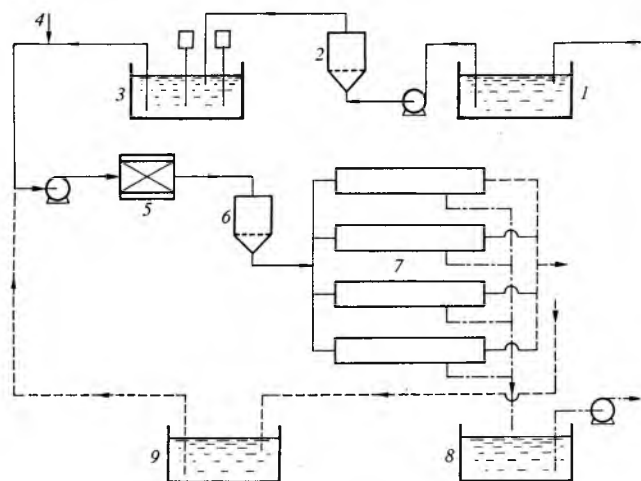


lančanih savitljivih makromolekula počinju gelirati pri udjelu otopljene tvari od 2...5%, otopine makromolekula krutih lanaca mogu dati gel već pri udjelima manjim od 1%, dok otopine zrnatih makromolekula, poput proteina, geliraju pri mnogo višim udjelima, između 15 i 25%.

**Uređaji za ultrafiltraciju** konstruiraju se tako da se uz što bolje iskorištenje aktivne membranske površine postiže što niža koncentracijska polarizacija. Budući da su vrijednosti koeficijenta difuzije makromolekula i koloidnih čestica vrlo male, koeficijent prijenosa mase može se bitno povećati jedino smanjenjem debljine graničnog sloja. Konstrukcijom ultrafiltracijskog uređaja nastoji se stoga povećati smična brzina fluida na površini membrane.

Kako su i za proces ultrafiltracije raspoloživa četiri osnovna, već opisana membranska modula (pločasti, spiralno smotani, cijevni i modul sa šupljim vlaknima; v. *Membrane*, TE 8, str. 387), prednost će pri ultrafiltraciji dobiti moduli u kojima se postižu veće smične brzine fluida. To su sve varijante cijevnog modula, posebno pri obradbi velikih obujama koloidnih suspenzija, te pločasti moduli, koji se pretežno upotrebljavaju kad treba obraditi manje količine dragocjenih bioloških fluida ili proizvoda prehrambene industrije. Međutim, upotrebljavaju se i spiralno smotani modul i modul sa šupljim vlaknima. Njihova uobičajena prednost, niski investicijski troškovi, čine ih zanimljivima i za specifične ultrafiltracijske svrhe, iako se pri njihovoj upotrebi očituju i karakteristični nedostaci: lako začepljenje modula, viši troškovi zamjene membrana i dr.

Na protočnoj shemi postrojenja za ultrafiltraciju (sl. 6) naglašene su specifičnosti koje razlikuju ultrafiltraciju od reverzne osmoze. To je, prije svega, sustav za ispiranje i čišćenje postrojenja, koji je potreban pri ultrafiltraciji za češće ispiranje modula



Sl. 6. Protočna shema postrojenja za ultrafiltraciju. 1 spremnik za ulaznu otopinu, 2 predfilter, 3 namještanje pH, 4 otopina za kloriranje, 5 izmjenjivač topline, 6 filtar, 7 ultrafiltracijski moduli, 8 spremnik za permeat, 9 otopina za čišćenje

kako protok kroz membrane ne bi postao premalen. Iza uređaja za predfiltraciju obično se nalazi i izmjenjivač topline, jer se mnoge kapljevite smjese ultrafiltriraju pri povišenoj temperaturi. Općenito su ultrafiltracijska postrojenja manjeg kapaciteta od onih za reverznu osmozu, a ultrafiltracija se često provodi diskontinuirano.

S obzirom na široko područje primjene, ultrafiltracijska se postrojenja mogu međusobno dosta razlikovati. Ako iz smjese treba ukloniti nečistoće velike molekularne mase, proizvod ultrafiltracije je permeat, a kad treba koncentrirati ili frakcionirati makromolekulnu otopinu, proizvod je *retentat* (koncentrat). Razumljivo je da se to odražava i na protočnu shemu postrojenja i zahtijeva svaki put drugačiji režim rada.

Ultrafiltracija je kao industrijska separacijska metoda našla primjenu u mnogim tehnološkim procesima, pa se upotrebljava za razdvajanje tvari iz otopine, odnosno čišćenje otopine od neželjenih primjesa, za koncentriranje otopine i za frakcioniranje.

Neki su zanimljivi primjeri industrijske primjene ultrafiltracije prikazani u tablici 1.

LIT.: J. E. Flinn, *Membrane Science and Technology*. Plenum Press, New York 1970. – R. E. Lacey, S. Loeb, *Industrial Processing with Membranes*. Wiley-Interscience, New York 1972. – P. Meares, *Membrane Separation Processes*. Elsevier, Amsterdam 1976. – R. F. Madsen, *Hyperfiltration and Ultrafiltration in Plate and Frame Systems*. Elsevier, Amsterdam 1977. – N. N. Li, *Membrane Processes*, u djelu: *Novel Separation Processes*, Perry's Chemical Engineers' Handbook. McGraw-Hill, New York 1984. – G. Belfort, *Synthetic Membrane Processes*. Academic Press, Orlando 1984.

B. Kunst

**ULTRAZVUK**, titranje materijalnih čestica frekvencija viših od 20 kHz, koje se valno širi kroz tvar. Izmjenična promjena fizikalnog stanja tvari, koja se širi od izvora određenom brzinom, može se čuti kao zvuk, šum ili prasak, već prema pravilnosti titranja. Ta pojava može biti i izvan granica čovječjeg sluha. S obzirom na frekvenciju titranja i prosječne slušne mogućnosti ljudi uobičajena je podjela mehaničkog titranja na *infrazvuk* (do 16 Hz), *zvuk* (16 Hz...20 kHz) i *ultrazvuk* (više od 20 kHz). Za titranje frekvencija viših od  $10^{10}$  Hz ponekad se rabi naziv *hiperzvuk*.

Fizikalnim osnovama nastajanja, rasprostiranja i primanja zvuka bavi se *akustika*, grana znanosti o zvuku kao fizikalnoj pojavi i osjetnom doživljaju sluha u čovjekovoj svijesti (v. *Akustika*, TE 1, str. 56). Elektroakustika je grana elektrotehnike koja se bavi teorijskim i praktičnim problemima pretvorbe zvuka u električne titraje i obratno. Iako se bavi pretežno zvukom, u dijelu se fizikalne ili objektivne akustike tumače karakteristične fizikalne veličine objektivne akustike (v. *Elektroakustika*, TE 4, str. 298).

Povijest akustike seže duboko u prošlost, do grčkih istraživača koji su proučavali glazbala i zvučne odnose. Već je Aristotel (–384–322) pretpostavio da je zvuk valno gibanje, ali se tek u doba G. Galileja (1564–1642) definiraju osnovni zakoni rasprostiranja zvuka i mjeri njegova brzina u zraku. Dalja su istraživanja bila mnogo intenzivnija, osobito poslije Newtonove objave matematičke teorije zvuka.

Pošto je ustanovljeno da zvučni valovi nisu samo u području čujnih frekvencija, počinje intenzivno istraživanje infrazvuka i ultrazvuka, osobito piezoelektričnih i magnetostrikcijskih pretvarača, na kojima se danas temelji široka primjena ultrazvuka.

Za vrijeme Prvog svjetskog rata istraživanja su bila usmjerena na primjenu ultrazvuka u navigacijske svrhe i unapređenje tehnike otkrivanja podmornica. Tijekom Drugoga svjetskog rata i nakon njega, zbog naglog razvoja zrakoplova i svemirskih letjelica te nuklearnih elektrana, istraživanja su usmjerena na primjenu ultrazvuka u defektoskopiji u svrhu provjere kvalitete materijala i konstrukcija.

Primjena infrazvuka i ultrazvuka u svrhu fizikalnog djelovanja na materijale novijeg je datuma, iako se takvo djelovanje zvuka spominje još u Bibliji, u vezi s osvajanjem grada Jerihona.

Danas ultrazvuk postaje sve važniji u medicinskoj dijagnostici i terapiji, hidroakustici i defektoskopiji, a također u tehnici čišćenja, rezanja i zavarivanja materijala.

## FIZIKALNE OSNOVE ULTRAZVUKA

Ultrazvuk se može generirati na više načina, već prema primjeni, a i registrira se najčešće na istom principu na kojem se i stvara. Istražuje se i način stvaranja i registriranja ultrazvuka u kojem je moguće bezdodirno ispitivanje ili mjerenje, pri čemu se ultrazvuk ne unosi u predmet, nego se u njemu stvara. Sklop koji služi za pretvaranje nekog oblika energije u ultrazvuk i obrnuto, naziva se pretvarač ili pretvornik.

**Ultrazvučni pretvarači.** Najpoznatiji su i najčešće se primjenjuju sljedeći načini stvaranja ultrazvuka: piezoelektrični, magnetostrikcijski, elektrostatički i elektrodinamički način te stvaranje mehaničkom pobudom i toplinskom pobudom.

*Piezoelektrični pretvarač.* Francuski fizičar P. Curie otkrio je 1880. svojstvo nekih tvari da stvaraju električni potencijal kada se podvrgnu mehaničkom pritisku (v. *Kristalografija*, TE 7, str. 379). Razlog je tome deformacija njihove karakteristične strukture i takav raspored među atomima da na suprotnim površinama nastaju raznoimeni električni potencijali. Godinu dana potom G. Lippmann, također francuski fizičar, uočava povratnost tog svojstva nazvanog *piezoelektričnom pojavom*: ako se tijelo piezoelektričnih svojstava stavi u električno polje, ono se geometrijski

deformira. Prema tome, tanka pločica od takva materijala nizmjenjuje se u visokofrekventnom električnom polju stanjuje i podebljava, a ti se titraji prenose na okolno sredstvo i šire se kao ultrazvučni valovi.

Postoje dvije vrste piezoelektričnih tvari. Prvu skupinu čine prirodne tvari, koje su piezoelektrične zbog svoje asimetrične kristalne strukture. Karakterističan je predstavnik te skupine *kremen*, koji je dugo vremena bio i jedini materijal od kojeg se izrađivao pretvarač. U drugoj su skupini tvari u kojima se svojstvo piezoelektričnosti postiže polarizacijom feroelektričnih materijala. Osnovna je prednost piezoelektričnih pretvarača u tome što omogućuju stvaranje mehaničkih titraja u širokom rasponu frekvencija. Oni su i danas najbrojniji među pretvaračima ultrazvučnih uređaja.

**Magnetostruktivski pretvarač.** Magnetostruktivna je promjena izmjera magnetnog materijala u magnetnom polju (v. *Elektrotehnički materijali*, TE 5, str. 56). Ona ovisi o vrsti i obliku takvog materijala te o mogućnosti njegove obradbe i prethodne magnetizacije. Ovisnost magnetostruktivne materijala o magnetnom polju pokazuje zasićenje kod nekih jakosti polja, te mogućnost promjene smjera deformacije promjenom jakosti polja. Za razliku od duljinske magnetostruktivne, obujamna magnetostruktivna uvijek linearno ovisi o pojačanju polja.

Magnetostruktivna ovisi i o temperaturi. S porastom temperatura ona se smanjuje i potpuno nestaje pri tzv. Curieovoj temperaturi (v. *Elektrotehnički materijali*, TE 5, str. 53).

Magnetostruktivna je moguće tumačiti pomoću elementarnih magneta u magnetnom vodiču koji se usmjeruju djelovanjem vanjskoga magnetnog polja te uzrokuju deformaciju kristalne rešetke. Kao posljedica mnoštva takvih mikroskopskih deformacija u jednom pravcu nastaje makroskopsko produljenje ili skraćivanje. Magnetostruktivna je povratna pojava, pa deformacija kristalne rešetke uzrokuje promjenu stupnja magnetičnosti magnetnog vodiča. Pobuđivanjem magnetostruktivnog pretvarača vanjskim izmjeničnim magnetnim poljem postiže se periodična promjena duljine u ritmu pobude, a pobuđivanjem u rezonantnoj frekvenciji postiže se maksimalno titranje. Magnetostruktivski pretvarač stvara ultrazvuk većih snaga, ali nižih frekvencija.

**Mehanički pretvarač.** Udarac po čvrstom predmetu uzrokuje titranje širokog frekvencijskog spektra, koje može biti u čujnom i ultrazvučnom području. Frekvencijski spektar ovisi o materijalu, izmjerama i obliku predmeta, te o načinu pobude.

Za mehaničko se generiranje ultrazvuka najčešće primjenjuje pojava da oko uskog otvora kroz koji istječe plin ili tekućina nastaje nestabilan tlak i vrtložjenje. To je princip ultrazvučnih zviždaljki i sirena koje proizvode ultrazvuk nižih frekvencija u zraku i vodi.

**Toplinski pretvarač.** Naglo, lokalno zagrijavanje površine predmeta uzrokuje mehanička naprezanja oko mjesta zagrijavanja. Ta su naprezanja uzrok rasprostiranju ultrazvučnih valova u okolni prostor. Frekvencijski spektar može biti vrlo širok, a toplinski izvor može biti laser ili elektronski top. Za prijam se također može upotrijebiti optički laserski interferometar, koji registrira povratak ultrazvučnih valova na površinu predmeta. Prednost je tako stvorena ultrazvuka mogućnost njegova bezdodirnog unosa u tijelo, a nedostatak složena i skupa oprema. Zbog mogućnosti daljinskog upravljanja ta se tehnika primjenjuje uglavnom za ispitivanje radioaktivnih materijala te materijala pri visokim temperaturama.

**Elektrostatički pretvarač.** Između kondenzatorskih ploča djeluje električna sila, koja pobuđuje titranje pomične kondenzatorske ploče. Zbog promjene napona mijenja se električna sila pa pomična ploča stvara ultrazvuk. Osnovni je nedostatak tog načina stvaranja ultrazvuka mala amplituda titranja.

**Elektrodinamički pretvarač.** U elektromagnetnom ultrazvučnom pretvaraču djeluje izmjenično magnetno polje na prikladno oblikovan pokretni vodič. Međudjelovanjem vanjskoga magnetnog polja i stvorenih vrtložnih električnih struja nastaje u predmetu Lorentzova sila. Frekvencija je proizvedenog ultrazvuka jednaka frekvenciji vanjskoga magnetnog polja. Prikladnim se namatanjem zavojnice pretvarača mogu proizvesti različite vrste valova. Isti se princip primjenjuje za prijam ultrazvučnih valova.

**Ultrazvučni valovi.** Za rasprostiranje ultrazvuka potrebno je sredstvo. Ultrazvučni pretvarač prenosi titranje na sredstvo što ga okružuje. Prostorna razdioba pomaka koja nastaje i napreduje određenom brzinom kroz sredstvo naziva se napredujućim ili progresivnim valom.

Kada su pomaci (elongacije) čestica koje titraju istom frekvencijom jednaki u ravni okomitoj na smjer rasprostiranja vala, a raspored pomaka u smjeru rasprostiranja vala sinusoidan, sredstvom se rasprostire ravni harmonijski val. Ravni val koji se rasprostire brzinom  $v$  u smjeru  $x$  može se opisati izrazom

$$y(x, t) = A \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right), \quad (1)$$

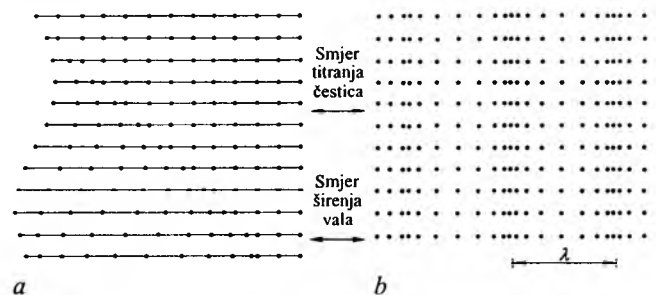
gdje je  $y(x, t)$  pomak točke koja je na udaljenosti  $x$  od izvora,  $A$  amplituda titranja,  $T$  period titranja,  $t$  vrijeme, a  $\lambda$  valna duljina. Valne su fronte ravnog vala ekvidistantne, paralelne ravnine, okomite na smjer rasprostiranja vala.

Kuglastim se valom rasprostire titranje iz jedne točke kuglasto u prostor, te su valne fronte ekvidistantne koncentrične kugline plohe. Jednadžba je kuglastog vala

$$y = \frac{A}{r} \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda} \right), \quad (2)$$

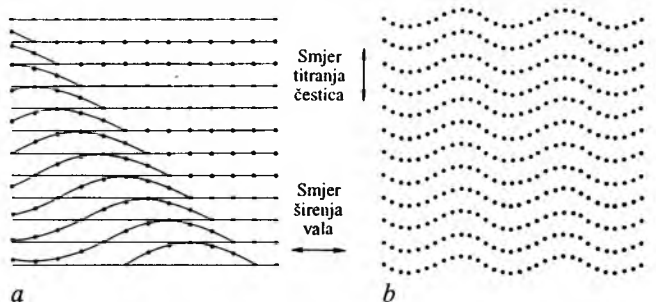
gdje je  $r$  polumjer kugle. U velikoj se udaljenosti od izvora dio kuglastog vala može nadomjestiti ravnim valom.

Već prema vrsti sredstva kroz koje se prenosi energija te karakteristikama kao što su vrsta tvari, oblik, izmjere i općenito stanje tvari, posebno njezina elastična svojstva, nastat će različite vrste ultrazvučnih valova. Dvije su osnovne vrste valova: longitudinalni i transverzalni. Oni u idealnom obliku mogu nastati samo u beskonačnom sredstvu, no u praksi se smatra da je dovoljno i sredstvo kojem su izmjere vrlo velike prema valnoj duljini ultrazvuka.



Sl. 1. Longitudinalni val. a nastajanje, b titranje

**Longitudinalni val (L-val)** jest onaj val u kojega čestice titraju u smjeru rasprostiranja vala (sl. 1), pa on uzrokuje zgsušuća i razrjeđenja u sredstvu kojim se rasprostire. **Transverzalni val (T-val)** jest onaj val u kojega čestice titraju okomito na smjer rasprostiranja vala (sl. 2). Longitudinalni se valovi rasprostiru sredstvom koje može biti u bilo kojem agregatnom stanju, dok se transverzalni valovi mogu rasprostirati samo u čvrstom sredstvu.

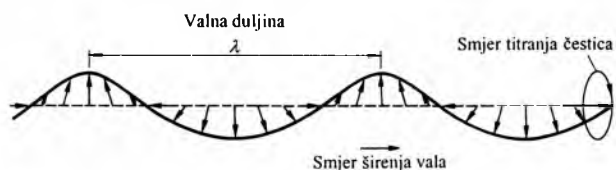


Sl. 2. Transverzalni val. a nastajanje, b titranje

Čestice mogu istodobno titrati i longitudinalno i transverzalno, što ima za posljedicu kružno ili eliptično titranje. Između mnogih vrsta valova koji tako nastaju poznatiji su i češće se

primjenjuju Rayleighovi, lateralni ili puzajući, Lambovi, Loveovi i čelni valovi.

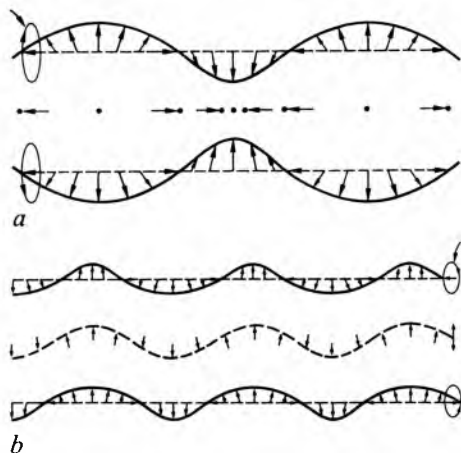
Rayleighovi valovi (R-valovi) mogu se usporediti s valovima na površini vode. Čestice titraju longitudinalno i transverzalno, tj. eliptično na slobodnoj površini sredstva, u ravnini koju određuju pravac gibanja i okomica na površinu (sl. 3). R-valovi se rasprostiru tako da slijede površinu. Energija se dobro prenosi površinom, a prema unutrašnjosti se titranje brzo prigušuje. Na dubini jednakoj četvrtini valne duljine površinskog vala jakost mu opada na polovicu vrijednosti koju ima na površini, a na dubini od jedne valne duljine titranje praktički nestaje. R-valovi mogu imati složenije titranje od opisanog eliptičnoga. Brzina je R-valova približno 90% brzine transverzalnog vala u istom sredstvu.



Sl. 3. Prikaz titranja Rayleighova vala

Lateralni ili puzajući površinski valovi također se rasprostiru na granici sredstava, međutim oni, za razliku od R-valova, nastaju praktički samo na granici između dvaju čvrstih sredstava. Način je njihova titranja vrlo složen, a proizvode se odbijanjem pod kritičnim kutom.

Lambovi valovi. Kada se izmjera predmeta smanji na red vrijednosti valne duljine, kao što je to u limovima i pločama ili šipkama i žicama, nastaju razne vrste vibracija te radijalni i torzijski valovi, a najpoznatiji su Lambovi ili pločasti valovi. Simetrični je val longitudinalno titranje uzduž sredine ploče, a na površini eliptično, dok je asimetrični val transverzalno titranje uzduž sredine ploče, a na površini eliptično (sl. 4). Brzina vala ovisi o debljini i vrsti lima te o vrsti i frekvenciji vala.



Sl. 4. Simetrični (a) i asimetrični (b) Lambovi valovi

Loveovi površinski valovi su transverzalni, a čestice titraju u ravnini paralelnoj s površinom sredstva.

Čelni valovi (P-valovi) nastaju zbog stalne pretvorbe valova, kada se val uzduž slobodne površine širi brzinom većom od skupne brzine za taj val i sredstvo u kojem se širi. P-valovi su transverzalni, longitudinalno polarizirani valovi.

Osnovni ultrazvučni parametri. Za primjenu ultrazvuka potrebno je poznavati ultrazvučne parametre, ali i niz drugih fizikalnih veličina koje određuju izbor opreme i radne tehnike.

Osnovni su ultrazvučni parametri: frekvencija, brzina, tlak i jakost ultrazvuka te impedancija sredstva. Te se veličine određuju mehaničkim, toplinskim, električnim ili optičkim tehnikama, i to izravno mjerenjem apsolutne vrijednosti pojedine veličine ili posredno mjerenjem učinka te veličine. Akustička svojstva tvari ovisi o njezinoj strukturi i stanju, a mogu se mijenjati i unutar iste tvari ako ona nije jednolična. Stoga se češće primjenjuju usporedbeno mjerenja ultrazvučnih parametara.

Frekvencija ultrazvučnih valova mora se vrlo pažljivo odabrati jer izravno utječe na kvalitetu ispitivanja. Povišenjem frekvencije smanjuje se valna duljina, pa se povećava osjetljivost ispitivanja ultrazvučne defektoskopije. Međutim, istodobno se povećava prigušenje ultrazvučnih valova u sredstvu, što umanjuje debljine slojeva tvari koje se još mogu tako odabranim parametrima ispitivati. Nadalje, promjenom frekvencije ultrazvučne sonde mijenja se oblik ultrazvučnog snopa. Slično vrijedi za ultrazvučnu ehografiju u medicinskoj dijagnostici, gdje valna duljina ultrazvuka mora biti manja od razmaka dviju točaka koje se žele razlučiti.

Brzina ultrazvučnih valova ovisi o vrsti valova, gustoći i elastičnosti tvari kroz koju se valovi šire te o temperaturi tijela. Uz pretpostavku da je tvar izotropna i prostorno neograničena, brzina se ultrazvuka može izračunati pomoću izraza iz tablice 1,

Tablica 1

IZRAZI ZA IZRAČUNAVANJE BRZINE ULTRAZVUKA

Vrsta vala	Sredstvo	Brzina vala
L-val	tekuće	$v_L = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$
L-val	čvrsto	$v_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}$
T-val	čvrsto	$v_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$
R-val	čvrsto	$v_R = \frac{0,87 + 1,12\mu}{1+\mu} \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\mu)}}$

gdje je  $E$  modul elastičnosti,  $G$  modul smičnosti,  $K$  modul stlačivosti,  $\mu$  Poissonov koeficijent, a  $\rho$  gustoća tvari. U tablici 2 dane su brzine longitudinalnih i transverzalnih ultrazvučnih valova za sredstva na koja se ultrazvuk najčešće primjenjuje.

Tablica 2

PRIBLIŽNE BRZINE ULTRAZVUČNIH VALOVA

Materijal	Longitudinalni val m/s	Transverzalni val m/s
Aluminij	6 320	3 130
Bakar	4 700	2 260
Cink	4 170	2 410
Čelik	5 850	3 230
Olovo	3 320	1 670
Sivi lijev	4 600	2 650
Beton	4 600	-
Pleksi-staklo	2 730	1 430
Polietilen	2 340	925
Poliamid	2 620	1 080
Staklo	4 260	2 560
Voda	1 480	-
Mast	1 450	-
Krv	1 570	-
Mozak	1 541	-
Kosti lubanje	1 080	-

Impedancija sredstva umnožak je ultrazvučnog tlaka i titrajne brzine čestice, a nazvana je po analogiji s električnim veličinama (v. *Elektroakustika*, TE 4, str. 300). Za ravni harmonijski val ona ovisi samo o sredstvu i naziva se zvučnom impedancijom sredstva:

$$Z = \rho v, \tag{3}$$

gdje je  $\rho$  gustoća tvari, a  $v$  brzina ultrazvuka u tvari.

Na temelju vrijednosti zvučne impedancije može se odrediti kakav će biti udio prolazne i odbijene ultrazvučne energije na granici sredstava. Ako je zvučna impedancija dvaju sredstava jednaka, na granici između njih neće biti odbijanja, dok će odbijanje

biti to veće što se njihove impedancije međusobno više razlikuju. Na granici metala prema zraku odbijanje će biti vrlo veliko, što omogućuje otkrivanje diskontinuiteta u sredstvu kroz koje se ultrazvuk širi.

Ultrazvučni tlak jest djelovanje sile okomito na površinu tijela kada u njemu postoji ultrazvučno polje. Za jednostavne vrste valova, kao što su kuglasti i ravni val, zvučni je tlak

$$p = Za\omega, \quad (4)$$

gdje je  $a$  amplituda titranja čestice,  $\omega$  kutna frekvencija ( $\omega = 2\pi f$ ), a  $f$  frekvencija.

Gustoća zvučnog polja definirana je omjerom vremenskog prosjeka energije  $dE$  i obujma  $dV$  zvučnog polja u kojem je energija sadržana:

$$\frac{dE}{dV} = \frac{p^2}{2Zv}. \quad (5)$$

Jakost ultrazvuka omjer je vremenskog prosjeka snage zvuka  $dP$  i dijela valne fronte ploštine  $dS$  kroz koju se prenosi snaga.

Iako je ultrazvučni tlak jedan od najvažnijih parametara ultrazvučnog polja, on ipak ne daje dovoljan podatak o energiji u ultrazvučnom snopu. Stoga se mora odrediti jakost snopa, tj. onog dijela ultrazvučne energije s kojim se računa u primjeni. Ultrazvuk se u primjeni bitno razlikuje prema vrsti polja. Dvije su osnovne skupine: polja velike snage (od 1 W do 10 kW), koja se primjenjuju za čišćenje, zavarivanje, medicinsku terapiju i slično, i polja male snage ( $0,001 \dots 1$  W), koja služe za nerazornu kontrolu (defektoskopiju), alarme, medicinsku dijagnostiku itd.

Za ravni i kuglasti val jakost se ultrazvuka računa pomoću izraza

$$I = \frac{dP}{dS} = \frac{p^2}{2Z}. \quad (6)$$

Kad se uvrste izrazi (3) i (4), slijedi da je jakost ultrazvuka

$$I = 2\pi^2 f^2 \rho v a^2. \quad (7)$$

U većini se ultrazvučnih postupaka mjeri omjer dvaju ultrazvučnih signala, od kojih je jedan usporedbeni (referentni) i služi kao mjerilo drugog signala. U pretvaraču mjernog uređaja ultrazvučni valovi stvaraju električni impuls, kojega je posljedica električni napon i signal koji se može registrirati kao otklon na oscilogramu. Te su veličine u međusobnoj ovisnosti:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2^2}{U_1^2} = \frac{A_2^2}{A_1^2}, \quad (8)$$

gdje je  $U$  napon proizveden električnim impulsom, a  $A$  amplituda signala na oscilogramu.

Zbog velikih raspona u jakosti ultrazvuka prikladno je za mjerenje upotrijebiti logaritam omjera jakosti  $I_2$  i  $I_1$ , dakle razinu jakosti ultrazvuka:

$$n = 10 \lg \frac{I_2}{I_1}, \quad (9a)$$

odnosno logaritam omjera amplituda:

$$n = 20 \lg \frac{A_2}{A_1}, \quad (9b)$$

što se izražava u decibelima (dB).

Amplituda signala koja mjeri npr. jakost odbijenog ultrazvuka od pogreške u materijalu ili kojeg drugog reflektora, može biti mjera tog reflektora ako se usporedi s jakošću ultrazvuka odbijenog od reflektora poznate izmjere, pa je

$$\frac{A_m}{A_p} = \frac{S_m}{S_p} = \frac{D_m^2}{D_p^2}, \quad (10)$$

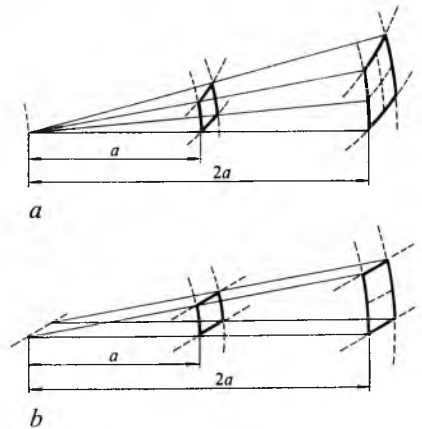
gdje je  $S$  ploština reflektora,  $D$  promjer reflektora, a indeksi  $m$  i  $p$  označuju mjerenu, odnosno poznatu veličinu.

## UZAJAMNO DJELOVANJE ULTRAZVUKA I TVARI

**Rasprostiranje ultrazvuka kroz sredstvo.** Pri rasprostiranju ultrazvuka sredstvom i prijelazu u drugo sredstvo nastaje promjena jakosti, a često i promjena smjera ultrazvučnih valova. Razlog je tome otpor što ga tvar pruža rasprostiranju ultrazvučnih valova, a on ovisi o zvučnoj impedanciji. Osim toga, različita zvučna impedancija na granici dvaju sredstava utječe na raspodjelu energije pri odbijanju i lomu valova te na smjer rasprostiranja ultrazvuka u drugom sredstvu.

Postupno ili naglo smanjenje jakosti ultrazvuka pri prolasku kroz sredstvo može se uglavnom pripisati gubicima pri rasprostiranju vala. Prijelaz ravnog vala u kuglasti ili valjkasti, već prema geometrijskom obliku pretvarača i sredstva kojim se val širi, uzrokuje gubitke. Zbog apsorpcije i raspršenja te interferencije i ogiba mogu nastati fazni ili frekvencijski pomaci i nepravilna raspodjela jakosti u ultrazvučnom polju.

Zakon udaljenosti naziv je za ovisnost promjene jakosti ultrazvuka i zvučnog tlaka o duljini puta ultrazvuka. Ultrazvučni se valovi različito rasprostiru prostorom te različito slabe.



Sl. 5. Rasprostiranje kuglastog (a) i valjkastog vala (b)

Jakost je za kuglasti val obrnuto razmjerna kvadratu udaljenosti od izvora, a za valjkasti val opada sporije, tj. linearno s udaljenosti (sl. 5). Omjeri su tlakova na dvije udaljenosti  $x$  za kuglasti val

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{x_2}{x_1}, \quad (11a)$$

a za valjkasti val

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{x_2}{x_1} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (11b)$$

Ti se izrazi primjenjuju za procjenu tlaka na većoj udaljenosti od izvora, međutim oni ne vrijede u blizini izvora pa se ne može na temelju njih zaključiti da je tlak u izvoru beskonačno velik.

Ultrazvučna se energija uglavnom apsorbira u tvarima zbog pretvorbe mehaničke energije u toplinu. Udio apsorpcije u ukupnom prigušenju ovisi o vrsti tvari.

U feromagnetnim materijalima dio se energije može gubiti i zbog lokalne magnetizacije. Mnoge pojave nastale titranjem, kao što su pomicanje granica dislokacija i granica zrna, povećat će apsorpciju ultrazvuka.

Raspršenje ultrazvučne energije nastaje u nejednoličnim materijalima. U metalima ga uzrokuju granice zrna, mikroporoznost te postojanje metalnih ili nemetalnih mikrouključaka, jer na granici svakog takvog zrna ultrazvuk nailazi na promjenu zvučne impedancije.

Raspršenje je u znatnom materijalu neznatno ako je izmjera zrna s obzirom na valnu duljinu ultrazvuka  $10^{-3} \dots 10^{-2}$ . S povećanjem zrna ili s povišenjem frekvencije ultrazvuka naglo raste raspršenje, a kada omjer valne duljine i izmjere zrna iznosi  $1 \dots 10$ , nastat će raspršenje koje će onemogućiti ultrazvučno ispitivanje. Raspršenje ne treba promatrati samo kao negativnu pojavu, jer je ono i mjera kvalitete tvari i izmjere zrna.

Impedancija znatno pridonosi prigušenju ultrazvuka pri prijelazu granice sredstava. Na svakoj se granici sredstava, zbog

razlike u njihovoj zvučnoj impedanciji, dio energije prenosi u drugo sredstvo.

*Ogib*, koji nastaje na rubovima diskontinuiteta u materijalu kada na njega stigne valna fronta, uzrokuje interferenciju valova unutar istog ultrazvučnog snopa. Posljedica interferencije može biti smanjenje jakosti na nekom mjestu.

Mjera prigušenja ultrazvuka jest *koeficijent prigušenja*. Uz pretpostavku da se u materijalu širi ravni val koji gubi tlak samo zbog apsorpcije u materijalu, u svrhu proračuna prigušenja može se pisati da tlak  $p(x)$ , odnosno jakost  $I(x)$ , na udaljenosti  $x$  od izvora iznosi

$$p(x) = p_0 e^{-\alpha x}, \quad (12)$$

$$I(x) = I_0 e^{-2\alpha x}, \quad (13)$$

gdje su  $p_0$  i  $I_0$  tlak i jakost ultrazvuka u izvoru, a  $\alpha$  koeficijent apsorpcije izražen obično u decibelima po metru (dB/m). Da bi se dobio koeficijent prigušenja, treba vrijednosti koeficijenta apsorpcije dodati sve ostale prinose prigušenju. Zbog toga se u praksi češće mjeri koeficijent prigušenja nego apsorpcije. To je mjerenje brz postupak kada se mogu postići dva uzastopna ultrazvučna odjeka ili prijam ultrazvuka u prozvučivanju.

**Ultrazvuk na granici sredstava.** Na granici sredstava ultrazvuk se dijelom odbija, a dijelom prolazi u drugo sredstvo. Omjer jakosti odbijenog i upadnog vala naziva se *koeficijent odbijanja s obzirom na jakost*, a omjer jakosti prolaznog i upadnog vala *koeficijent prolaza s obzirom na jakost*. Ako ultrazvučni val ulazi u drugo sredstvo *okomito*, koeficijent odbijanja iznosi

$$R = \left( \frac{m-1}{m+1} \right)^2, \quad (14)$$

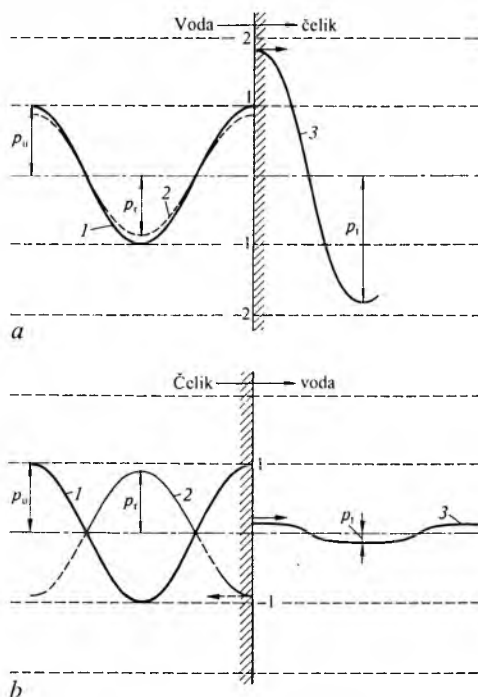
a koeficijent prolaza:

$$T = \frac{4m}{(m+1)^2}, \quad (15)$$

gdje je  $m$  omjer zvučnih impedancija dvaju sredstava ( $m = Z_1/Z_2$ ). Koeficijent odbijanja s obzirom na tlak omjer je ili amplituda ili ultrazvučnih tlakova, a ne jakosti, te iznosi

$$r = \frac{m-1}{m+1}. \quad (16)$$

Na slici 6 prikazano je stanje odbijanja i prolaza ultrazvuka na granici vode i čelika. U tom primjeru odbijeni val nosi 87,8%



Sl. 6. Stanje odbijanja i prolaza ultrazvuka na granici vode i čelika (prikazano tlakom ultrazvučnog vala). 1 ulazni, 2 odbijeni i 3 prolazni val,  $p$  ultrazvučni tlakovi tih valova

energije s obzirom na upadni val. Podatke o impedanciji i stupnju međusobnog odbijanja drugih sredstava v. *Defektoskopija*, TE 3, str. 191.

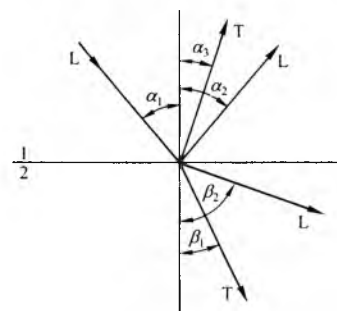
U usporedbi s čvrstim i tekućim sredstvom, *plinovi* imaju vrlo malenu impedanciju pa koeficijent odbijanja iznosi približno 1. Granica prema zraku može se smatrati poput granice s vakuumom. Takva se granica naziva *slobodnom granicom* i na njoj se odbija gotovo sva ultrazvučna energija. Stoga je primjena ultrazvuka vrlo djelotvorna u otkrivanju pukotina i ostalih pogrešaka koje uzrokuju diskontinuitet sredstva. Veliko odbijanje na granici prema zraku onemogućuje uvođenje ultrazvučnih valova iz pretvarača u tvar i primanje ultrazvuka iz tvari u pretvarač ako se između njih nalazi zrak. Zbog toga se između pretvarača i ispitnog predmeta mora nalaziti neka tekućina kao *kontaktno sredstvo* (voda ili ulje, uz eventualni dodatak aditiva).

U primjeni ultrazvuk često prolazi kroz jedan ili više *tankih slojeva*, npr. pri pregledu slojevitosti limova, eksplozivno zavaranih spojeva, a također i u imerzijskoj tehnici, gdje se ispitni predmet uranja u tekućinu koja služi za prijenos ultrazvuka. Koeficijent odbijanja ( $R$ ) i koeficijent prolaza ( $T$ ) pri okomitom prolasku ultrazvuka kroz tanki sloj mogu se izračunati, ako su poznate zvučne impedancije sredstava, pomoću sljedećih izraza:

$$R_{\text{sloja}} = \frac{\frac{1}{4} \left( m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi d}{\lambda}}{1 + \frac{1}{4} \left( m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi d}{\lambda}}, \quad (17)$$

$$T_{\text{sloja}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{4} \left( m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi d}{\lambda}}}, \quad (18)$$

gdje je  $d$  debljina tankog sloja. Budući da koeficijenti odbijanja i prolaza ovise o sinusnoj funkciji duljine, oni su periodične funkcije debljine sloja i valne duljine ultrazvučnih valova.



Sl. 7. Odbijanje i lom ultrazvučnih valova na granici sredstava

Ultrazvučni val koji pada na granicu sredstava *pod nekim kutom* djelomično se odbija, a djelomično ulazi u drugo sredstvo i pritom se lomi (sl. 7). I odbijeni i prolazni val pojavljuju se tada ponovno u dvije komponente: u longitudinalnoj (L) i transverzalnoj (T). Prema Snelliusovu zakonu (v. *Optika*, TE 9, str. 659) smjerovi rasprostiranja i pripadni kutovi određeni su brzinama valova u tim sredstvima:

$$\frac{\sin \alpha_1}{v_{1L}} = \frac{\sin \alpha_2}{v_{1L}} = \frac{\sin \alpha_3}{v_{1T}} = \frac{\sin \beta_1}{v_{2T}} = \frac{\sin \beta_2}{v_{2L}}, \quad (19)$$

gdje su  $\alpha$  i  $\beta$  kutovi koje val tvori s okomicom na granicu sredstava, a  $v_1$  i  $v_2$  brzine vala u jednom i drugom sredstvu. Kut upadnog vala pri kojem nastaje potpuno odbijanje (totalna refleksija) naziva se *kritičnim kutom*. Primjenom kritičnih kutova moguće je ukloniti pojedine komponente, odnosno stvarati određene vrste valova.

Primjenu često otežava postojanje više valova u sredstvu. Tumačenje oscilograma na ekranu ultrazvučnog uređaja teško je provesti bez računalne podrške ili bilo kakve automatike ako u predmetu istodobno postoji više ultrazvučnih valova. Poteškoća

## ULTRAZVUČNI UREĐAJ

je i u tome što se različiti valovi šire različitim brzinom, a iz signala na ekranu ultrazvučnog aparata ne može se zaključiti koji je val donio informaciju. Tada se upotrebljavaju pretvarači koji stvaraju samo jednu vrstu vala, a druga se komponenta uklanja primjenom kritičnih kutova.

Na temelju navedenih zakonitosti moguće je izračunati smjer ultrazvučnih valova nakon dolaska na granicu sredstava, te udio i raspored energije u svakoj vrsti vala koja nastane na granici sredstava. Odbijene se komponente valova nalaze u ravnini upadnog vala i okomice. Pretvorba vala koja se pritom zbiva naziva se *konverzijom vala*. Već prema vrsti vala koji dolazi na granicu sredstava (ravni, kuglasti ili valjkasti) te geometrijskom obliku granice, može se promijeniti vrsta vala i način rasprostiranja, a često i fokusiranje snopa.

Ako ravni val pada na granicu sredstava koja je valjkasta oblika, on će se lomiti, ali će umjesto jednog žarišta nastati žarišna crta od niza točaka. Žarišna se daljina može izračunati iz jednadžbe konjugacije (v. *Optika*, TE 9, str. 660):

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{n} \pm \frac{1}{m}, \quad (20)$$

gdje je  $m$  udaljenost izvora ultrazvuka,  $n$  udaljenost slike izvora, a  $F$  žarišna daljina. Polumjer je zakrivljenosti granične plohe  $r = 2F$ . Pozitivan predznak u (20) vrijedi za udubljene, a negativan za izbočene plohe.

Pri ulasku u predmet ultrazvuk nailazi na spomenute zrcalne plohe i mnogo složenije oblike granica, što ovisi o strukturi materijala, ali i o geometrijskom obliku predmeta.

**Djelovanje ultrazvuka na sredstvo.** Već prema frekvenciji i jakosti ultrazvuka, pri njegovu prolasku kroz sredstvo nastaju razne pojave u sredstvu, koje se mogu korisno primijeniti. Ultrazvučni valovi mogu uzrokovati mjesne promjene gustoće sredstva. To se primjenjuje u fizici za mjerenja onih fizikalnih veličina koje su povezane s promjenom gustoće sredstva. Energija ultrazvučnih valova može na sredstvo djelovati toplinski te uzrokovati kavitaciju i koagulaciju. Koje će djelovanje prevladati, ovisi o parametrima ultrazvuka, snazi zračenja, ploštini, odnosno obujmu na koji ultrazvuk djeluje, te o trajanju prozvučivanja.

*Toplinsko djelovanje*, kao izravna posljedica velike apsorpcije ultrazvučne energije u tvari, ima primjenu u tehnici, medicini, biologiji i drugim područjima. U tekućinama i plinovima temperatura se može znatno povećati.

*Kavitacija* može u tekućini nastati zbog prolaska ultrazvučnih valova. Pritom se stvaraju vrtlozi, tekućina se zagrijava i stvaraju se makrostruje i mikrostruje. Kavitacija u nekim tekućinama uzrokuje ionizaciju, a time i fluorescenciju. Emulgacija tekućina pobuđivanih ultrazvukom nastaje zbog kavitacije, a to se postiže i u sredstvima gdje klasični postupci ne daju rezultate.

*Koagulacija* (zgrušavanje) također može u tekućinama i emulzijama nastati ultrazvučnim pobuđivanjem. Manje čestice lakše i pravilnije slijede titranja uzrokovana ultrazvukom. Što je veća razlika u amplitudi titranja pojedinih čestica, to će sudari manjih i većih čestica biti učestaliji, a time i okrupnjavanje čestica brže.

*Kemijsko djelovanje* ultrazvuka poznato je dugo vremena, iako je katkad teško razlučiti izravno kemijsko djelovanje od istodobnog toplinskog djelovanja. Kemijsko se djelovanje može razvrstati na oksidacijsko djelovanje i na ubrzanje kemijskih reakcija.

*Fiziološko djelovanje* ultrazvuka također je posljedica njegova fizikalnog i kemijskog djelovanja na tvari, a primjenjuje se u medicinskoj terapiji. Terapijsko djelovanje ultrazvuka (v. *Medicinski elektronički uređaji*, TE 7, str. 712), kao i njegovo štetno djelovanje na zdravlje, u širokom je rasponu ultrazvučne snage, već prema tome koje se djelovanje ultrazvuka primjenjuje na kojem organu ili organizmu.

Ultrazvučna energija određene jakosti, frekvencije i trajanja može biti smrtonosna za mikroorganizme i organizme malih i srednjih veličina, a korisna za veće životinje i ljude. Jednakim se fizikalnim djelovanjem može postići korisno titranje u obliku mikromasaže za poticanje metabolizma stanica, ali i razaranje tkiva, bilo ono korisno ili štetno.

Ultrazvučni se uređaj sastoji od pretvarača koji služi kao primoodašiljač, od elektroničkih sklopova koji omogućuju napajanje, stvaranje električnih impulsa, pojačavanje, sinkronizaciju i druge potrebne funkcije, te od izlazne jedinice koja prikazuje rezultate ispitivanja ultrazvukom u prikladnu obliku. Uz to dolazi i pomoćni pribor, etaloni i usporedbeni uzorci. Uređaj može imati i više pojedinih elemenata, npr. dva ili više pretvarača koji rade istodobno, ili veći broj etalona za ugađanje sustava. Ultrazvučni se primoodašiljači mogu digitalno ili analogno povezati s pisanim, računalom, videorekorderom i dr.

**Pretvarač.** Najosjetljiviji je i ključni dio ultrazvučnog uređaja *pretvarač* koji sadrži odašiljač i prijamnik ultrazvuka. Pretvarač mora biti otporan na trošenje, postojan pri povišenim temperaturama i dovoljne mehaničke čvrstoće. Pretvarač se može pobuđivati neprekidno, impulsno ili aperiodično, što ovisi o trajanju impulsa koji stvara ultrazvuk u pretvaraču. Razlikuju se i pretvarači za primjenu imerzijskom tehnikom, pretvarači s posebnom zaštitom, pretvarači za rad pri visokim temperaturama itd.

Standardni pretvarači mogu s obzirom na smjer odašiljanja ultrazvučnog snopa biti ravni, kutni, dvostruki i fokusirajući.

*Ravni pretvarač* odašilje i prima ultrazvučne valove okomito na svoju izlaznu plohu, a *kutni pretvarač* pod kutom koji je prilagođen primjeni. *Dvostruki pretvarač* ima poseban pretvarač za prijamnik i za odašiljač. Oba su pretvarača ugrađena u zajedničko kućište, ali su zvučno i električno izolirani. Zvučno samostalan i odvojen, drugi pretvarač može primati ultrazvuk za sve vrijeme odašiljanja prvog pretvarača. *Fokusirajući pretvarač*, već prema kutu pretvarača, usmjeravanjem snopa prozvučava određena područja u predmetu.

*Ultrazvučno polje pretvarača.* Ultrazvučno polje ima određenu usmjerenost u prostoru, koja ovisi o frekvenciji ultrazvučnih valova, površini odašiljanja, načinu pobuđivanja, te o vrsti i obliku tvari kroz koju se rasprostire.

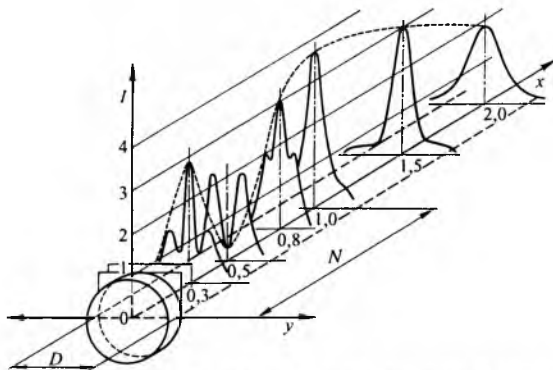
Za ispitivanje je važan onaj dio ultrazvučnog polja koji se nalazi u razmjerno uskom prostoru ispred pretvarača. Taj se korisni dio ultrazvučnog polja naziva *ultrazvučnim snopom*. Rubovi se ultrazvučnog snopa određuju prema vrsti ispitivanja. Granice ultrazvučnog snopa omeđuju dio prostora u ispitnom predmetu unutar kojeg se jakost ultrazvučnog polja može smatrati dovoljnom za ispitivanje.

Ultrazvučni snop prilikom odašiljanja i primanja ne mora biti istih karakteristika. Za primjenu su važne odašiljačko-prijamne karakteristike pretvarača. Budući da raspodjela jakosti unutar snopa ovisi o parametrima pretvarača, potrebna je stalna provjera ultrazvučnog snopa.

Širenje ultrazvučnog polja i raspodjela jakosti unutar polja mogu se opisati pomoću Huygensova principa (v. *Optika*, TE 9, str. 669). Jakost polja u svakoj točki ispred pretvarača posljedica je interferencije ultrazvučnih valova koji iz svake točke pretvarača stižu u promatranu točku. Posljedica je ukupne interferencije svih elementarnih valova pojava minimuma, maksimuma i različitih vrijednosti jakosti u prostoru ispred pretvarača.

Izrazita se promjenjivost zvučnog tlaka pojavljuje neposredno ispred pretvarača. To se područje naziva *bliskim poljem* ili *Fresnelovim područjem*. Duljina je bliskog polja određena udaljenošću između odašiljačke plohe pretvarača i posljednjega najjačeg maksimuma koji nastaje na središnjoj crti ultrazvučnog snopa. U točki najvećeg maksimuma ultrazvučno je polje skupljeno na najmanji presjek. Svaki će izvor ultrazvuka koji nije idealna točka, već ima stvarne izmjere, stvarati ultrazvučno polje na sličan način. Razlikovat će se, međutim, oblik polja i izmjere bliskog polja, već prema obliku izvora ultrazvuka (sl. 8). Crtkana linija koja povezuje maksimume jakosti polja uzduž osi  $y/N$  (gdje je  $N$  duljina bliskog polja) pokazuje da je na udaljenosti  $x = N/2$  jakost razmjerno malena unatoč blizini pretvarača. Na udaljenosti  $x = N$  jakost zadobiva maksimalnu vrijednost nakon koje se jednolično smanjuje.

Duljina bliskog polja  $N$  ovisi o izmjerama i vrsti pretvarača te o vrsti ultrazvučnih valova. Na udaljenosti od približno  $3N$  snop se širi uz stalni divergencijski kut  $\gamma$ . To se područje ultrazvučnog snopa naziva *dalekim poljem* ili *Fraunhoferovim područjem*.



Sl. 8. Jakost ultrazvučnog polja uzduž osi.  $D$  promjer pretvarača,  $I$  jakost polja

Područje unutar ultrazvučnog snopa od Fresnelova područja do udaljenosti približno jednake trostrukom Fresnelovu području naziva se *tranzitnim područjem*. Unutar tog područja počinje rasprostiranje snopa s promjenjivim kutom divergencije, a slabljenje nije još potpuno u skladu sa zakonom udaljenosti.

S promjenom oblika i trajanja impulsa kojim se pobuđuje pretvarač mijenja se ultrazvučno polje energijski, ali ne i oblikom. Stoga se slika polja može smatrati stalnom jer odnosi jakosti unutar polja ostaju nepromijenjeni.

Za izračunavanje parametara polja za kružne pretvarače vrijedi

$$N = \frac{D_{ef}^2}{4\lambda} = \frac{D_{ef}^2 f_{ef}}{4v}, \quad (21)$$

$$\sin \gamma_6 = 0,51 \frac{v}{D_{ef} f_{ef}}, \quad (22a)$$

$$\sin \gamma_{20} = 0,87 \frac{v}{D_{ef} f_{ef}}, \quad (22b)$$

a za pravokutne pretvarače kojima se stranice ne razlikuju po duljini više od 12%:

$$N = 1,3 \frac{a_{ef}^2 f_{ef}}{v}, \quad (23)$$

$$\sin \gamma_6 = 0,44 \frac{\lambda}{a_{ef}}, \quad (24a)$$

$$\sin \gamma_{20} = 0,87 \frac{\lambda}{a_{ef}}, \quad (24b)$$

gdje je  $N$  duljina bliskog polja,  $D_{ef}$  efektivni promjer pretvarača ( $D_{ef} = 0,97 D_0$ ),  $D_0$  nazivni promjer kućišta,  $f_{ef}$  efektivna frekvencija,  $\gamma_6$  divergencijski kut za granicu polja 6 dB,  $\gamma_{20}$  divergencijski kut za granicu polja 20 dB.

Pravokutni pretvarači nemaju rotacijski simetrično polje. Općenito je duljina bliskog polja pravokutnih pretvarača

$$N = \frac{S_p}{\pi \lambda} = \frac{S_p f_{ef}}{\pi v}, \quad (25)$$

gdje je  $S_p$  ploština pretvarača.

**Prikaz rezultata ispitivanja.** Vrijeme prijama i amplitude ultrazvuka u prijamnom pretvaraču treba tako prikazati da se rezultati ispitivanja mogu što bolje interpretirati. Više je vrsta takvih prikaza, a najčešći su prikaz A i B.

*A-prikaz* (amplitudni prikaz) najčešći je oscilogram u industrijskoj primjeni. U tom je prikazu amplituda signala na ordinati, a vrijeme prolaza ultrazvuka na apscisi koordinatnog sustava.

*B-prikaz.* Vertikalni položaj bilo koje točke na oscilogramu pokazuje udaljenost između reflektirajuće plohe i pretvarača. Horizontalni je položaj određen postranim položajem pretvarača u vrijeme primanja ultrazvuka. B-prikaz daje sliku presjeka predmeta s obzirom na reflektivna svojstva unesenog ultrazvučnog

snopa. Primjenjuje se vrlo uspješno u ultrazvučnoj provjeri korozije i u medicinskoj dijagnostici.

Suvremeni ultrazvučni sustavi sadrže računalom upravljani sklop za pretraživanje (skaniranje) te za automatsku registraciju podataka i računalnu analizu.

**Etaloni i usporedbeni uzorci.** Za provjeru karakteristika i pripremu ultrazvučnih uređaja te u svrhu pomoći u tumačenju oscilogramima upotrebljavaju se etaloni i usporedbeni uzorci.

*Etalon* je izradak strogo određenog sastava, toplinske obradbe, geometrijskog oblika i kvalitete površinske obradbe, koji je prihvaćen dogovorom ili normom unutar šire skupine korisnika. Uz etalone je obavezan atest, dokument kojim ovlaštena organizacija potvrđuje naznačena svojstva.

*Usporedbeni uzorak* ili *blok* naziv je za izradak od materijala od kojeg je načinjen ispitni predmet ili je u poznatom odnosu prema ispitnom predmetu, a služi za ugađanje uređaja za ispitivanje. On može oblikom slijediti ispitni predmet ili biti jedan od ispitnih predmeta poznatih karakteristika, a često sadrži stvarne i prethodno karakterizirane ili umjetno unesene pogreške u svrhu pomoći u tumačenju ultrazvučnih oscilograma.

## PRIMJENA ULTRAZVUKA

U primjeni se razlikuju mjerenja ultrazvukom male jakosti (do  $\sim 1 \text{ W/cm}^2$ ) i ultrazvukom velike jakosti (do  $\sim 1000 \text{ W/cm}^2$ ).

### Primjena ultrazvuka male jakosti

Ultrazvuk male jakosti primjenjuje se u mnogim granama znanosti, tehnike i medicine za nerazornu dijagnostiku.

**Nerazorna provjera materijala (defektoskopija).** Ultrazvučna provjera jedan je od najvažnijih i najšire primjenjivanih postupaka nerazorne provjere materijala zbog svoje izrazito velike osjetljivosti, dobrih mjernih značajki te mogućnosti primjene na mnogim materijalima i tvorevinama. Pritom se radi o otkrivanju pogrešaka, utvrđivanju oblika i izmjera predmeta, karakterizaciji materijala ili nadzoru procesa.

*Odjek ultrazvuka* vrlo je prikladan način dobivanja informacija pri nerazornoj provjeri, pogotovo što je za mjerenje dovoljan pristup predmetu samo s jedne strane. Informacija se dobiva analizom odbijenog ultrazvučnog snopa od pogrešaka i nepravilnosti u materijalu. Slično je i mjerenje debljine i određivanje oblika nedostupnog ili nevidljivog predmeta jer se ultrazvučni valovi, nakon prolaska kroz predmet, na njegovu kraju odbijaju i vraćaju zbog velike razlike u zvučnoj impedanciji između predmeta i zraka.

*Prozvučivanje* se razlikuje od opisanog mjerenja po tome što se jednim pretvaračem ultrazvuk šalje kroz predmet, a drugim se pretvaračem na suprotnoj strani mjeri signal nakon prolaska kroz predmet. Smanjenje ili izostanak signala upućuje na pogrešku u materijalu, nehomogenost i sl.

Pri likom mjerenja pretvarač može biti u neposrednom dodiru s površinom materijala (kontaktna tehnika) ili je predmet uronjen u tekućinu, obično u vodu, kao kontaktno sredstvo kroz koje se ultrazvučni snop usmjeruje na površinu predmeta (imerzijska tehnika, tehnika uranjanja).

Karakterizacija materijala temelji se na praćenju i mjerenju promjena ultrazvučnih parametara zbog rasprostiranja ultrazvuka i uzajamnog djelovanja između njega i materijala. Tako npr. brzina ultrazvuka u sivom lijevu ovisi o stupnju nodularnosti, a u nekim otopinama o njihovu sastavu, pa može poslužiti i kao parametar za praćenje procesa.

Mjerenjem brzine ultrazvuka uspješno se otkrivaju zaostala naprezanja u materijalu i određuju ona svojstva materijala o kojima ovisi brzina rasprostiranja ultrazvučnih valova.

Mjerenje brzine protoka u cjevovodima, kao i niza drugih veličina korisnih za praćenje procesa i nadzor u održavanju, moguće je praćenjem jednoga ili više parametara ultrazvučnog polja.

Mogućnosti su ultrazvučne provjere materijala izvanredno velike. Ograničenje je češće cijena i isplativost uvođenja neke od primjena nego fizikalne i tehničke mogućnosti primjene.

Više o defektoskopiji, odjuku i prozvučivanju v. *Defektoskopija*, TE 3, str. 191, a o mjerenju debljine limova v. *Akustika*, TE 1, str. 65.

**Primjena u hidroakustici.** Zbog razmjerno malenih gubitaka pri rasprostiranju kroz vodu, ultrazvuk se primjenjuje u pomorstvu i u vojne svrhe. Najčešće su primjene: telekomunikacije kroz vodu, otkrivanje i daljinsko promatranje te navigacija.

Sporazumijevanje na daljinu kroz vodu odavno je poznato i primjenjivano u području zvučnih frekvencija. Još 1490. Leonardo da Vinci objašnjava mogućnost otkrivanja broda na većoj udaljenosti osluškivanjem zvuka što ga brod proizvodi. Primjena ultrazvuka u podvodnim komunikacijama omogućila je veći domet i bolje razlučivanje. Domet veza ovisi o opremi i fizikalno-kemijskim svojstvima sredstva kroz koje se ultrazvuk širi.

Primjenom ultrazvuka za daljinsko promatranje, tj. otkrivanje plovila, uvelike se unaprijedilo već poznato osluškivanje šuma što ga proizvodi plovilo.

Pri ultrazvučnom snimanju prostora registrira se ultrazvuk odbijen od pojedinih predmeta unutar istraživanog područja. Tako se mogu otkriti i predmeti koji miruju, a predmetima koji se gibaju može se odrediti smjer i brzina gibanja.

U navigaciji ultrazvuk služi za mjerenje dubina te apsolutne i relativne brzine broda. Reljef morskog dna snima se ultrazvučnim pretraživanjem u željenom rasteru, a osjetljivost se mijenja izborom ultrazvučne frekvencije. Sličan se postupak primjenjuje i u ribolovu.

**Medicinska dijagnostika.** Među najstarijim su primjenama ultrazvučne dijagnostike u medicini bile pretrage u ginekologiji i u praćenju trudnoće. Ultrazvuk se primjenjuje i za anatomski pregled, posebno trbušnih organa i srčanih zalistaka. Unapređenjem mogućnosti tumačenja, ultrazvučna pretraga uspješno zamjenjuje za zdravlje štetne radiološke pretrage.

Nove su mogućnosti medicinskoj dijagnostici dali antenski pretvarači građeni od multipretvarača s uzastopnom faznom pobudom. Na taj se način može promatrati rad organa, npr. rad srca i disanje ploda. Za mjerenje protoka krvi primjenjuje se i Dopplerov princip, koji se temelji na promjeni frekvencije odjeka razmjerno udaljenosti pokretnog reflektora.

Zbog široke primjene ultrazvuka u industrijskoj i medicinskoj dijagnostici provedena su opsežna istraživanja o eventualnom štetnom utjecaju ultrazvuka na zdravlje. Jakost je ultrazvuka koja se primjenjuje u dijagnostici mnogo manja od jakosti koja uzrokuje kavitaciju. Djelovanje je, dakle, pretežno toplinsko i do danas nisu poznate štetne pojave u tom području primjene. Više o primjeni ultrazvuka u medicinskoj dijagnostici v. *Medicinski elektronički uređaji*, TE 7, str. 710.

### Primjena ultrazvuka velike jakosti

Ultrazvuk velike jakosti primjenjuje se za postizanje stalnih promjena fizikalnog stanja materijala. Najčešće se primjenjuje u industriji za čišćenje i zavarivanje (v. *Akustika*, TE 1, str. 65).

Mnogi se proizvodi industrijski čiste ultrazvukom, npr. dijelovi automobilskih motora, dijelovi strojeva i instrumenata, nakit, medicinska oprema i stakleni pribor, filtri, optičke leće, poluvodiči, tiskani sklopovi i ostali elektronički elementi. Čišćenje je to bolje što predmet bolje odbija, a manje apsorbira ultrazvuk. Posebno je korisna upotreba za čišćenje predmeta složena geometrijskog oblika s pretežno nedostupnim površinama.

Način čišćenja ovisi o predmetu i vrsti nečistoća koje treba ukloniti te o načinu prijanjanja nečistoća. Kada u koju se predmeti uranjaju sadrži sredstvo za čišćenje, a ultrazvučni pretvarači prislonjeni uz kadu pospješuju čišćenje izazivanjem kavitacije sredstva, čime se uklanjaju i čvrsto prionule naslage.

Velike su mogućnosti primjene ultrazvuka i u mnogim drugim područjima, npr. pri emulgiranju, atomizaciji, bojenju tekstila, filtraciji i kristalizaciji. Ultrazvučno zavarivanje plastomera jedna je od važnijih primjena. Postupak je brz i lako se može automatizirati, a prednost mu je što zbog malog unosa topline ne uzrokuje deformaciju i degradaciju okolnog materijala.

Ultrazvuk velike jakosti ima široku primjenu u medicinskoj terapiji, za uklanjanje bubrežnih kamenaca, zavarivanje kostiju, uništavanje kancerogenih tkiva, uklanjanje očne mrežne (v. *Medicinski elektronički uređaji*, TE 7, str. 712), zatim u stomatologiji itd. Ultrazvuk se primjenjuje i u fizioterapiji za masažu.

LIT.: R. C. McMaster, Non-destructive Testing Handbook. The Ronald Press Company, New York 1959. – R. J. Urlick, Principles of Underwater Sound for Engineers. New York 1967. – Metals Handbook, Vol. 11. ASM Handbook Committee, Ohio 1976. – R. W. Nichols, Non-destructive Examination in Relation to Structural Integrity. Applied Science Publishers, London 1980. – J. & H. Krautkramer, Ultrasonic Testing of Materials. Springer-Verlag, Berlin 1983. – R. Halmshaw, Non-destructive Testing. Edward Arnold, London 1987.

V. Krstelj

**UMJETNA KOŽA**, višeslojna plošna tvorevina koja ima izgled sličan prirodnoj koži, a sastoji se od nosećeg tekstilnog materijala i jednoga ili više slojeva nanesenog polimernog materijala. Od umjetne se kože izrađuju proizvodi koji mogu biti proizvedeni i od prirodne kože, ali i različiti drugi proizvodi, npr. cerade i pokrovi za zaštitu od sunca. Na tome se i temelji podjela umjetnih koža na visokovrijedne umjetne kože vrlo slične pravoj koži i na umjetne kože za tehničke namjene.

U XVIII. su stoljeću tkanine u Engleskoj i Njemačkoj premazivale lanenim uljem, a sredinom XIX. st. nastale su prve umjetne kože, također na bazi sušivih ulja. Laneno se ulje istodobno upotrebljavalo za premazivanje kože kako bi ona izgledala kao lakirana. Krajem stoljeća upotrebljavao se celulozni nitrat otopljen u esterima kao materijal za premazivanje tkanina. Slijedila su tzv. gumirana platna koja su se dugo vremena upotrebljavala kao materijal za zaštitu od kiše i nevremena.

Nakon 1937. godine kao materijali za naslojavanje tkanina važne postaju paste od poli(vinil-klorida) i omekšivača, a od 1958. primjenjuju se sredstva za stvaranje mjehurića u tim pastama koja su omogućila proizvodnju umjetnih koža s laganim i mekanim pjenastim slojevima. Prvi takav trgovački proizvod pod nazivom *skaj* ostao je do danas istoznačnica za umjetnu kožu, a iz nekih je područja potpuno istisnuo prirodnu kožu i stvorio nova tržišta. Skaj je i danas zadržao najveći udio među umjetnim kožama.

Od 1960. godine kao sredstva za naslojavanje na važnosti su dobili i poliuretani. Razvija se i tehnika nanošenja slojeva uvođenjem tzv. prijenosnog postupka (1957) i koagulacije (1964). Razvoj suvremene tehnologije na tom je području karakteriziran finom obradom i oplemenjivanjem površine. Eksperimentira se s novim tipovima nosača, uz tkanine upotrebljavaju se pletiva i najrazličitije netkane tekstilije, a postignuta je velika sličnost s različitim tipovima prirodne kože.

Prilikom proizvodnje umjetne kože obično se nastoji dobiti proizvod što sličniji pravoj, prirodnoj koži. Građa je prirodne kože iz njezinih fibrila jedinstvena; unutrašnje područje razmjerno slobodne vlaknate strukture postaje prema sredini sve gušće, a na površini je to čvrsto, kompaktan sloj. Oba najvažnija svojstva, čvrstoća na trganje i istezanje te otpornost na habanje i udare, ujedinjena su u prirodnoj koži u njezinu gornjem sloju. Suprotno, u umjetnoj koži ta svojstva moraju potjecati od različitih slojeva koji leže jedan preko drugoga. Pokrivni je sloj odgovoran za otpornost na habanje i na udare i njime je određen vanjski izgled, dok donji, noseći sloj daje potrebnu čvrstoću i istezljivost.

**Noseći materijali.** Kao podloga ili noseći materijal za slojeve polimernih materijala upotrebljavaju se tkanine, pletiva ili netkane tekstilije, koji mogu biti izrađeni od pamuka, regenerirane celuloze, poliamida, poliestera, polipropilena ili njihovih smjesa. Često se primjenjuje i pređa prije toga skupljena ili teksturirana na povišenoj temperaturi. Za posebne se svrhe kao nosači upotrebljavaju materijali od staklenih ili poliuretanskih vlakana.

**Tkanine** se primjenjuju kao podloga za proizvodnju slabo istezljive umjetne kože otporne na trganje. Najčešće se upotrebljavaju keperi, platna i atlas (v. *Tkanje*), često i čupavljeni, a površinska im je masa 100·500 g/m<sup>2</sup>.

**Pletiva** su se počela primjenjivati nakon uvođenja prijenosnog postupka. Rabe se kružna i osnovna pletiva najrazličitijih konstrukcija (v. *Pletenje i čipkanje*, TE 10, str. 378), a dobiva se elastična i mekana umjetna koža različite istezljivosti i elastičnosti. Površinska je masa pletiva 30·300 g/m<sup>2</sup>.

**Netkane tekstilije** kao nosači (v. *Tekstil*, TE 12, str. 566) daju umjetnu kožu vrlo sličnu prirodnoj koži. Pri radu s njima postoji velika mogućnost kombinacija i varijacija vlakana, nanosa slojeva i veziva. Kao veziva u proizvodnji netkanih tekstilija primjenjuju se vodene disperzije butadienskih kopolimera, poliakrilata, polivinilnih spojeva ili poliuretana. Za naslojavanje je važno poznavati vrstu veziva u netkanom tekstilu, jer neka veziva upijaju omekšivač iz nanesenog sloja, pa sloj postane krut i lako puca. Površinska je masa netkanih tekstilija 30·600 g/m<sup>2</sup>.