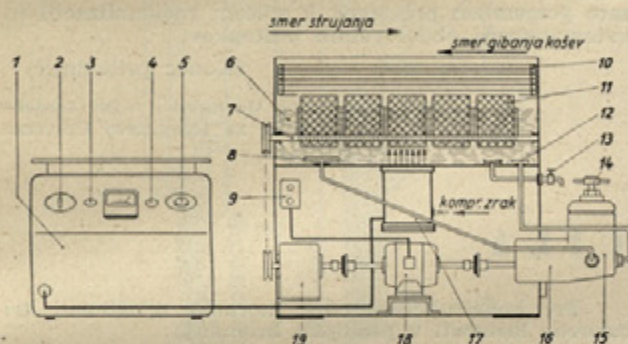
Sl. 16. Laboratorijska čistilna naprava z generatorjem 500 W (Schoeller & Co., Frankfurt/M.)

po čiščenju zasnovana še kakšna nadaljnja obdelava površin, n. pr. galvanizacija. V tem primeru se deli samirajo z vodo, pri čemer so lahko odveč morebitne priprave za izsesavanje, filtriranje in destilacijo, ki so potrebne pri uporabi organskih topil.

V naslednjem naj bo prikazanih nekaj konstruktivnih izvedb o napravah za čiščenje in razmaščanje z ultra zvokom. Enostavno in praktično namizno napravo za majhne dele prikazuje slika 14. Kot posoda za čistilno sredstvo rabi v tem primeru kozarec. Posebnost te naprave je v izvedbi vibratorja, ki ima obliko obroča, pri katerem poteka sevanje ultrazvočnih valov radialno navznoter, pri čemer je dana možnost za močno koncentracijo ultra zvoka v osi vibratorja (slika 15). Naprava z generatorjem 175 W in frekvenco 20 kHz je posebno primerna za laboratorijske preizkuse in podobne namene. Večjo laboratorijsko čistilno napravo z generatorjem 500 W, frekvenco 20 kHz in ploščatim magnetostriksijskim vibratorjem velikosti 85 × 120 mm kaže slika 16. Naprava ima dve čistilni posodi in je prirejena za ročno pomikanje predmetov v čistilno sredstvo, pri čemer rabi ena posoda za čiščenje z ultra zvokom, druga za izpiranje.



Sl. 17. Čistilna naprava za 200 W (Dr. Lehfeldt & Co., Heppenheim)

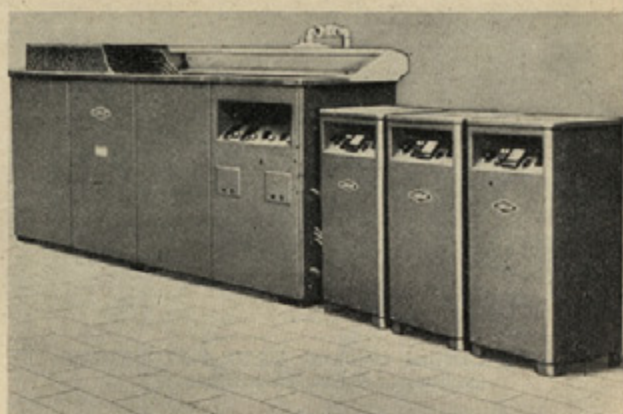


Sl. 18. Shema čistilne naprave za 200 W (Dr. Lehfeldt & Co. — Heppenheim)

- 1 — Visokofrekvenčni generator
- 2 — Stikalo za vklop generatorja
- 3, 4 — Kontrolna luč
- 5 — Regulator jakosti ultrazvočnega polja
- 6 — Čistilno sredstvo
- 7 — Vijačno vreteno za pomik žičnih košaric
- 8 — Prha (dotok svežega čistilnega sredstva)
- 9 — Stikalo za vklop motorja
- 10 — Hladilne cevi
- 11 — Žična košarica z deli za čiščenje
- 12 — Odtok nečistega čistilnega sredstva
- 13 — Izpust
- 14 — Ventil za zračenje
- 15 — Filter
- 16 — Zobniška črpalka
- 17 — Ultrazvočni oddajnik (vibrator)
- 18 — Elektromotor
- 19 — Reduktor



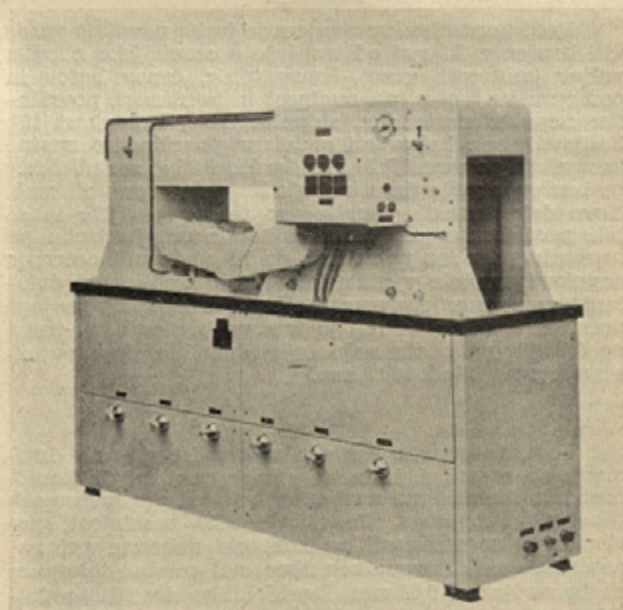
Sl. 19. Srednje velika čistilna naprava za 600 do 800 W (Dr. Lehfeldt & Co., Heppenheim)



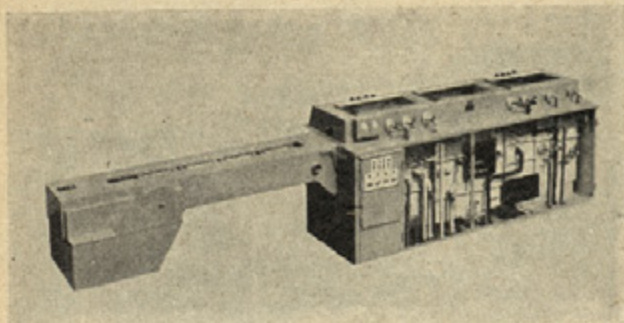
Sl. 20. Čistilna naprava za 1200—1800 W s tremi generatorji (Dr. Lehfeldt & Co., Heppenheim)

Slika 17 ponazarja manjšo industrijsko čistilno napravo z vrtilnimi koški. Izvedba je shematično prikazana na sliki 18. V levem delu je viden generator, ki ima na sprednji strani vse potrebne elemente za upravljanje čistilnega procesa. Generator je s pomočjo kabla zvezan z vibratorjem, ki je pritrjen na dno čistilne posode, tako da je snop ultrazvočnih valov, ki izhaja iz vibratorja 17, obrnjen vertikalno navzgor. Premikanje predmetov skozi ultrazvočno polje se opravlja lahko ročno ali pa mehanično s pomočjo dveh paralelnih vodoravnih vreten, ki vrtita in počasi pomikata naprej valjaste žične košarice z deli za čiščenje. Vrtenje košaric oz. delov v njih je potrebno zaradi tega, da lahko uhajajo na površje zračni mehurčki, ki se morda zadržujejo na težko dostopnih mestih. Razen tega omogoča vrtenje enakomernejše obsevanje delov z ultra zvokom.

Na sliki 19 je prikazana čistilna naprava srednje velikosti za čiščenje vijakov, krogličnih ležajev in



Sl. 21. Čistilni avtomat s kontinuirnim transportom delov za čiščenje (naprava: Dittmann & Co., Karlsruhe, magnetostriksijski vibratorji: Schoeller & Co., Frankfurt/M.)



Sl. 22. Čistilni avtomat ULTRA-PUROMAT
(Schoeller & Co., Frankfurt/M.)

drugih podobnih delov — z močjo 600 do 800 W. Slika 20 predstavlja primer večje čistilne naprave za 1200...1800 W, pri kateri rabijo za napajanje vibratorjev kar trije generatorji.

Za množinsko proizvodnjo prihajajo v poštev seveda le popolnoma avtomatizirane čistilne naprave.

Konstruktivni primer takega avtomata za čiščenje optičnih ali kovinskih delov kaže slika 21. Avtomat je popolnoma zaključena enota s posebnim transportnim sistemom, ki omogoča kontinuirno pomikanje delov po različnih fazah čiščenja. Na sliki 22 je videti še čistilni avtomat, ki dela po večtaktne postopku.

Dosedanja izkustva pri praktični uporabi ultra zvoka za čiščenje in razmaščanje površin so pokazala, da ima postopek čiščenja z ultra zvokom tako v ekonomskem kakor tudi v tehničnem pogledu znatne prednosti pred vsemi ostalimi postopki te vrste. V primernih kopelih je možno pri nižjih temperaturah in v znatno krajšem času kakor doslej doseči intenzivnejše čiščenje, pri čemer je kvaliteta mnogo boljše kakor pri vsakem drugem čistilnem postopku. Te naprave prekašajo ostale postopke tudi v tem, da izključujejo potrebo vsakršnega ročnega dela in pomenijo zato pomemben prispevek k splošni racionalizaciji in avtomatizaciji obdelovalnih postopkov.

(Konec prihodnjic)

Avtor: ing. Franc Golobranec, redni asistent
na Oddelku za strojništvo Univerze
v Ljubljani

POROČILA

DK 621.793.3

POROZNO KROMANJE

ŽELIMIR DOBOVIŠEK

O možnostih za uporabo poroznega kroma v strojništvu, njegovem bistvu, pozitivnih lastnosti glede na obrabo sten pri valju, batu in batnih obročih zgorevalnih motorjev smo v SV že pisali.* V tem članku naj pojasnim samo nekatere posebnosti tega postopka in se na kratko dotaknem tistih činiteljev, ki znatno vplivajo na njegovo pravilno in uspešno izvajanje v celoti. Porozno kromanje sestoji iz nekoliko delovnih operacij, ki jih menim obravnavati po njihovem dejanskem zaporedju.

Brušenje

Pred poroznim kromanjem je treba navadno opraviti brušenje, ki naj odstranjuje geometrijske napake valjev (motornih gredi, čepov ojníc, čepov batov in pod.), med njimi n. pr. ovalnost in koničnost, površinske napake: neravnine, stopnice, rise, hrapavost itd. Zahteve glede kakovosti obdelane površine so znatne in znašajo po ameriških standardih $0,25 \mu$, zaradi česar po brušenju valje (izvrtine) gladimo, čepe pa poliramo. Nove dele, katerih površine so trše od 40 HRC in so bili pred brušenjem termično obdelani, je treba po brušenju ponovno popuščati, da bi odstranili octranje napetosti, nastale v materialu pri brušenju. Pri določanju mer zunanjega premera čepa, oziroma notranjega premera izvrtine, ki naj jo ima po brušenju, je treba upoštevati, da znaša najmanjša debelina sloja poroznega kroma 0,1 do 0,15 mm.

Orodje

Porozno kromanje spada v tako imenovano »kromanje na mero«, t. j. da so premer, ovalnost in koničnost izvrtine ali čepa med seboj v določenih tolerancah takoj po kromanju. Če upoštevamo posebnosti postopka in so možnosti za kontrolo debeline pri nanoseni prevleki kroma neznatne, naj celotna toleranca ne bo večja od 0,04 mm. Da bi lahko dosegli predpisano mero brez dodatnega brušenja, mora biti orodje za pritrditev strojnega dela in anode izdelano zelo skrbno in pravilno.

Pri konstrukciji orodja moramo upoštevati tri osnovne lastnosti v postopku kromanja:

1. kopel za trdo kromanje ima zelo majhno razsipanje, kar pomeni, da se ioni širijo od anode samo v premi smeri proti katodi,
2. električni tokovi, ki so potrebni za dobivanje trde in sijajne prevleke kroma, so znatni,
3. kvaliteta kroma je odvisna od gostote toka na anodi in katodi, ki mora biti v določenih mejah.

Na slikah 1 in 2 sta prikazani dve konstrukciji orodja za kromiranje valjev pri zgorevalnih motorjih. Izbrana sta dva značilna primera, in sicer kadar je spodnja stran valja odprta (slika 1) in drugi, ko je valj s spodnje strani zaprt in sestavlja z glavo celoto (slika 2). Za pravilno in enakomerno vsedenje kroma po celotnem obodu valja je odločilna enakomerna razporeditev toka po anodi in katodi. Zaradi tega je treba »zasenčiti« vse ostre robove in prehode na delu, ki ga kromamo. Prstani a in b na sliki 1 ter a na sliki 2 preprečujejo koncentracijo električnih tokovnic na robovih na koncu valjev. Koncentričnost anode glede na katodo, v našem primeru z izvrtino valja, dosežemo s primernim vodilom. Le-to se na eni strani naslanja na izvrtino valja, v sredini pa centrira na anodo. Vodilo mora biti iz električno izolacijskega materiala, da ne bi prišlo do stika med anodo in katodo. Hkrati mora biti odporen proti kromovi kislini. Spričo tega zelo radi uporabljamo umetne smole, kakor araldit D, plexiglas, ki se dajo po želji oblikovati z litjem, gnetenjem v toplem in odrezovanjem. Juvidur v plošči v ta namen ni primeren, ker se mehča pri temperaturi 55...65°C. Odnos med premerom anode in izvrtino valja naj bo v mejah 0,5...0,8. Anoda naj bo na obeh straneh nekoliko daljša. Po potrebi so anode nekoliko konične in z manjšim premerom na dnu valja. Konus znaša vsega nekaj ločnih minut do največ 1°. Ni mogoče določiti neke odvisnosti velikosti koničnosti anode od premera in dolžine valja, kar se odreja eksperimentalno, kadar postane valj po kromanju koničen.

Stik dela oziroma orodja z bakreno palico (prevodnikom toka) na kadi mora biti zelo dober, saj prevajamo navadno močne tokove. Tudi prerezi orodja morajo biti zadostni — vsaj 1 mm² za 2 ampera. Površine valja in orodja, ki so v elektrolitu, poškrbimo

* Glej članek: Uporaba galvanskih prevlek na delih motorjev z notranjim zgorevanjem, SV 1958-3/4.