

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Stanislav Kubík

Ultrazvuk a jeho technické využití

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 1 (1956), No. 3, 258--269

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137125>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1956

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

schopny provést, zpracovávat taková množství různorodých informací, která by jinak vyžadovala velkých pracovních kolektivů, účtářských i jiných. Matematický stroj může také provádět analýsu výsledků, vybírat a třídit různá data. To vše nesmírně šetří lidskou práci.

Dnes se vyrábějí speciální elektronické stroje, určené pro evidenci, účetnictví a pro statistiku. Tyto stroje mají poměrně jednoduché aritmetické zařízení, naproti tomu paměť velké kapacity a mnoho kanálů pro vstup a výstup informací. Pracuje se také na využití matematických strojů pro evidenci a plánování výroby ve skupinách závodů, soustředěných na jednom místě. Celé účetnictví těchto závodů, statistiku, výpočet mezd, sestavování grafů spotřeby, plánování přísunu materiálů, kontrolu hotových výrobků atd. budou provádět stroje.

Rozsáhlé a všestranné využití elektronických matematických strojů ve vědě a v technice, v průmyslové výrobě, pro ekonomické a statistické výpočty atd. dovedlo rozvoj výrobních sil na novou vyšší úroveň. Stroje osvobozují velké množství lidí od těžké duševní práce, spojené s unavujícími jednotvárnými úkony, a umožňují urychlit výrobní proces jeho úplnou automatizací. Počítací stroje se změní z těžkopádných, složitých a choulostivých zařízení v jednoduché a spolehlivé přístroje, a to použitím krystalových diod a triod, které nahrazují elektronky. Rozvoj techniky v tomto směru je co do významu hned za rozvojem nukleární fyziky a nukleární techniky.

Stanislav Kubík

ULTRAZVUK A JEHO TECHNICKÉ VYUŽITÍ*)

Ультразвук в технике

Použití ultrazvuku v různých průmyslových odvětvích je velmi široké. Používá se ho na př. v defektoskopii k hledání vad v materiálu, k určování vzdáleností a geometrických rozměrů a také jako aktivního prostředku působení na látky nebo na průběh technologického procesu.

Široké možnosti průmyslového použití ultrazvuku vyplývají z jeho fyzikálních vlastností. Současná úroveň vědy dosud neumožňuje přesnou analýsu všech podrobností toho či onoho procesu a tak zároveň s rozšiřováním a prohlubováním našich znalostí z oblasti fyziky ultrazvuku porostou možnosti jeho technického použití.

Frekvence ultrazvuku je značně vyšší než frekvence slyšitelných zvuků, a naopak vlnové délky ultrazvuku jsou značně menší než slyšitelných zvuků. Díky této vlastnosti se ultrazvukové vlny na rozdíl od vln zvukových šíří přímočaře (podobně jako světlo). To je jedna ze zvláštností ultrazvuku.

Zvukové vlny se šíří od zdroje všemi směry. Projde-li zvuková vlna nevelkým otvorem, šíří se i za ním všemi směry na rozdíl od světelného paprsku, prošlého otvorem v neprůhledné stěně. Příčinou těchto odlišných vlastností dvou jevů vlnového charakteru — zvuku a světla — je okolnost, že způsob šíření vlny za překážkou závisí na poměru mezi rozměry této překážky a vlnovou délkou. Jsou-li rozměry překážky malé nebo řádově stejné velikosti jako délka vlny, pak vlny

*) Referát z článku laureáta Stalinovy ceny doktora technických věd profesora L. D. Rozenberga *Ultrazvuk v technice* (Ultrazvuk v technice), Vsesojuznoje občestvo po rasprostraněniu političeskich i naučnych znanij, ser. IV, č. 20, Izd. »Znanij«, Moskva 1955.

obtékají překážku, aniž by za ní vznikl stín. Analogicky tomu se vlny, které projdou otvorem, jehož rozměry jsou malé vzhledem k délce vlny, šíří všemi směry. Je-li však překážka ve srovnání s délkou vlny velká, pak za překážkou vzniká stín.

Poněvadž ultrazvuk má velmi malou vlnovou délku, vznikají při jeho šíření zvukové stíny. Ultrazvukové vlny se mohou šířit ve tvaru úzkých paprsků, které se v mnohém podobají paprskům světelným. Mohou se odrážet, lámat a zaostřovat, při čemž platí zákony, analogické zákonům geometrické optiky.

Malé délky ultrazvukových vln a s tím spojená možnost získat ultrazvukové paprsky umožňuje nejen soustředit celou energii zvuku v požadovaném směru, ale i zaostřit paprsky, t. j. soustředit celou energii do nevelkého objemu. Pro zaostřování ultrazvuku je možno použít dutých zrcadel, čoček atd.; zvukové čočky se tvarem podobají optickým, ale zhotovují se z materiálů, v nichž se rychlost šíření zvuku liší od rychlosti zvuku v okolním prostředí. Pro práci ve vodě je možno na př. použít čočky, zhotovené z plexiskla.

Je známo, že při konstantní amplitudě je rychlost kmitání nějaké částice úměrná frekvenci. To znamená, že kinetická energie kmitající částice je úměrná čtverci kmitočtu. Tím lze vysvětlit, že ultrazvuk může přenášet značně větší výkon než slyšitelný zvuk. Pro zvukovou vlnu, odpovídající hlasitosti běžného hovoru, je intenzita (t. j. výkon připadající na jednotku plochy) rovna přibližně $1 \cdot 10^{-6}$ wattu na čtvereční centimetr, intenzita ultrazvuku však se měří na wattu a dokonce na desítky wattů na čtvereční centimetr.

Při šíření zvukových vln v kapalinách nebo plynech vzniká následkem střídavého zhuštění a zředění prostředí přídavný tlak, který se superponuje na původní tlak, existující v daném prostředí i za nepřítomnosti zvuku (na př. tlak atmosférický). Přídavný tlak souvisí s intenzitou zvuku a nazývá se zvukový tlak. U ultrazvuku mohou přídavné tlaky v důsledku velké intenzity dosáhnout značných velikostí. Na příklad při průchodu ultrazvuku střední intenzity (3—5) W/cm² vodou vzniká přídavný tlak o velikosti několika atmosfér. Tak velký zvukový tlak v kapalině vede ke kvalitativně novému jevu, t. zv. kavitaci.

Zvukový tlak má v okamžiku zhuštění kladnou hodnotu, t. j. na kapalinu působí všestranný tlak několika atmosfér, který snadno snese. Avšak v okamžiku zředění má zvukový tlak hodnotu zápornou a na kapalinu působí roztažné síly, vyvolávající porušení soudržnosti kapaliny. Vzniká v místech snížené soudržnosti kapaliny, t. j. tam, kde jsou v kapalině malé plynové bublinky nebo částičky nečistoty.

V důsledku porušení soudržnosti vzniká v kapalině řada malých dutin, t. zv. kavitačních zárodků, které po krátké existenci s hlukem zanikají. Při tom vznikají značně velké síly — okamžité tlaky mohou dosáhnout velikostí několika tisíc atmosfér. To je doprovázeno velkým místním zvýšením teploty.

Obrovské tlaky vznikající při zániku kavitačních zárodků mohou vést k mechanickému rozrušení povrchu pevného tělesa, nacházejícího se v blízkosti kavitačních bublin.

Kromě těchto mechanických následků kavitace se projevují i průvodní zjevy elektrické. Vznik a zánik kavitačních zárodků je doprovázen místní elektrisací. V bublinách přeskakují drobné jiskřičky a kapalina začíná slabě světélkovat.

Urychlení částí kapaliny působením zvukové vlny, odpovídající obvyklé hlasitosti, je jen několik setin zrychlení zemské tíže. Naproti tomu působením ultrazvukových vln na kapalinu může urychlení částic dosáhnout hodnot 10^3 krát

a dokonce 10^6 krát větších. Takové nesmírné urychlení (t. j. 10^4 — 10^7 m/sec²) může vyvolat mechanické rozrušení částic prostředí.

Charakteristickým rysem ultrazvuku je tedy schopnost přenášet velkou mechanickou energii. V souvislosti s tím dochází ke značnému urychlování a s tím spojeným velikým změnám tlaku v prostředí. V důsledku toho v okamžiku záporné půlplny vznikají v kapalině kavitační zárodky. Jejich zánik je provázen silnými krátkodobými údery, při čemž tlak dosahuje velikosti několika tisíc atmosfér a následkem toho k místním zvýšením teploty a elektrisaci prostředí.

Ultrazvuky existují v přírodě podobně jako slyšitelné zvuky. Na příklad hluk větru a hluk mořského příboje obsahuje vedle slyšitelných zvuků také zvuky neslyšitelné. Různý hmyz, na příklad cvrčci, kobylky a pod., také vydává a přijímá ultrazvuky. Tyto přírodní zdroje ultrazvuku jsou však pro výzkum a především pro technické použití nevhodné. Pro technické účely se ultrazvuk získává různými zařízeními, která je možno rozdělit na dvě hlavní skupiny: mechanická a elektromechanická.

Nejprve o mechanických zdrojích ultrazvuku. Nejjednodušším zdrojem zvuku je píšťalka, v níž vzniká zvuk narážením proudu vzduchu na ostrou hranu vnitřní dutiny píšťalky. Čím menší jsou rozměry dutiny, tím vyšší je kmitočet takto vznikajícího zvuku. Zmenšováním rozměrů dutiny je tedy možno dosáhnout, že píšťalka začne vydávat zvuk o tak vysokém kmitočtu, že je neslyšitelný.

Nedostatkem tohoto nejjednoduššího generátoru ultrazvuku je jeho malá výkonost. Může vyrábět ultrazvuky o kmitočtu od 4 do 60 tisíc Hz a do 100 W zvukového výkonu. K zvýšení výkonu je nutno zvětšit proud vzduchu tekoucího píšťalkou. Při tom vznikají průvodní jevy (o kterých nebudeme v tomto referátu hovořit), které podporují zvýšení ultrazvukového výkonu píšťalky. Účinnost těchto generátorů, t. j. poměr výkonu vyrobeného ultrazvuku k celému výkonu, potřebnému na jeho výrobu, je pouze několik procent. Přesto se však v praxi velmi často používají, protože jsou levné, jednoduché, mají snadnou obsluhu a není potřeba zvláštního doplňkového zařízení. Stlačený vzduch se dodává z kompresoru nebo z balonu.

Ultrazvuk vyráběný tímto generátorem se šíří více méně na všechny strany. Má-li se získat ultrazvukový paprsek jen určitého směru, umístí se generátor do ohniska dutého zrcadla.

Často je potřeba použít ultrazvuku v kapalině. Vyrábět ultrazvuk v takovém případě nad kapalinou není vhodné, protože větší část paprsků, dopadajících na rozhraní, se odrazí a do kapaliny pronikne jen nepatrná část vyrobeného ultrazvuku. Užívá se proto zařízení, nazývané kapalinová píšťalka. Princip činnosti je též jako u píšťalky vzduchové. Tímto generátorem je možno získat ultrazvuky o kmitočtech od 4 do 30 tisíc Hz a užitečný výkon několik desítek wattů.

K výrobě intenzivních ultrazvukových kmitů ve vzduchu se používá sirén. Siréna sestává ze dvou kovových kotoučů, na jejichž obvodě je řada otvorů. Otáčeli se jeden z kotoučů, pak se jeho otvory v určitém okamžiku kryjí s otvory v nepohyblivém kotouči. V těchto okamžicích protéká otvory proud vzduchu, který je vzápětí při dalším pootočení kotouče přerušen. Kmitočet pulsací vzduchu závisí na počtu otvorů a na rychlosti otáčení kotouče. Pulsace vzduchu jsou zdrojem intenzivních zvukových vln.

Dnešní ultrazvukové sirény pracují v kmitočtovém pásmu od 10 do 200 tisíc Hz a mohou vyrobit několik kW užitečného výkonu při účinnosti 50—70 %. Intenzita zvuku vyrobeného sirénami dosahuje až 10 W/cm². Výroba tak velkých vý-

konů v kapalině není však dosud technicky vyřešena. To je značnou překážkou širokého použití ultrazvuku v průmyslu.

Je tedy možno říci, že dnešní mechanické zdroje ultrazvuku jsou jednoduchými, spolehlivými a výkonnými generátory. Jejich hlavním nedostatkem je nízký kmitočet vyrobeného ultrazvuku (desítky nebo v nejlepším případě stovky tisíc Hz) a nemožnost výroby větších výkonů v kapalině.

V elektromechanických zdrojích vzniká zvuk přeměnou kmitů elektrického proudu příslušné frekvence v mechanické kmitý zdroje. Odtud vyplývá, že pro uvedení elektromechanického zdroje v činnost je třeba střídavého proudu o frekvenci, odpovídající frekvenci ultrazvuku, který chceme dostat.

Generátory střídavého proudu od nejnižší — průmyslové (50 Hz) — frekvence až do nejvyšších radiových frekvencí (miliony a miliardy Hz), používaných v radiotechnice, jsou dnes běžně v provozu. Také výkonem vyhovují pro celé užívané pásmo ultrazvukových frekvencí. Vysokofrekvenční elektrické generátory jsou však poměrně složité a drahé, jejich účinnost je 30–50 % a v důsledku toho je cena vysokofrekvenční energie značně vyšší než výrobní cena energie průmyslové frekvence. Kromě toho je vlastní účinnost elektromechanických zdrojů ultrazvuku 30–60 %. Je tedy ultrazvuková energie, vyráběná elektromechanickými zdroji, značně dražší než energie mechanických zdrojů ultrazvuku. Značně vyšší jsou také pořizovací náklady na elektromechanické zdroje a mimo to vyžadují tyto zdroje vysoce kvalifikovanou obsluhu.

Přesto mají elektromechanické zdroje ultrazvuku řadu předností. Umožňují získání ultrazvuků velmi vysokých frekvencí (což se dosud u mechanických zdrojů nepodařilo), jsou stabilnější a mohou mít velmi malé rozměry (několik milimetrů). Kromě toho nemají točivé části, nepotřebují proud kapaliny nebo stlačeného vzduchu a jsou proto přizpůsobivější a jejich obsluha je pohodlnější.

Elektromechanické zdroje ultrazvuku je možno rozdělit na tři skupiny: elektrodynamické, magnetostrikční a piezoelektrické (elektrostrikční). Rozdíl mezi jednotlivými skupinami je jednak v principu činnosti, jednak ve frekvenčních pásmech. Elektrodynamické zdroje pracují do 30 tisíc Hz, magnetostrikční od 5 do 150 tisíc Hz a piezoelektrické od 100 tisíc Hz výše.

Princip elektrodynamických zdrojů je též jako princip reproduktorů. Liší se jen vzhledem pro lepší vysílání vysokých frekvencí na účet vysílání nízkých zvukových frekvencí. Ve frekvenčním pásmu od 5 do 30 tisíc Hz se dosahuje intenzita 1–2 W/cm² při účinnosti 30 %.

Pro laboratorní účely a průmyslový výzkum se nejčastěji používá magnetostrikčních a piezoelektrických zdrojů. Mechanismus jejich činnosti je v mnohém podobný, přestože je určen úplně odlišnými fyzikálními procesy.

Magnetostrikce podobně jako elektrostrikce je fyzikální zjev, při kterém se rozměry některých látek mění, působí-li na ně magnetické nebo elektrické pole. Změny rozměrů přesně a rychle sledují změny velikosti pole. Mění-li se pole s určitou frekvencí, pak s touž frekvencí se mění rozměr tělesa, vloženého do tohoto pole. Kmitá-li pole frekvencí slyšitelných zvuků, kmitá těleso touto frekvencí a vydává slyšitelný zvuk, mění-li se pole ultrazvukovým kmitočtem, získáme ultrazvukové kmitý.

Nejlepším materiálem pro magnetostrikční zdroje je nikl, nerezavějící ocel a některé slitiny, jako na př. permalloy a pod. Pro piezoelektrické zdroje se nejčastěji užívá křemen, zřídka fosfát amoniaku. V poslední době se v SSSR začíná stále více používat nový piezoelektrický materiál, zhotovený sovětskými vědci — keramika titanatu barya.

Magnetostrikční zdroje jsou nejčastěji plná nebo dutá jádra, na kterých je vinutí, protékané střídavým proudem vysoké frekvence. K získání silných magnetických polí a velkých zvukových výkonů je třeba značně velkého proudu při poměrně malém napětí. Často se pro zmenšení vířivých ztrát skládá jádro z tenkých, navzájem izolovaných plechtů, podobně jako u transformátoru. Intenzita zvuku, kterou je možno získat magnetostrikčním generátorem, dosahuje několika desítek wattů na čtvereční centimetr při účinnosti 50—60 %.

Jedinými zdroji ultrazvukových kmitů nejvyšších frekvencí jsou křemenné krystaly. Nejčastěji se používá destičky, vyříznuté určitým způsobem z krystalu, na jejíž obou stranách jsou tenké kovové povlaky (elektrody). Na elektrody se přivádí střídavé napětí potřebné frekvence.

Piezoelektrický krystal vyžaduje na rozdíl od magnetostrikčních zdrojů velkých napětí při malých proudech. Ve výkonných zdrojích dosahují přiložená napětí tisíců až desítky tisíců voltů. Jedna nebo obě kovové elektrody se přímo stýkají s prostředím (nejčastěji s kapalinou), ve kterém mají být vyvolány ultrazvukové kmity. Intenzita takto získaných ultrazvuků může dosáhnout několika desítek wattů na čtvereční centimetr.

Velké čisté krystaly křemene se často nevyskytují, a proto se v praxi používá destiček průměru 3—5 cm (destičky větších rozměrů jsou neúměrně drahé). Nevýhoda je při tom ta, že tímto způsobem dosažený celkový výkon je malý. Jeho velikost je totiž omezena plochou křemenné destičky. Často se pro zvětšení pracovní plochy používá t. zv. křemenné mosaiky, složené z velkého počtu křemenných destiček, přesně zabroušených a přiložených k sobě a tvořících tak společnou vysílací plochu.

Titanat barya je syntetický materiál, jehož výhodou proti křemennému krystalu je, že může být vyroben v libovolné velikosti a dále, že pro získání stejného výsledku jako při použití křemene, stačí značně menší pracovní napětí. Jediným jeho nedostatkem je značný ohřev následkem poměrně velkých mechanických a dielektrických ztrát. Ohřev omezuje intenzitu získaného zvuku. Omezení a případné odstranění těchto nepříznivých vlastností je nyní úkolem fyziků a inženýrů.

Často je třeba získat mnohem vyšší intenzitu ultrazvuku, než kterou je schopna vydat jednotka plochy zdroje. Na příklad jevy, jejichž podmínkou vzniku je kavitace, vyžadují intenzity 5—7 W/cm². Tuto intenzitu ultrazvuku je možno získat, použijeme-li titanatu barya, avšak i pro tento materiál je to již mezní hodnota. Byly také zkonstruovány zdroje s umělým chlazením, jimiž bylo možno dosáhnout poněkud větší intenzity, jsou však velmi složité. Kromě toho kavitace, která vzniká především na rozhraních dvou prostředí, a tedy na povrchu zdroje, rozrušuje při velkých intenzitách zvuku rychle zdroj. Aby byl tento nedostatek odstraněn, je lépe získávat ultrazvuk o velké intenzitě jen v pracovním prostředí. Toho je možno dosáhnout fokusací.

Kromě fokusace dutými zrcadly nebo zvukovými čočkami je možno použít k fokusaci zdrojů ve tvaru části koule nebo válce. Zvukové vlny, vysílané křivým povrchem, se budou soustřeďovat v blízkosti středu koule v ohniskové skvrně, nebo analogicky v blízkosti osy válce v ohniskovém pásu. Tímto způsobem se snadno dosáhne dvaceti až padesátinásobného zesílení intenzity. Vhodnou volbou rozměrů a tvaru zdroje je možno získat takové zvukové pole, v němž kavitace vzniká jen v ohniskové oblasti, zatím co na povrchu zdroje samého a v obklopujícím ho prostředí kavitace nenastává. Povrch zdroje není pak rozrušován

kavitačními bublinami a v prostředí, přenášejícím energii, nevznikají přídavné ztráty následkem kavitace.

Kulovými fokusačními zdroji se dosahuje velké koncentrace zvukové energie na menší ploše. Používají se proto v případě, kdy předmět, který působí ultrazvuk, má malé rozměry a nepohybuje se během dopadu ultrazvukových vln. Válcové zdroje dávají menší koncentrace zvukové energie, ale jejich ohnisková oblast má tvar pásu, jehož délka je rovna délce válcového segmentu. Tyto zdroje jsou vhodné tehdy, má-li na předmět působit ultrazvukový tok. Opracovávaný předmět se pohybuje podél ohniskové oblasti válcového segmentu. Není-li pracovní proces za dobu průchodu skončen, pak se za prvním zdrojem umístí další. Těchto soustav se používá zvláště při ultrazvukovém čištění a odmašťování drobných předmětů.

Ponevadž pro fokusaci je třeba vysoké frekvence, nehodí se pro ni magnetrostrikční zdroje. Většinou se používá zdrojů z titanatu barya, které jsou levné a mohou být provedeny v libovolném tvaru a velikosti. Teplo, které vzniká následkem velkých ztrát v těchto zdrojích, se obvykle používá k ohřevu pracovní lázně na potřebnou teplotu.

V případě, že má ultrazvuk působit na velká množství kapalin, je vhodnější použít zdroje ve tvaru trubek z titanatu barya, kterými protéká příslušná kapalina.

Použití ultrazvuku v technice je tak rozmanité, že není možno v rámci jednoho článku probrat podrobně všechny oblasti. Zmíníme se tedy o nejzajímavějších a nejaktuálnějších případech.

V podstatě je možno rozdělit všechny oblasti použití ultrazvuku na dvě skupiny: k první skupině patří ty oblasti, v nichž je ultrazvuk prostředkem pozorování, měření nebo kontroly; ke druhé skupině patří ty oblasti použití, v nichž ultrazvuk aktivně působí na opracovávané předměty nebo na průběh technologického procesu. Zatím co v oblastech, patřících do první skupiny, se ultrazvuku již široce používá, v oblastech, patřících do druhé skupiny, se ultrazvuk teprve začíná používat. Důležitá je také ekonomická stránka věci. V ultrazvukových zařízeních pro kontrolu se používá zdrojů malého výkonu, v technologických zařízeních zdrojů o výkonu několika kW.

Jak již bylo uvedeno, je výroba ultrazvuku dnes stále ještě příliš drahá. Je to způsobeno tím, že pořizovací i provozní náklady jsou příliš vysoké. Tato okolnost samozřejmě značně omezuje používání ultrazvukových metod v technologii. Použití ultrazvuku je vhodné tehdy, když náklady na sám technologický proces jsou velké, takže použitím ultrazvuku cena technologického pochodu příliš nevzroste, nebo když je cena opracovávaného předmětu velká.

Okolnost, že pomocí ultrazvuku může být dosaženo výsledků, kterých jinými prostředky dosáhnout nelze, není vždy kritériem rentability použití ultrazvukových metod. Dnes se na př. ultrazvuku používá v pivovarnictví k intenzifikaci vyluhování kvasného fermentu z chmelu. Přitom se ušetří 15—20 % chmelu, a proto přes velké množství zpracovávaného produktu a poměrně malou cenu piva je použití ultrazvuku zcela vhodné a účelné. Úspory takto získané brzy převýší náklady na zařízení a provoz.

Na rozdíl od toho na př. použití ultrazvuku pro extrakci aromatických látek z kávy, přes její výbornou jakost, je nevhodné pro příliš vysokou cenu zařízení. Je zřejmé, že s rozvojem techniky tvoření ultrazvuku se bude značně rozšiřovat oblast jeho použití.

Ultrazvuku se používá také k měření vzdáleností a k vyhledávání překážek. Po prvé v historii bylo ultrazvuku použito k vyhledávání velkých ledových ker v moři, které jsou velkým nebezpečím pro plující loď. Metoda vyhledávání ledovců je založena na principu ozvěny, t. j. odrazu zvukové vlny od překážek. Ze známé rychlosti zvuku ve vodě a z času, za který zvuk dorazí k překážce a zpět, lze snadno určit vzdálenost překážky.

Na stejném principu je založena metoda měření hloubky moře. Měření je velmi rychlé (rychlost zvuku v mořské vodě je asi 1500 m/sec, takže i pro měření největších dosud známých hloubek 8—10 km stačí doba 11—14 vteřin) a dosti přesné.

Dříve se k těmto měřením používalo slyšitelného zvuku. Protože se však slyšitelný zvuk šíří všemi směry, byly výsledky skreslené. Zvuk se totiž mohl odrazit dříve od nějaké náhodné překážky, na příklad blízké skály pod hladinou, než od mořského dna nebo hledané překážky. Použitím ultrazvuku byly tyto nevýhody odstraněny. Pomocí usměrněných zvukových paprsků je možno určit nejen vzdálenost překážky, ale i její polohu. Ultrazvukové přístroje na měření hloubek dávají spolehlivé a přesné výsledky.

Existují také universální přístroje, které mohou vyslat zvukový paprsek pod libovolným úhlem k horizontu. Ultrazvukové přístroje našly široké uplatnění v průmyslovém rybolovu, protože zvuková vlna se odráží i od shluku ryb.

Nedávno bylo zjištěno, že dobrá orientační schopnost netopýrů ve tmě vyplývá z toho, že mají orgán, pracující na principu ultrazvukového lokátoru. Netopýři při letu stále vysílají hrтанem impulsy ultrazvukových frekvencí a zachycují ušima jejich ozvěnu. Podobný lokátor mají též ptáci, žijící v temných jeskyních v Latinské Americe, domorodci nazývaní »gvačaro« (gvacharo, lelek jeskynní).

V poslední době se dělají pokusy o zhotovení miniaturního lokátoru pro slepce na tomto principu. Takový přístroj se skládá z ultrazvukového zdroje a přijímače, který se nosí v ruce. Skříňku s baterií je možno nosit na pásku nebo v kapse. Odražené signály se zachycují telefonem. Tímto způsobem je slepec upozorněn na překážku ve vzdálenosti do 10 m.

Principu ozvěny se s úspěchem používá k hledání různých vnitřních vad v předmětech.

Pro rozvoj soudobé techniky má neobyčejně velký význam pevnost kovových součástí. Pevnost materiálu může být značně snížena malou, pouhým okem nerozeznatelnou trhlinou, vzniklou na příklad při válcování, nebo lunkrem, vzniklým při odlévání.

Existuje mnoho způsobů hledání vnitřních vad materiálu (defektoskopie), ale většina z nich má podstatné nedostatky.

Jedním z nejuniversálnějších prostředků defektoskopie je ultrazvuk, jehož použití bylo po prvé navrženo prof. S. J. Sokolovem již v roce 1927. Svými dalšími pracemi přispěli sovětští vědci a inženýři S. J. Sokolov, A. S. Matvejev, V. S. Sokolov, D. S. Šrajber a další k rozvoji a zdokonalení method ultrazvukové defektoskopie.

Mezi různými methodami ultrazvukové defektoskopie je nejvíce rozšířena metoda, založená na vyhledávání nestejnorodostí materiálu použitím ozvěny.

Šíření a odraz zvukových impulsů v ingotu, obsahujícím lunkr, probíhá stejně jako při hledání ledovců, jen v měřítku mnohokrát menším. K vyšetřovanému předmětu se přiloží dvě hlavice — v jedné je vysílací a v druhé přijímací ultrazvukové zařízení. Nejsou-li v odlitku lunkry, odráží se zvukový signál od protěj-

šího okraje odlitku a vrátí se zpět. Jsou-li v cestě zvukové paprsky lunkry nebo jakákoli jiná nehomogenita, zachytí přijímací zařízení nejdříve zvuk odražený od této nehomogenity a potom zvuk odražený od protějšího okraje detailu. Indikátorem ultrazvukového defektoskopu je katodová trubice.

Citlivost ultrazvukového defektoskopu a jeho průrazná schopnost je neobyčejně veliká. Může jím být objevena dutina (lunkr) o rozměrech několika milimetrů v ingotu o tloušťce několika metrů. Přístroj má poměrně malé rozměry, je přenosný a napájí se ze střídavé sítě. Obvyklá pracovní frekvence těchto defektoskopů je 500—5000 Hz.

Kromě impulsových defektoskopů se používá t. zv. stínových defektoskopů, v nichž se soudí na přítomnost nebo nepřítomnost vady v materiálu podle průchodu ultrazvukového paprsku vyšetřovanou součástí. Pracují obvykle nepřetržitě, což značně zjednodušuje jejich konstrukci. Nejvíce se jich používá ke kontrole tenkých listových součástí, k stanovení správnosti profilů součástí, ke kontrole jakosti svarů, jakosti komposice ložisek atd.

Použití stínových defektoskopů při kontrole automobilových pneumatik umožňuje na příklad stanovit rozvrstvení materiálu mezi protektorem a kordem. Kontrolovaná pneumatika se ponoří do nádoby s kapalinou, obvykle vodou. Na vnitřní stranu pneumatiky se položí zdroj zvuku, na vnější stranu přijímač. Je-li příslušné místo pneumatiky bez kazu, projde zvukový signál bez překážky a je zachycen přijímačem na druhé straně. Je-li však v pneumatice dutina, vyplněná vzduchem, pak v důsledku úplného odrazu zvuku na hranici gumy a vzduchu je bublina nepropustná. Podle stupně zeslabení signálu, zachyceného přijímačem, lze soudit na přítomnost vady a její velikost.

Podobný typ defektoskopu může být použit ke kontrole dutin a trhlin v betonu a železobetonu. Přístroje pro vyhledávání vad o velikosti 8—10 cm² pracují se širokým paprskem a tedy s poměrně nízkou frekvencí 50 kHz.

Drsný povrch betonu je na závodu dobrému styku se zdrojem a přijímačem zvuku. Proto se přijímač a zdroj vkládají do měkkých gumových »vaků«, naplněných kapalinou. Gumová membrána přilehne dobře k povrchu betonu a umožní dobrý přechod zvukového signálu.

Ultrazvuku může být s úspěchem použito k měření rychlosti průtoku kapaliny nebo plynu. K tomu účelu se umístí do proudu kapaliny nebo plynu dva ultrazvukové vibrátory v nějaké vzdálenosti od sebe ve směru průtoku. Jedním vibrátorem vyšleme krátký ultrazvukový impuls a přijmeme jej druhým za čas t_1 , potřebný k proběhnutí dráhy l rychlostí, která je v případě šíření zvuku ve směru průtoku rovna rychlosti zvuku v daném prostředí c a rychlosti průtoku v . Potom

je $t_1 = \frac{l}{c+v}$. Vyšleme-li impuls druhým vibrátorem, takže se zvuk šíří proti směru průtoku, urazí dráhu l za dobu t_2 rychlostí, rovnou rozdílu rychlostí zvuku

v daném prostředí a rychlosti průtoku v . Pak je $t_2 = \frac{l}{c-v}$. Ze změřené doby

t_1 a t_2 a známé vzdálenosti l je možno z uvedených dvou rovnic určit hledanou rychlost průtoku v . Důležité je, že výsledek měření nezávisí na rychlosti zvuku c , která se může měnit v závislosti na teplotě, koncentraci kapaliny nebo plynu a na jiných okolnostech, které vždy nelze zahrnout do přesných výpočtů.

Velký tlak, který vzniká při zániku kavitačních bublinek, může být využit k drcení a rozměňování různých látek.

Při barvení tkanin má důležitou úlohu velikost částic pigmentu barvicího roz-

toku. Čím jsou tyto částice menší, tím jasnější a sytější barvy dostáváme při menší koncentraci roztoku. Velikost částic obvyklého barviva se pohybuje v dosti širokých mezích, 51,6 % částic je menších než 1 mikron a 30,2 % větších než 20 mikronů. Po zpracování barviva ultrazvukem se částičky značně zmenšují a struktura barviva se stává homogennější. Podobným způsobem lze rozmělnovat na prášek kovy, keramické látky a jiné materiály.

Na drtícím účinku ultrazvuku vysoké frekvence je také založeno ultrazvukové spájení hliníku. Je známo, že hliník lze velmi těžko spájet obvyklými metodami. Příčina je v tom, že hliník se na vzduchu oksyduje a pokrývá se vrstvou kyslíčnicku chemicky velmi stálou, která je překážkou styku materiálu s tekutou pájkou. Ultrazvuk umožňuje strhnout vrstvu kyslíčnicku pomocí tlaku, který vzniká při zániku kavitačních bublinek. Frekvence používaného ultrazvuku leží v mezích 20—30 kHz. Cena pájení hliníku ultrazvukem je jen málo vyšší než cena pájení ostatních materiálů. Výhody získané možností spájet hliníkové součásti jsou mimořádně veliké.

Podobným způsobem je možno cínovat hliníkové součásti. Hliníkový předmět se vloží do vany s cínovou lázní, v níž se vzbudí ultrazvukové kmity. V lázni dochází ke kavitaci, která odstraňuje kyslíčnickovou vrstvu na povrchu součásti. Očištěný povrch součásti tak přichází do styku s lázní a cínuje se. Pocínovanou součást je možno pájet obyčejným způsobem. Pro cínování se používá ultrazvuku o frekvenci 20—30 kHz.

Pro pájení a cínování hliníku se obvykle používá magnetostrikčních zdrojů ultrazvuku, což je dáno jednak potřebnými frekvencemi, jednak vysokými teplotami při pájení.

Stejným způsobem jako hliník lze spájet a pocínovat nerezavějící ocel, wolfram a jiné kovy.

Zajímavou oblastí průmyslového použití ultrazvuku je opracování křehkých tvrdých materiálů, jako je na př. sklo, porcelán nebo keramika. K magnetostrikčnímu zdroji je pomocí konického koncentrátoru ultrazvuku připojeno miniaturní dláto s profilem, který má mít otvor v materiálu. Opracovávaný povrch se omočí emulzí brusného prášku ve vodě nebo v oleji. Přiblíží-li se ostří dláta k povrchu materiálu, pak částice brusného prášku, které jsou mezi dlátem a povrchem předmětu, udeří do opracovávaného materiálu a vyrážejí z něho drobné pilinky. Protože částic prášku je velmi mnoho a frekvence úderů odpovídá frekvenci ultrazvuku (20—30 kHz), je opracování velmi rychlé. Na příklad čtvercový otvor 6×6 mm o hloubce 6 mm ve skle je tímto způsobem proveden asi za minutu. Výhodou je při tom to, že může být zhotoven otvor libovolného tvaru. Pomocí ultrazvuku mohou být opracovány také drahé kameny, křemen, tvrdé slitiny, keramické plátky pro obráběcí nože, karbid wolframu, t. j. materiály velmi tvrdé a křehké.

Jako brusného prášku se používá prášku korundu nebo karbidu. Při menších částicích prášku je rychlost obrobení menší, ale je větší frekvence úderů. Dnes se používá přístrojů o frekvenci 25 kHz, s výchytkou dláta 10—100 mikronů a vibrátorem o výkonu 150 wattů. Příkon vysokofrekvenčního elektrického generátoru ze sítě je 1 kW a výstupní výkon kolem 400 wattů.

Nejvýhodněji lze použít tohoto způsobu obrábění pro zhotovení potřebného tvaru řezných nástrojů z tvrdých slitin nebo keramiky, pro opracování a vrtání otvorů v rubínech, safírech a achátech, používaných v ložiskách hodin a jiných mechanismů, pro výrobu velmi přesných miniaturních izolátorů pro elektrova-kuové přístroje.

Velkou předností této metody opracování materiálu je také to, že na rozdíl od ostatních metod obrábění (kromě elektroerosivního) není materiál podroben mechanickému namáhání ani teplotním deformacím, a proto si plně zachovává původní strukturu.

V poslední době byly zhotoveny také zubolékařské vrtačky, pracující na popsáném principu. Tyto vrtačky pracují rychle a dobře a působí mnohem menší bolestí.

Pomocí ultrazvuku je možno odstranit povlak s povrchu různých materiálů (podobně jako bylo uvedeno u hliníku). To má velký význam zvláště u drobných součástí složitého tvaru, jejichž čištění jinými způsoby je obtížné a někdy zcela nemožné. Jsou to na příklad součástí hodinových mechanismů — ozubená kolečka, ložiskové kameny a jiné.

Použití ultrazvuku k čištění součástí hodinек umožňuje mechanisaci této složité operace při seriovém opracování a potřebném stupni čistoty. Zařízení používaná ve Švýcarsku při výrobě hodinек pracují s frekvencí 300 kHz při intenzitě 5 W/cm². Křemenná destička vysílá ultrazvuk do oleje, který má stále optimální teplotu 50° C. Nad destičkou je nádoba, do níž se vkládají čištěné součásti. Dno nádoby tvoří stříbrná folie, prostupná pro ultrazvuk. Jako omývací kapaliny se používá lihu, čistého benzínu nebo trichlorethylenu. Očištěné součásti se suší infračervenými paprsky.

Firma »Detrex« v USA používá k čištění součástí zařízení jiného principu. Ultrazvukové kmity se budí zdroji z titanatu barya ve tvaru válcového segmentu. V ose segmentu se pohybuje pás, na němž jsou uloženy čištěné součásti. K napájení čtyř zdrojů ultrazvuku, zařazených za sebou, je třeba vysokofrekvenční příkon 2 kW. Proces čištění probíhá při teplotě 60° C. Rychlost pohybu součástí je 30 cm/min.

Ve srovnání s ručním čištěním znamená použití ultrazvuku zlepšení jakosti čištění a zohospodárnění. Vlastní náklady se snižují na 50 % a ušetří se při tom $\frac{2}{3}$ pracovní plochy.

Důležitou oblastí použití ultrazvuku je čištění součástí elektrovakuových přístrojů. Ruční čištění vnitřního povrchu trubic malé světlosti bylo velmi obtížné. Použití ultrazvukového čištění k tomuto účelu zvyšuje produktivitu práce.

Vysoká cena ultrazvuku dosud brání jeho použití k čištění velkých ploch.

Působením ultrazvuku na kapaliny, které se spolu nemísí, je možno získat kvalitní emulze, t. j. dosáhnout rozptýlení drobných kapiček jedné kapaliny v druhé. Emulze se používají v nejrůznějších odvětvích techniky.

Emulze získané pomocí ultrazvuku jsou velmi stálé, protože kapičky jsou velmi drobné a všechny stejně velké. Mohou se proto uchovávat po delší dobu.

K výrobě emulzí pomocí ultrazvuku je výhodné použít dříve popsané kapalinové píšťaly. Do nádoby, v níž se připravuje emulze, se naleje jedna z kapalin a druhá se žene pod tlakem píšťalou. Tak je možno získat na př. 50 l emulze oleje ve vodě za dobu kratší než minuta.

Kromě výroby obvyklých emulzí se tohoto způsobu používá na př. ve Švédsku k získání emulze kaka a při výrobě čokolády. V Japonsku se používá ultrazvuku k získání emulzí, na jejichž základě se vyrábí vysoce kvalitní krém na obuv.

Ultrazvukové kmity urychlují difusní pochody, kterých se ve velké míře používá v chemické technologii. Na příklad vydělávání kůže je při normálním způsobu práce velmi zdoluhavé. Použitím ultrazvuku se pochod mnohonásobně zrychlí.

Působením ultrazvuku se zintensivňuje barvení tkanin. Barvivo proniká hlou-

bějí do látky a pevněji v ní drží. Dnes se ultrazvuku používá při barvení některých druhů umělých vláken, jejichž barvení obyčejným způsobem je obtížné.

Ultrazvukem je možno také urychlit praní látek. Zde se uplatňuje současně s urychlením difusního pochodu také mechanické působení kavitace.

Na překážku širokému rozvoji ultrazvukových method v tomto oboru je opět příliš vysoká cena ultrazvukové energie. Při rozhodování je vždy nutno uvážit, zda náklady na ultrazvukové zařízení budou plně vyváženy získanými výhodami.

Drobné částičky tuhých látek, rozptýlené v plynném prostředí, se pro svou lehkost neusazují, ale udržují se ve vznosu. Čím menší je částice, tím déle se udrží. Působením ultrazvuku se drobné částičky shlukují ve větší celky a mohou být zachyceny nějakým známým způsobem. Mechanismus působení ultrazvuku na tyto drobné částice v plynu není dosud vysvětlen, ale ultrazvuku se již používá k čištění dýmu průmyslových závodů. Čištění dýmu je důležité nejen proto, že se zamezuje znečištění ovzduší, ale hlavně proto, že dým často obsahuje mnoho látek, které mohou být dále zužitkovány. Při čištění dýmu se používají ultrazvukové sirény, umístěné na konci komínů.

Ultrazvuku se dále také používá k odstranění plynových bublinek z roztaveného skla nebo kovu. Bublínky mohou v řadě případů znehodnotit sklo. Bublínky, které zůstanou ve zchlazeném kovu, snižují jeho pevnost. Ultrazvuk působí zvětšování bublinek, takže snáze uniknou z roztavené skelné nebo kovové lázně.

Při použití tohoto způsobu působí těžkosti přechod ultrazvuku do taveniny mající vysokou teplotu. Protože se dosud nepodařilo tyto potíže odstranit, nerozšířilo se příliš použití ultrazvuku k odplyňování tavenin.

Cena ultrazvukové energie, jednoduchost a spolehlivost generátorů ultrazvuku a jejich provozní kvalita závisí podstatně na typu generátoru. V tomto ohledu jsou nejlepší mechanické generátory — kapalinová píšťala a vzduchová siréna. Jejich použití je omezeno frekvencí vyráběného zvuku a jeho výkonem. Kapalinová píšťala dává zvuk o výkonu několik desítek wattů a o frekvencích od 4 do 30 tisíc Hz. Hodí se proto pro výrobu emulsí (způsob práce takového zařízení byl popsán již dříve). Ultrazvukové zařízení pracuje jednoduše, spolehlivě a produktivně. Proto se používání ultrazvuku k výrobě emulsí hodně rozšířilo.

Stejně se uplatnil ultrazvuk při čištění dýmu, kde se používá ultrazvukových sirén.

Dosud nebyl zhotoven generátor tak jednoduchý a výkonný, jako je siréna, který by umožnil vyluzení ultrazvukových kmitů v kapalině. Proto se k tomuto účelu používá poměrně drahých a složitých elektromechanických zdrojů. Použití ultrazvuku se v těch případech vždy nevyplatí. Je výhodné v těch případech, kdy jde o malá množství poměrně drahých materiálů (na př. disperse barviv, urychlování difusních pochodů atd.) nebo o opracování složitých součástí malých rozměrů (čištění součástí hodin, vrtání miniaturních izolátorů, vrtání a obrábění drahých kamenů, broušení řezných nástrojů složitých tvarů). V ostatních případech je nutno úvahu o vhodnosti použití ultrazvuku doplnit zvláštními technicko-hospodářskými podklady.

Pokud se týká dalšího rozvoje průmyslového použití ultrazvuku, je možno říci, že se bude ubírat třemi hlavními směry:

1. vypracovávání nových levných a jednoduchých způsobů výroby ultrazvuku v kapalinách;
2. zkoumání mechanismu působení ultrazvuku na látky;
3. hledání nových možností použití ultrazvuku.

Zároveň s hľadáním nových možností použítí ultrazvuku je nutno se zabývat rozšířením již známých method. V poslední době bylo na příklad použito známé vlastnosti ultrazvuku — urychlování difusních pochodů — k urychlení impregnace tkaniny v kabelovém průmyslu, k urychlení máčení osiva v bakteroidních roztocích a pod. Jiným příkladem rozšíření známých method je použítí ultrazvuku v zubním lékařství.

Úspěšné provádění prací ve všech třech uvedených směrech vyžaduje dobré spolupráce fyziků, chemiků, biologů, technologů, konstruktérů a jiných pracovníků. Pro rychlý rozvoj všech prací je kromě toho potřeba vyrábět speciální ultrazvukové aparatury jak laboratorní, tak průmyslové. Dosud trvajícím stav, že ti, kteří chtěli ultrazvuku použít, byli nuceni si sami zhotovit potřebné zařízení, je brzdou dalšího rozvoje použítí ultrazvuku.

Pro rozšíření pokrokových ultrazvukových method v technice je vedle práce vědců a inženýrů, kteří vypracovávají a zároveň zkoumají možnosti použítí ultrazvuku v různých odvětvích národního hospodářství, potřeba spolupráce průmyslu, projevující se v používání a seriové výrobě ultrazvukových laboratorních a průmyslových zařízení.

Stanislav Kubík

PROF. E. L. ANDRONIKAŠVILI,
člen korespondent AN Gruz. SSR

TEKUTÉ HÉLIUM

Жидкий гелий

Priroda, 1954, č. 6, str. 13—23.

Hélium je veľmi vzácny prvok na zemi. Medzi inými prvkami nachádzajúcimi sa na našej planéte je jeho koncentrácia veľmi malá: na jeden atóm hélia pripadá 200 miliónov atómov iných látok. V zemskej atmosfére je ho viacej: na jeden atóm hélia pripadá na 200 tisíc iných atómov.

Tak ako u iných chemických prvkov môže byť hmota a zloženie héliového atómového jadra rôzne, len náboj jadra ostane nezmenený. Vo väčšine prípadov majú atómy hélia jadro zložené z dvoch protónov a dvoch neutrónov. Atómová váha takéhoto hélia je rovná štyrom. Súčasne existujú aj iné typy héliových jadier, lepšie povedané, iné izotopy hélia. Tak sa napr. vyskytujú atómové jadrá hélia s atómovou váhou rovnou trom, zložené z dvoch protónov a jedného neutrónu. Sú tiež atómové jadrá hélia, ktoré majú atómovú váhu rovnú šiestim, zložené z dvoch protónov a štyroch neutrónov. Rôzne izotopy hélia sa označujú He^3 , He^4 , He^6 .

V prírodných podmienkach tvorí izotop He^3 malú prísadu k atómom He^4 a jeho koncentrácia neprevyšuje jednu desiatistinu percenta. Izotop He^6 sa všeobecne v prírode nenachádza a získava sa iba umelou cestou.

Obyčajne sa pod slovom hélium rozumie plyn. Tento plyn je chemicky inertný a nevstupuje do žiadnych chemických reakcií.

Pokusy premeniť plynné hélium do tekutého stavu sa podnikali nie raz. Nakoniec v r. 1908 sa podarilo Holanďanovi Kamerlingh-Onnesovi zkvapalnenie hé-