



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE ULTRAZVUKOVÉHO OBRÁBĚNÍ

ULTRASONIC MACHINING TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAKUB KRAJČI

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jakub Krajčí

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Technologie ultrazvukového obrábění

v anglickém jazyce:

Ultrasonic machining technology

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provedení podrobného rozboru možností použití ultrazvukové technologie ve strojírenském průmyslu.

Cíle bakalářské práce:

Úvod.

Fyzikální princip ultrazvuku.

Nedestruktivní aplikace ultrazvuku.

Technologie ultrazvukového obrábění.

Stroje pro ultrazvukové obrábění.

Diskuze.

Závěr.

Seznam odborné literatury:

BARCAL, Jaroslav. Nekonenční metody obrábění. Skriptum FSI ČVUT. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1989.

MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie. 1. vydanie. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4.

KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. Technologie obrábění. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Karel Osička, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 22.11.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této práce je poskytnout čtenáři pohled na problematiku obrábění za pomoci ultrazvuku, seznámit ho s ultrazvukem a jeho fyzikálními vlastnostmi, popsat metody ultrazvukového obrábění, poohlédnutí se na nedestruktivní aplikace ultrazvuku a také na základě zjištěných informací vést diskuzi o této problematice a udělat krátký závěr.

Klíčová slova

ultrazvuk, ultrazvukové obrábění, nekonvenční metody obrábění, technologie obrábění

ABSTRACT

The main aim of the thesis is to provide information about ultrasonic machining, to introduce ultrasound and its physical properties, to describe ultrasonic machining methods and to show the non-destructive use of ultrasound. Furthermore I will hold a discussion about this topic and make a quick summary.

Key words

ultrasound, ultrasonic machining, unconventional methods of machining, machining technologies

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRAJČI, Jakub. *Technologie ultrazvukového obrábění*. Brno 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 68 s. Vedoucí práce Ing. Karel Osička, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Technologie ultrazvukového obrábění** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

24.5.2013

Datum

Jakub Krajčí

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Karlovi Osičkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat všem mým rodinným příslušníkům a přátelům, kteří mě podporovali při psaní této práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD	9
1 FYZIKÁLNÍ PRINCIP ULTRAZVUKU	10
1.1 Vznik ultrazvukových vln	10
1.2 Tvary a druhy akustických vln.....	11
1.2.1 Tvary vln.....	12
1.2.2 Druhy vln	12
1.3 Rychlost šíření ultrazvukových vln v prostředí	13
1.3.1 Rychlost šíření ultrazvuku	13
1.4 Vyzařování a šíření ultrazvukového vlnění v prostředí	14
1.4.1 Vyzařování ultrazvukového záření do prostředí	14
1.4.2 Přechod ultrazvukového vlnění na rozhraní dvou prostředí	15
1.4.3 Ohyb vlnění.....	17
1.4.4 Postupné a stojaté vlnění.....	18
1.5 Jevy spojené s aplikací ultrazvuku.....	19
1.5.1 Piezoelektrický jev.....	19
1.5.2 Dopplerův jev	20
1.5.3 Ultrazvuková kavitace	20
2 NEDESTRUKTIVNÍ APLIKACE ULTRAZVUKU.....	21
2.1 Nedestruktivní aplikace ultrazvuku v technologii	21
2.1.1 Indikace a měření výšky hladiny	21
2.1.2 Ultrazvuková defektoskopie	23
2.1.3 Měření průtoku	25
2.1.4 Měření tloušťky	27
2.1.5 Měření tvrdosti.....	29
2.1.6 Měření netěsností.....	29
2.1.7 Měření hustoty	30
2.2 Nedestruktivní aplikace ultrazvuku v medicíně.....	32
2.2.1 Sonografie	32
2.2.2 Dopplerovská ultrasonografie.....	34

2.3 Další nedestruktivní aplikace ultrazvuku.....	35
2.3.1 Bezdotykové ovládání.....	35
2.3.2 Sonar	36
Parkovací senzory	36
3 TECHNOLOGIE ULTRAZVUKOVÉHO OBRÁBĚNÍ	37
3.1 Fyzikální princip ultrazvukového obrábění abrazivní suspenzí.....	37
3.1.1 Technologické charakteristiky ultrazvukového obrábění abrazivní suspenzí	38
3.1.2 Nástroje pro ultrazvukové obrábění.....	43
3.1.3 Použití ultrazvukového obrábění abrazivní suspenzí.....	44
3.2 Ultrazvukové vrtání brousicími diamantovými nástroji	47
3.3 Ultrazvukové broušení	49
3.4 Ultrazvukové honování a superfinišování	50
3.5 Ultrazvukové čištění brousicího kotouče.....	52
3.6 Vliv ultrazvuku na procesy třískového obrábění	53
3.7 Ultrazvukové odstraňování otřepů – experiment SSSR.....	55
4 STROJE PRO ULTRAZVUKOVÉ OBRÁBĚNÍ	56
4.1 Obráběcí centrum DMG/MORI SEIKI ULTRASONIC 50	57
4.2 Ultrazvuková vrtačka LUD-200B.....	59
4.3 Ultrazvukový obráběcí přístroj SONIC–MIL Sinker A-10HCV	60
4.4 Ultrazvuková řezačka BELSON UCS – 001	61
DISKUZE	62
ZÁVĚR	63
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	64
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	67

ÚVOD

V dnešní době se ultrazvuk používá v mnoha různých aplikacích. Každý z nás se s některou setkal a ani o tom nemusí vědět. Ultrazvuk má pro lidi velké kouzlo, jedná se totiž o zvuk o vysoké frekvenci, z čehož by se mohlo zdát, že použití ultrazvuku musí být nepříjemné pro náš sluch, ale tato frekvence je natolik vysoká, že je pro lidský sluch neslyšitelná. Z toho plyne, že nedokážeme ultrazvuk na rovině slyšitelnosti vnímat. Proto se také některé aplikace ultrazvuku můžou jevit jako statické. V oboru strojírenské technologie má ultrazvuk podstatné zastoupení, sám o sobě toho moc ultrazvuk nezmůže, ale ve spojení s technologiemi je jeho přínos ryze pozitivní. Pomocí ultrazvuku lze zkoumat vnitřní vady materiálu, narušovat povrch materiálu a využít toho k čištění nebo obrábění, umožňuje nám efektivní svařování plastů. Díky jeho vysoké frekvenci, kterou lze převést na kmitavý pohyb můžeme zefektivnit konvenční metody obrábění apod.

Práce popisuje ultrazvuk, jako fyzikální veličinu, jejíž aplikace můžou být rozděleny na destruktivní a nedestruktivní. Nedestruktivních aplikací je celá řada, budou ukázány některé z nich, zejména ty, které se používají v technické praxi, ale i jiné, např. z oblasti medicíny. Příklad destruktivní aplikace se bude týkat ultrazvukového obrábění, které patří do nekonvenčních metod obrábění. Podrobně bude ukázáno, k čemu lze tuto metodu použít, jaké má své výhody a nevýhody. Práce taky popisuje některé obráběcí stroje, které využívají tuto technologii.

Závěrem bude osvětleno, proč není tato nekonvenční metoda tolik rozšířená a bude provedeno zhodnocení pro celkový přínos ultrazvuku.

1 FYZIKÁLNÍ PRINCIP ULTRAZVUKU

Všude kolem nás je vše v pohybu, člověk je vystavován různým vlivům, které může nebo nemusí vnímat. Jedním z takových vlivů je vlnění. Vyskytují se dva odlišné druhy vlnění, elektromagnetické a elastické vlnění. Elektromagnetické vlny se šíří i ve vakuu na rozdíl od elastických vln, které se šíří pouze v hmotném pružném prostředí. Šíření elastických vln je oproti elektromagnetickým vlnám spojeno s pružnými elastickými vlastnostmi daného prostředí. Mezi elastické vlnění patří akustické vlnění, které se vyskytuje v širokém rozmezí frekvencí, viz Tab. 1.

Tab. 1. Rozdělení akustických vln[1].

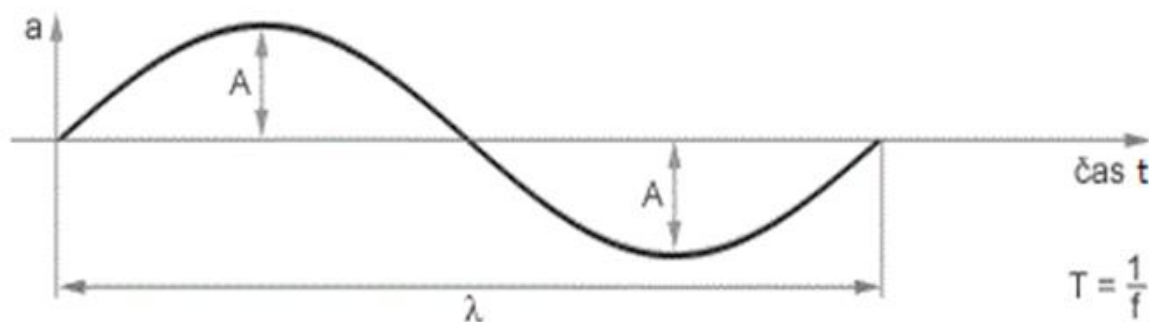
Akustické pásmo	Frekvence (Hz)
Infrazvuk	Pod 16
Slyšitelný zvuk	16 – 20 000
Ultrazvuk	20 000 – 10^9
Hyperzvuk	Nad 10^9

Ultrazvuk, jehož frekvence leží nad hranicí slyšitelnosti lidského ucha má stejné fyzikální vlastnosti jako zvuk, avšak pro lidské ucho je neslyšitelný. To ovšem neplatí pro některé živočichy (delfini, psi, netopýři), kteří dokážou větší nebo menší část ultrazvukového spektra vnímat [1].

1.1 Vznik ultrazvukových vln

V ultrazvukovém poli konají částice hmoty periodický kmitavý pohyb, který je generován zdrojem energie, např. ultrazvukovým zářičem. Můžeme uvažovat, že ultrazvukové vlny tvoří nekonečně mnoho oscilujících hmotných částic spojených např. elastickou pružinou. Každá z částic je ovlivněna pohybem sousední částice, což se na venek projevuje jako vlnový pohyb všech částic.

Kmitavý pohyb (viz obr 1.1) vyvoláme změnou rovnovážného stavu některé hmotné částice určitou silou. Pokud se kmitavý pohyb opakuje v čase s periodou T za podmínky, že nepřesáhne konečnou vzdálenost os své klidové polohy, potom tento pohyb označujeme jako periodický nebo harmonický [1].



Obr. 1.1 Kmitavý pohyb hmotného bodu s časovou závislostí na zrychlení a [3].

Převrácenou hodnotu periody T , nazýváme frekvencí f , výpočet dle vztahu (1).

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

kde: f [Hz] – frekvence,
 T [s] – perioda.

Během jednoho kmitu překoná vlnění vzdálenost, kterou nazýváme vlnovou délkou λ , výpočet dle vztahu (2).

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T \quad (2)$$

kde: λ [m] – vlnová délka,
 c [m.s⁻¹] – rychlost šíření vlnění v prostředí,
 f [Hz] – frekvence,
 T [s] – perioda.

Ve vzduchu se rychlost šíření vlnění v běžných podmínkách vypočítá dle vztahu (3).

$$c = 331,8 + 0,6 \cdot T \quad (3)$$

kde: c [m.s⁻¹] – rychlost šíření vlnění v prostředí,
 T [°C] – teplota vzduchu.

Standardizovaná hodnota 340 m.s⁻¹ odpovídá teplotě 13,6 °C. Pro představu je rychlost šíření vlnění ve vodě 1484 m.s⁻¹ a v oceli dokonce 5 000 m.s⁻¹[3].

1.2 Tvary a druhy akustických vln

Vlnění je charakterizováno šířením a přenosem energie bez přenosu hmoty. Rozdělujeme ho na dva hlavní druhy:

- podélné,
- příčné.

Pokud kmitají jednotlivé částice ve všech bodech prostředí ve stejném směru, ve kterém se vlnění šíří, mluvíme o podélném vlnění. Pokud však kmitají v kolmém směru na směr šíření vln, vzniká příčné vlnění. Existence těchto dvou vlnění je závislá na druhu prostředí. Podélné vlnění se vyskytuje u všech druhů prostředí, zatím co s příčným vlněním se můžeme setkat pouze u tuhých těles [1].

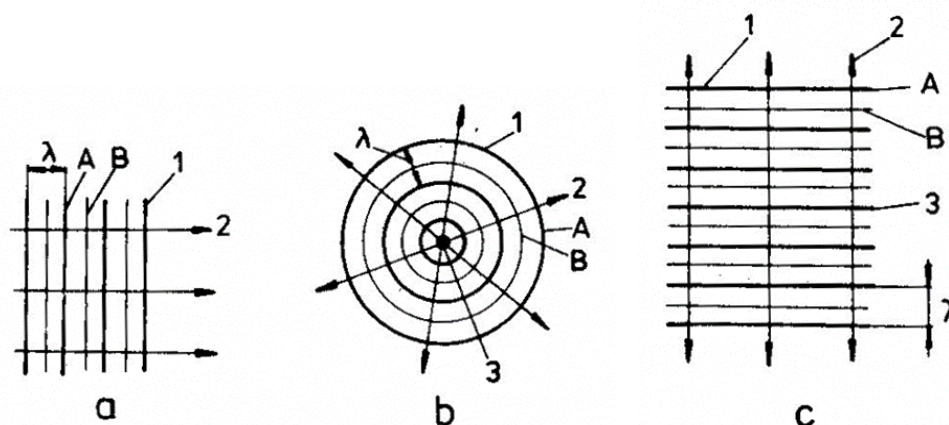
1.2.1 Tvary vln

Podle tvaru vyzařující plochy zdroje vlnění a způsobu šíření vln vznikají tři základní tvary vln (viz obrázek 1.2):

- rovinné,
- kulové,
- válcové.

Směry, kterými se šíří vlnění nazýváme paprsky. Vlnoplochy vytvářejí částice, které kmitají ve stejné fázi. V izotropickém prostředí jsou vlnoplochy kolmé na paprsky.

Pokud pro určitý časový okamžik nakreslíme vlnoplochy, tak v bodech, kde částice kmitají stejnou fází, vzdálenost vlnoploch se bude rovnat vlnové délce λ [1].



Obr. 1.2 Tvary vln: a – rovinná vlna, b – kulová vlna, c – válcová vlna,
1 – vlnoplocha, 2 – paprsek, 3 – zdroj vlnění,
A – místo zhuštění částic, B – místo zředění částic, λ – délka vlny [1].

1.2.2 Druhy vln

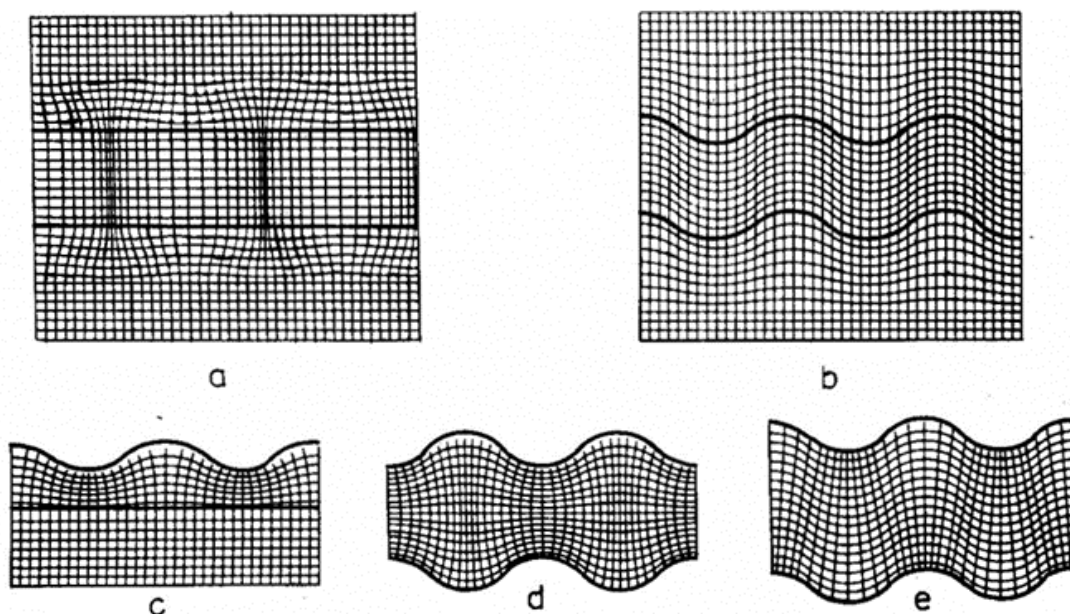
Pokud u podélných a příčných vln ohraničíme jeden nebo dva rozměry prostředí, ve kterém se vlny šíří, vznikají další typy ultrazvukových vln (viz obr. 1.3), čehož se využívá v ultrazvukové technice.

Na obr. 1.3a,b lze vidět podélné a příčné vlny se šíří v ohraničeném prostředí. Tyto vlny se využívají při aplikacích aktivního i pasivního ultrazvuku (ultrazvukové obrábění, ultrazvukové čištění, ultrazvuková defektoskopie a jiné).

Ohybové vlny, které vyvolávají namáhání v ohybu (obr. 1.3e), se šíří v prostředí ohraničeném v jednom nebo dvou rozměrech. Technické využití např. u čistících van; tyče s ohybovými vlnami se využívají při ultrazvukovém svařování kovových materiálů.

Radiální vlny (obr. 1.3d) se šíří v prostředí ohraničeném ve dvou rozměrech. Vznikají a šíří se v tyčích, válcích, trubkách a v kruhových deskách s konečným rozměrem.

Povrchové Rayleighovy vlny (obr. 1.3c). Jde o speciální případ příčných vln, které obsahují příčnou a podélnou složku. Pod povrchem však zaniká podélná složka rychleji než příčná [1].



Obr. 1.3 Druhy vln: a – podélná vlna, b – příčná vlna, c – povrchová vlna, d – objemově radiální vlna v tyči, symetrická desková vlna, e – ohybová vlna v tyči nebo desce, asymetrická desková vlna [1].

1.3 Rychlost šíření ultrazvukových vln v prostředí

Rychlost šíření v čistých plynech a kapalinách závisí na tlaku a hustotě prostředí, které se mění v závislosti na teplotě. Šíření ultrazvukového vlnění vyvolává periodické stlačování a ředění v prostředí, v kterém se šíří. V plynném a kapalném prostředí se díky malým mezimolekulárním vazebním silám šíří vlny pouze podélně. Při šíření ultrazvukového vlnění probíhá zhuštění a ředění plynů a kapalin tak rychle, že se přitom nestačí odevzdávat či přivádět teplo, tzn., že děje probíhají adiabaticky. Tuhé látky mají mnohem vyšší vazební síly mezi elementárními částicemi, a proto jsou schopny přenášet všechny druhy ultrazvukových vln. U anizotropních látek, např. krystaly (křemenu), závisí rychlost šíření na jejich orientaci. U izotropních amorfních látek, kde struktura mřížky je podobná té kapalně (sklo, vosk), a u polykrystalických látek (piezoelektrická keramika) sestávajících z náhodně orientovaných drobných krystalů, rychlost šíření ultrazvuku nezávisí na jejich směru [1].

1.3.1 Rychlost šíření ultrazvuku

– v plynech (4),

$$c = \sqrt{\chi \frac{p_a}{\rho}} \quad (4)$$

kde: c [m.s⁻¹] – rychlost šíření vlnění v prostředí,
 p_a [Pa] – celkový atmosférický tlak,
 χ [m⁻¹.kg.s⁻²] – Poissonova konstanta,
 ρ [kg.m⁻³] – hustota.

– **v kapalinách (5),**

$$c = \sqrt{\frac{1}{\beta_{ad}\rho}} = \sqrt{\chi \frac{1}{\beta_{iz}\rho}} \quad (5)$$

kde: c [m.s⁻¹] – rychlost šíření vlnění v prostředí,
 χ [m⁻¹.kg.s⁻²] – Poissonova konstanta,
 ρ [kg.m⁻³] – hustota,
 β_{ad} [Pa⁻¹] – adiabatický koeficient stlačitelnosti,
 β_{iz} [Pa⁻¹] – izotermický koeficient stlačitelnosti

– **v tuhých látkách,** vztah (6) pro rychlost šíření podélných vln v neohraničeném prostředí [1].

$$c_L = \sqrt{\frac{E_p}{\rho} \cdot \frac{1 - \mu}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}} \quad (6)$$

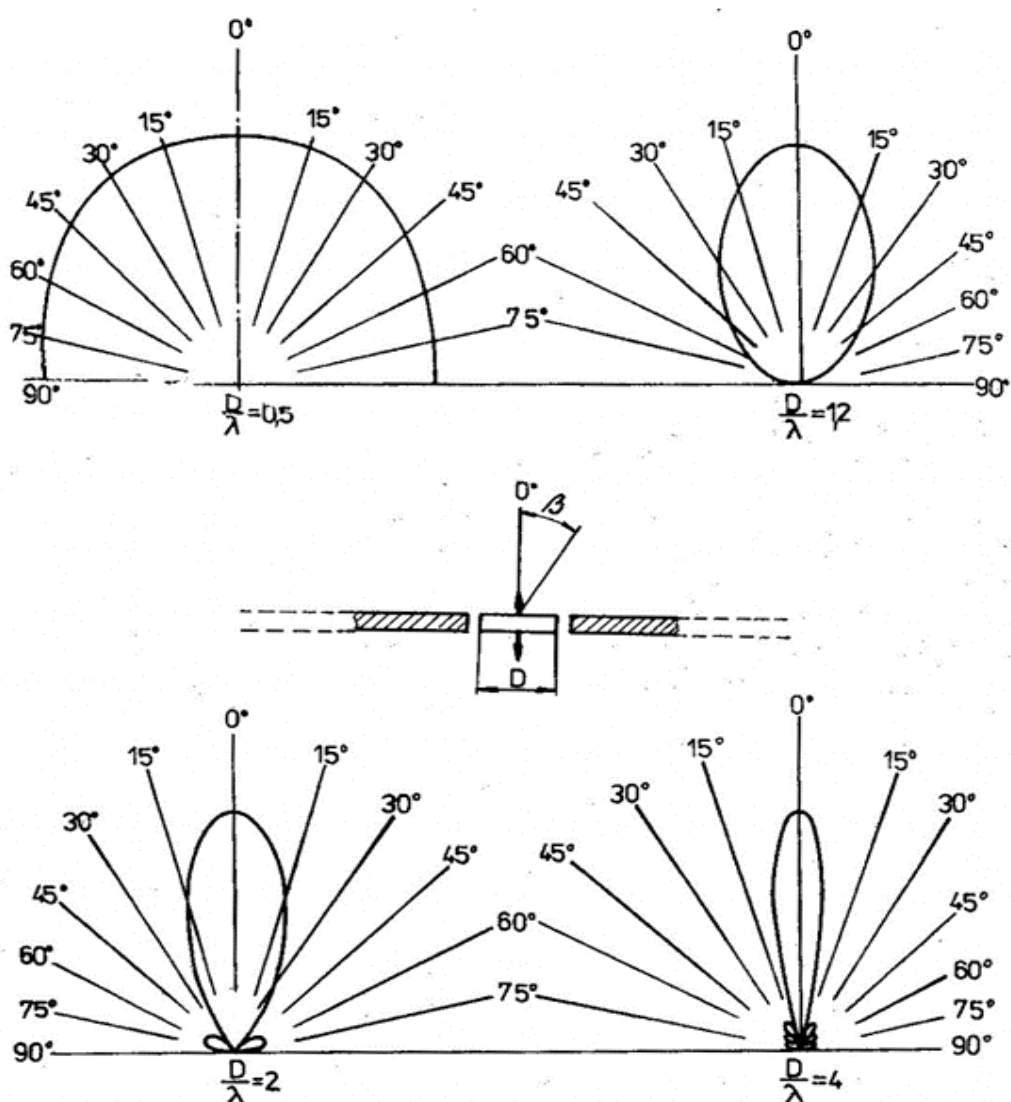
kde: c_L [m.s⁻¹] – rychlost šíření vlnění v prostředí,
 ρ [kg.m⁻³] – hustota,
 E_p [Pa] – modul pružnosti v tahu,
 μ [-] – Poissonovo číslo.

1.4 Vyzařování a šíření ultrazvukového vlnění v prostředí

Ultrazvukové vlny vyzařované ultrazvukovým zářičem se šíří v prostředí a vytvářejí v pracovním místě ultrazvukové pole. Výsledkem je vznik interferenčního pole, které je konstantní v čase, ale vykazuje výraznou prostorovou závislost jeho intenzity. Pokud postupují po stejné dráze dvě vlny se stejnou amplitudou, ale opačného znaménka (s fázovým posuvem 180°), a dojde k jejich střetu v jednom bodě, tak dochází k jejich vzájemnému vyrušení. V případě, ve kterém jsou amplitudy nebo fáze rozdílné, je výsledkem interference vlna, která může být menší nebo větší než původní složky [1].

1.4.1 Vyzařování ultrazvukového záření do prostředí

Na obr. 1.4 jsou znázorněny vyzařovací charakteristiky ultrazvukových měničů s kruhovou vyzařovací plochou o průměru D při různých poměrech D/λ . Charakteristika nemá rovinný, ale prostorový tvar, vytvořený plochou, která vznikne při rotaci zobrazené charakteristiky kolem své osy. Z obr. 1.4 je patrné, že při zvyšování D/λ se intenzita vlnění začíná soustřeďovat a zvětšovat ve směru osy [1].



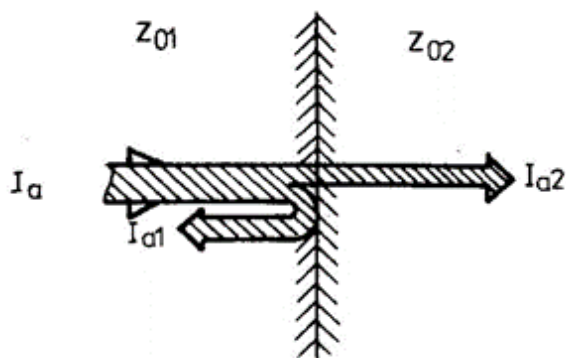
Obr. 1.4 Tvar vyzařovacích charakteristik ultrazvukového měniče v závislosti na jeho frekvenci [1].

1.4.2 Přejít ultrazvukového vlnění na rozhraní dvou prostředí

V praxi často nastává případ, kdy se ultrazvuková vlna šíří jedním prostředím a potom přechází do druhého prostředí, které má odlišný vlnový odpor. Na rozhraní dvou prostředí se část ultrazvukové energie odrazí zpět a druhá část přejde do dalšího prostředí. Pokud je plocha rozhraní dostatečně velká, můžeme na dopadající ultrazvukový paprsek aplikovat zákony odrazu a lomu. Při přechodu ultrazvukového paprsku přes rozhraní mohou nastat dva případy, a to kolmý nebo šikmý dopad ultrazvukového paprsku [1].

Kolmý dopad

Pokud je intenzita vlny I_a v prostředí s vlnovým odporem Z_{01} a I_{a2} je intenzita vlnění, které přešlo do druhého prostředí s vlnovým odporem Z_{02} , tak intenzita odrazeného vlnění bude (viz obr. 1.5).



Obr. 1.5 Kolmý dopad ultrazvukového vlnění [1].

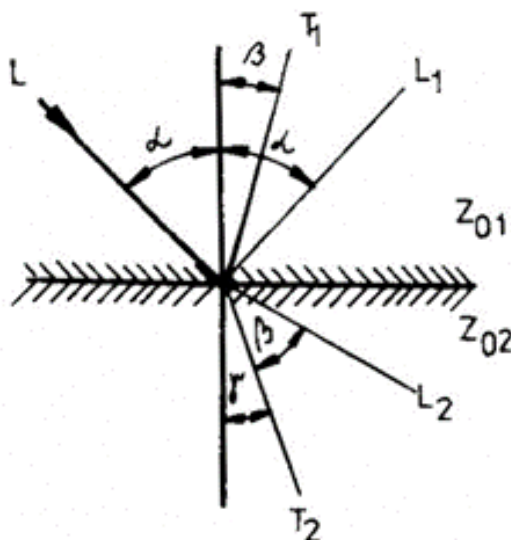
Poměr intenzity odražené vlny I_{a1} a intenzity vlny I_a dopadající kolmo na rozhraní dvou prostředí s vlnovými odpory Z_{01} Z_{02} , nazýváme koeficient odrazu R_o . Výpočet dle vztahu (7).

$$R_o = \frac{I_{a1}}{I_a} = \left(\frac{Z_{02} - Z_{01}}{Z_{02} + Z_{01}} \right)^2 \leq 1 \quad (7)$$

- kde: R_o [-] – koeficient odrazu,
 I_{a1} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] – intenzita odražené vlny,
 I_a [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] – intenzita dopadající vlny,
 Z_{01} [$\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$] – akustický vlnový odpor prostředí 1,
 Z_{02} [$\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$] – akustický vlnový odpor prostředí 2.

Šikmý dopad

Případ kdy podélné vlnění L dopadne na rozhraní dvou prostředí pod úhlem α (viz obr. 1.6).



Obr. 1.6 Lom podélné ultrazvukové vlny při šikmém dopadu na rozhraní dvou prostředí 1 a 2. L – podélná vlna, T – příčná vlna [1].

Část energie vlnění L1 se dorazí zpět do původního prostředí, přičemž úhel odrazu je stejný jako úhel dopadu. Další část vlnění L přejde do druhého prostředí, přičemž nezachovává svůj směr, láme se, a to směrem ke kolmici (nebo od kolmice) v závislosti na vlnových odporech obou prostředí (Z_{01} , Z_{02}). Z fyzikálních vlastností optiky platí (8) [1].

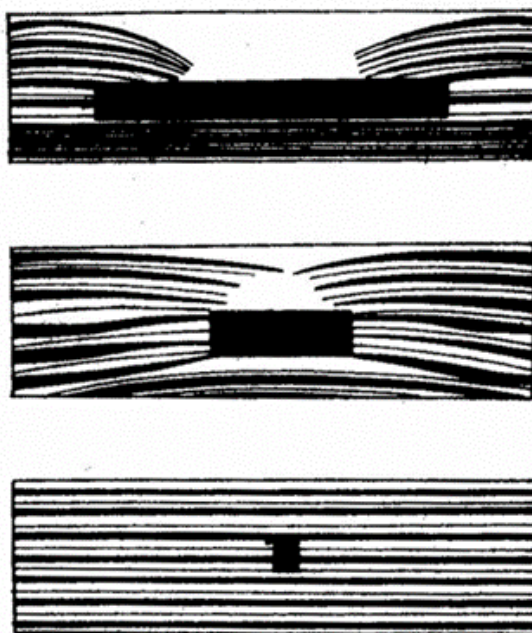
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} \quad (8)$$

kde: $c_{1,2}$ [m.s^{-1}] – rychlost šíření vlnění (zvuku) v prostředí 1 a 2.

K úplnému odrazu dochází, když platí $\frac{c_2}{c_1} \sin \alpha > 1$.

1.4.3 Ohyb vlnění

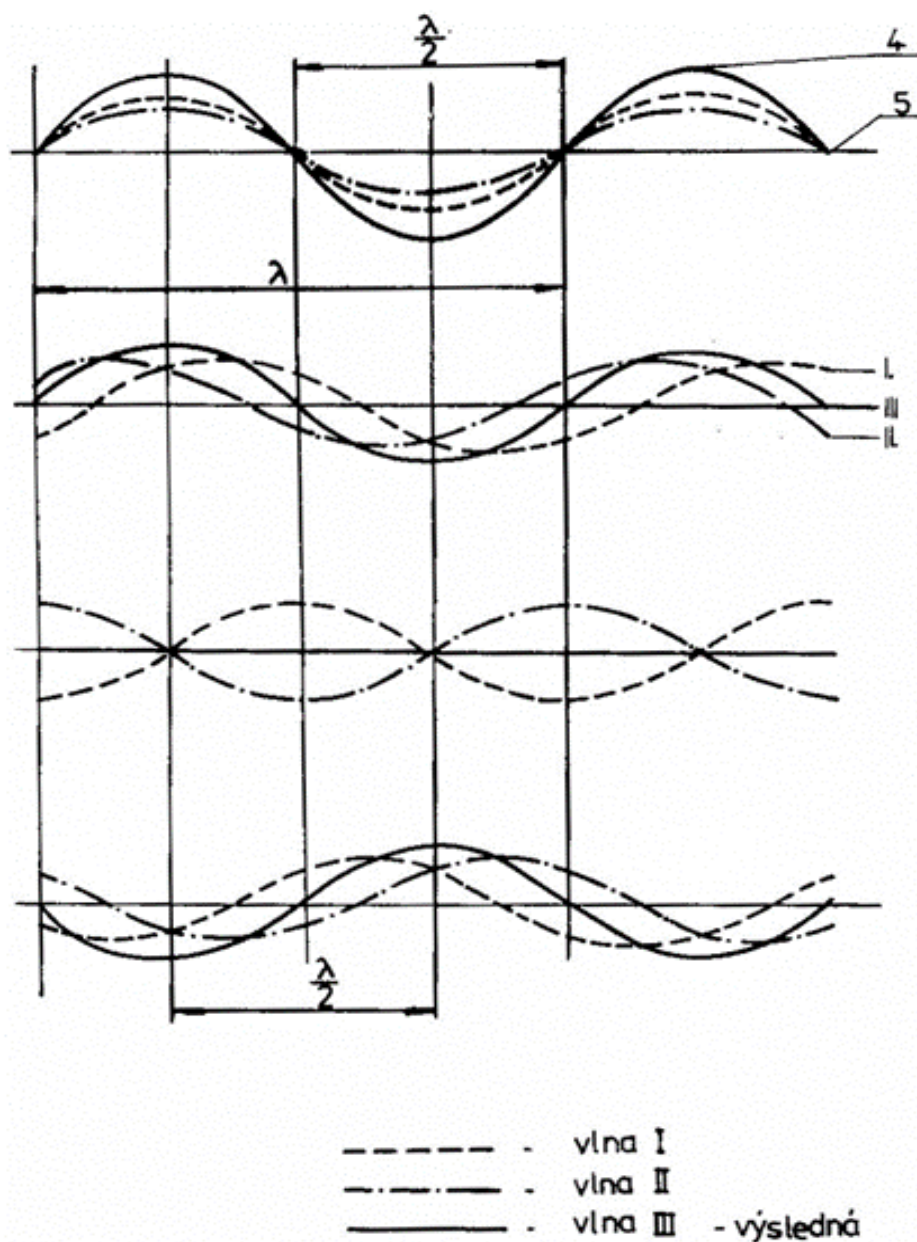
Když se ultrazvuková vlna šíří v pružném prostředí a narazí na překážku (např. nepropustnou desku o průměru D), potom její šíření za překážkou můžeme odvodit na základě Huygensova principu, který říká, že každá částice vlnoplochy je zdrojem dalšího elementárního vlnění. Rozhodujícím faktorem, který určuje šíření vlnění za překážkou, je poměr D/λ , přičemž λ je délka vlny v daném prostředí. Pokud bude $\left(\frac{D}{\lambda} \gg 1\right)$, za překážkou vznikne v ultrazvukovém poli stín, tzn. prostor bez vlnění. Při postupném zmenšování překážky (zmenšování poměru D/λ), se vlnění za překážkou začne ohýbat. Když bude rozměr překážky srovnatelný s vlnovou délkou λ , nastává okolo překážky dokonalý ohyb. V tomto případě nemá překážka téměř žádný vliv na šíření vln (viz obr. 1.7) [1].



Obr. 1.7 Ohyb vlnění – šíření vlnění kolem překážky různých velikosti na povrchu kapaliny [1].

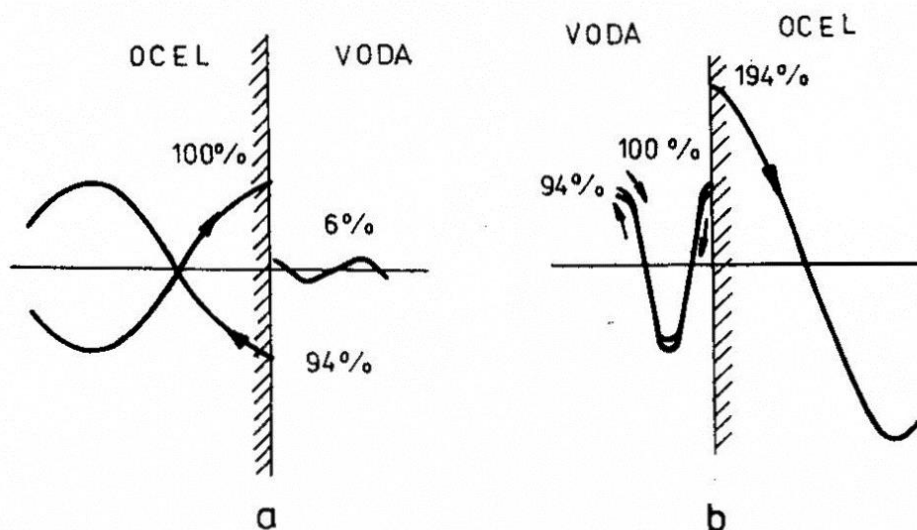
1.4.4 Postupné a stojaté vlnění

Postupná vlna, šířící se v prostředí, se může při kolmém dopadu na rozhraní druhého prostředí úplně odrazit a potom postupovat opačným směrem. Tím vzniká stojatá vlna s dvojnásobnou amplitudou výchylky postupné vlny při též frekvenci. Místo, kde je amplituda výchylky maximální nazýváme kmitna a místa, kde je nulová, nazýváme uzly kmitů (viz obr. 1.8).



Obr. 1.8 Vznik stojaté vlny – sčítáním vlny I a vlny II na výslednou vlnu III,
4 – kmitna vlny, 5 – uzel vlny [1].

Vznik stojatého vlnění je i v ultrazvukové technice spojený s odrazem. Vlnění šířící se v plynném nebo kapalném prostředí se při dopadu na tuhé prostředí (např. na rozhraní voda – ocel) odráží. V opačném případě, když vlnění přechází z tuhého prostředí do kapalného (např. z ocele do vody), odráží se a současně se obrací fáze (viz obr. 1.9) [1].



Obr. 1.9 Odraz a přechod ultrazvukové vlny na rozhraní prostředí při kolmém dopadu, a) ocel – voda, b) voda – ocel [1].

1.5 Jevy spojené s aplikací ultrazvuku

Při aplikaci ultrazvuku běžně dochází k několika jevům, kterých se využívá v praxi.

1.5.1 Piezoelektrický jev

Piezoelektrický jev u krystalu turmalínu poprvé pozorovali v roce 1880 bratři Pierre a Jacques Curieové, kteří zjistili při stlačení krystalu výskyt povrchového elektrického náboje. Může se vyskytovat pouze u krystalů, které nemají střed symetrie. Nejznámější piezoelektrickou látkou je monokrystalický křemen – křišťál.

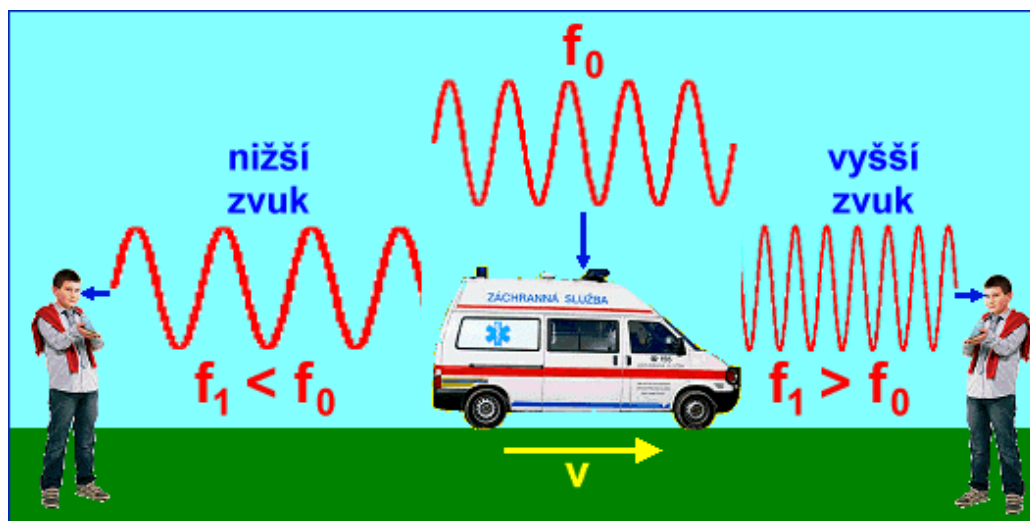
Vznik piezoelektrického jevu lze vysvětlit mikroskopicky: Deformací se ionty opačných nábojů posunou v krystalové mřížce tak, že elektrická těžiště záporných a kladných iontů, která se v nezdeformovaném krystalu nacházejí ve stejném bodě, se od sebe vzdálí. Na určitých plochách krystalu se objeví elektrický náboj.

O rok později objevili Curieové i opačný piezoelektrický jev tzv. elektrostrikcí, u níž vnější pole elektrické pole vyvolávalo deformaci krystalu. Tento jev je důležitější pro technické použití, zvláště pro užití piezoelektrických oscilátorů ve vysokofrekvenční technice.

Elektrostrikcce se může vyskytovat u všech dielektrických materiálů, piezoelektrický jev pouze u anizotropních materiálů [4].

1.5.2 Dopplerův jev

Dopplerův jev popisuje změnu frekvence a vlnové délky přijímaného oproti vysílanému signálu, způsobenou nenulovou vzájemnou rychlostí vysílače a přijímače (viz obr. 1.10).



Obr. 1.10 Dopplerův jev [9].

Pro změnu frekvence se dá odvodit vztah (9):

$$f_1 = f_0 \cdot \left(1 \pm \frac{c}{v}\right) \quad (9)$$

- kde: f_0 [Hz] – frekvence, kterou zjistí pozorovatel, vůči kterému je zdroj v klidu,
 f_1 [Hz] – frekvence, kterou zjistí pozorovatel, vůči kterému se zdroj pohybuje,
 v [m.s⁻¹] – rychlost zdroje vůči pozorovateli,
 c [m.s⁻¹] – rychlost šíření vlnění.

Pohybuje-li se zdroj směrem k pozorovateli, platí vzorec se znaménkem (+). V tomto případě zaregistruje pozorovatel zvýšení frekvence vlnění. Jestliže se zdroj od pozorovatele vzdaluje, platí vzorec se znaménkem (–) a zaregistrovaná frekvence je nižší.

Dopplerova jevu využívá řada měřicích přístrojů a zařízení, např. radary pro měření rychlosti vozidel nebo lékařské sonografy [8].

1.5.3 Ultrazvuková kavitace

Kavitace se vyskytuje všude, kde dochází k lokálnímu poklesu tlaku v kapalině. Což má za následek lokální mikroskopické roztržení kapaliny. Příčinou ultrazvukové kavitace jsou harmonické proměnné tlaky, které vznikají působením ultrazvukových kmitů na kapalinu. Vysoká frekvence ultrazvuku způsobuje narušení celistvosti kapaliny, což má za následek vzniku dutinky tzv. kaverny a její následné uzavření, které vyvolává mikroskopické tlakové imploze. Tlakové imploze mohou dosahovat tlaku přes 100 MPa [1].

2 NEDESTRUKTIVNÍ APLIKACE ULTRAZVUKU

Nedestruktivními aplikacemi ultrazvuku myslíme takové aplikace, u kterých není prioritou deformace zrna, změna tvaru objektu na který ultrazvuk působí. Tyto aplikace lze rozdělit do tří skupin podle toho, v jaké vědecké oblasti se s nimi můžeme setkat:

- v technologii,
- v medicíně,
- ostatní aplikace.

2.1 Nedestruktivní aplikace ultrazvuku v technologii

Použitím termínu v technologii máme na mysli, že všechny tyto aplikace používáme v technické praxi. Samozřejmě se s těmito metodami můžeme setkat i jinde. U nedestruktivní aplikace ultrazvuku se převážně jedná o měření různých veličin.

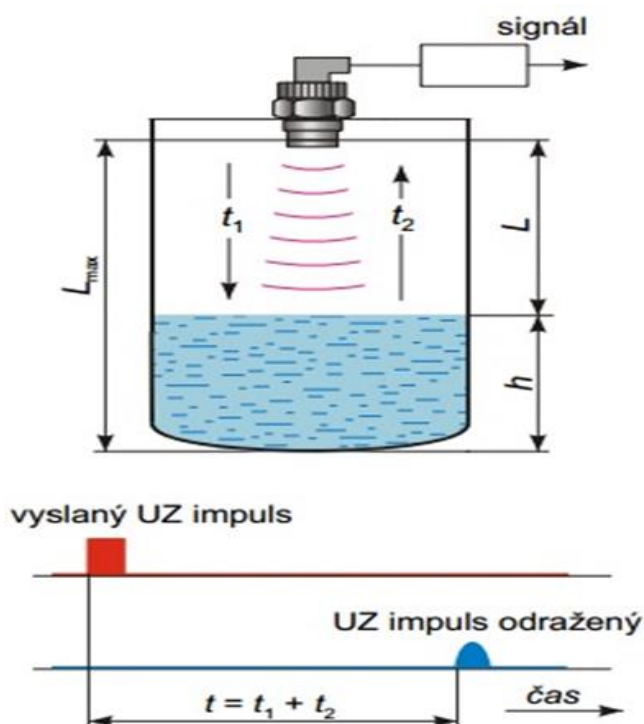
2.1.1 Indikace a měření výšky hladiny

Měření výšky hladiny pomocí ultrazvuku patří k metodám, s kterými se můžeme setkat v našem okolí (viz obr. 2.3). Pro měření výšky lze použít dvou metod měření:

- měření doby šíření ultrazvuku,
- vyhodnocení útlumu ultrazvukových vln.

Měření doby šíření ultrazvuku

Metoda je založena na měření doby šíření ultrazvukové vlny od vysílače přes odraz od hladiny zpět k přijímači (viz obr. 2.1). Z naměřené doby se při známé rychlosti šíření ultrazvuku vypočte vzdálenost (9). Tato metoda se využívá pro spojitě měření výšky hladiny.

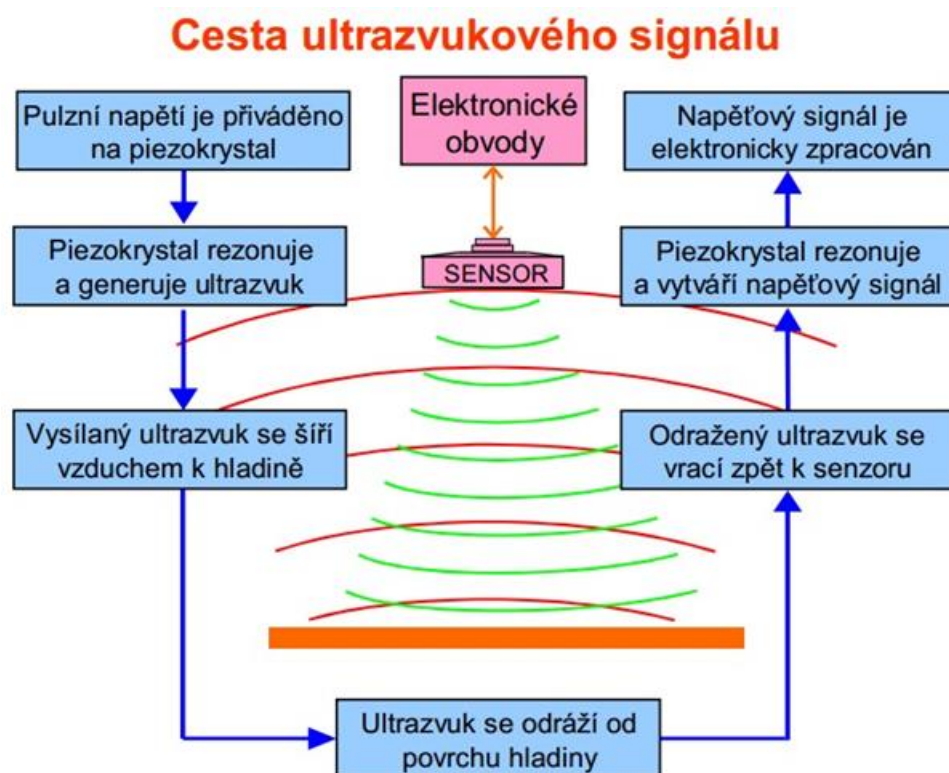


Obr. 2.1 Měření výšky hladiny ultrazvukem [10].

$$L = c \cdot \frac{t}{2}; \quad h = L_{\max} - c \cdot \frac{t}{2} \quad (9)$$

- kde: L [m] – vzdálenost od hladiny ke snímači (sensoru),
 h [m] – výška hladiny,
 $L_{\max}$ [m] – vzdálenost od dna nádrže (řeky apod.) ke snímači (sensoru)
 c [m.s⁻¹] – rychlost šíření ultrazvuku v prostředí,
 t [s] – čas.

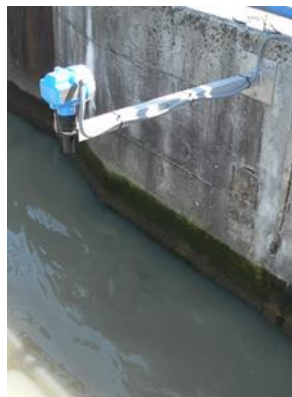
Pro stanovení výšky hladiny musíme znát celkovou délku mezi snímačem (sensore) a dnem nádrže. Doba odezvy na změnu výšky hladiny se pohybuje od desetin sekundy až po jednotky sekund. Schéma průběhu měření viz obr. 2.2 [10].



Obr. 2.2 Průběh měření výšky hladiny ultrazvukem [10].

Vyhodnocení útlumu ultrazvukových vln

Při této metodě se vyhodnocuje útlum ultrazvukových vln v závislosti na složení prostředí, kterým ultrazvuk prochází. Této metody lze využít k limitnímu měření hladiny [10].



Obr. 2.3 Měření výšky hladiny ultrazvukem v otevřeném prostředí [12].

2.1.2 Ultrazvuková defektoskopie

Ultrazvuková defektoskopie se používá ke zjištění vnitřních vad (defektů) v tuhých materiálech (kovy, plasty, beton, dřevo a apod.).

Zkoušky jsou založeny na šíření akustického vlnění zkoušeným objektem a registraci jeho změn, vyvolaných ve zkoušené prostředí jeho interakcí na rozhraní mezi dvěma prostředími, které mají rozdílné akustické vlastnosti, tj. homogenním prostředím a nehomogenitou (vadou) [11].

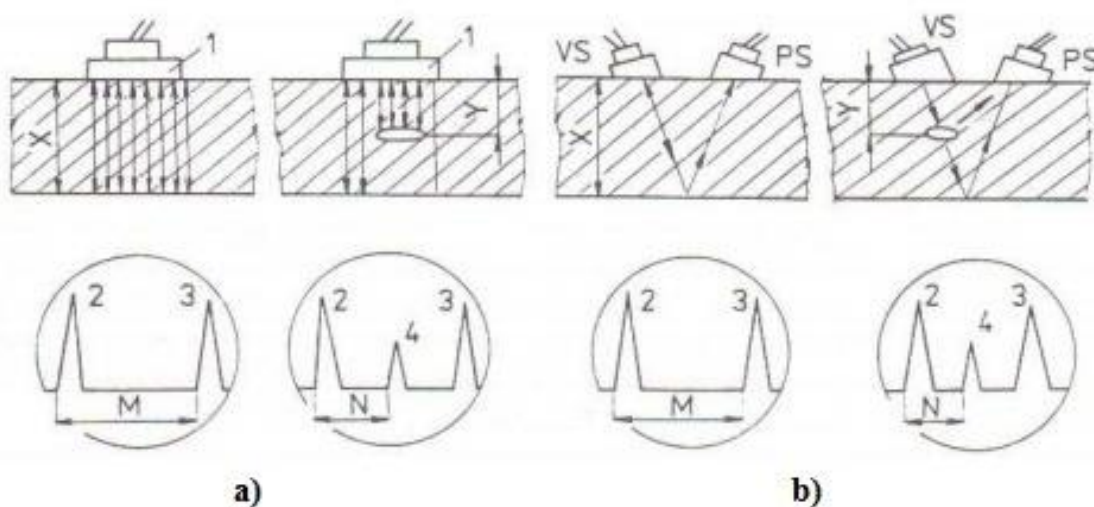
Pro zjišťování vad v materiálu nebo výrobku se používají dvě základní zkušební metody a to:

- odrazová metoda,
- průchodová metoda.

Odrazová metoda

Principem odrazové metody (obr. 2.4) je zjišťování odrazů ultrazvukových impulsů, které jsou způsobeny vadami materiálu. Krátké ultrazvukové impulsy vyslané vysílací sondou se odrážejí od protilehlého povrchu zkoušeného objektu a vracejí se zpět do vysílací sondy, kde vytváří tzv. echo o rozteči M , která je úměrná tloušťce zkoušeného objektu X . Jestliže zkoušený objekt obsahuje vadu, objeví se mezi počátečním (2) a koncovým (3) echem echo poruchové (4). Vzdálenost vady od povrchu (Y) zkoušeného objektu se určuje z doby příchodu echa po vyslání ultrazvukového impulsu a je tedy úměrná vzdálenosti (N) mezi počátečním (2) a poruchovým echem (4). Velikost vady se určuje pomocí amplitudy echa. Odrazová metoda má nevýhodu tzv. mrtvého pásma, které se nachází v blízkosti povrchu a znemožňuje zjištění vady. Díky čemuž není tato metoda vhodná pro kontrolu tenkých materiálů. V případě použití dvojité sondy (viz obr. 2.4b) se dosahuje lepší zjistitelnosti vad, které se nacházejí v blízkosti povrchu zkoušeného materiálu. Výhodou odrazové metody je její značná citlivost, dále poměrně přesné určení místa vady materiálu.

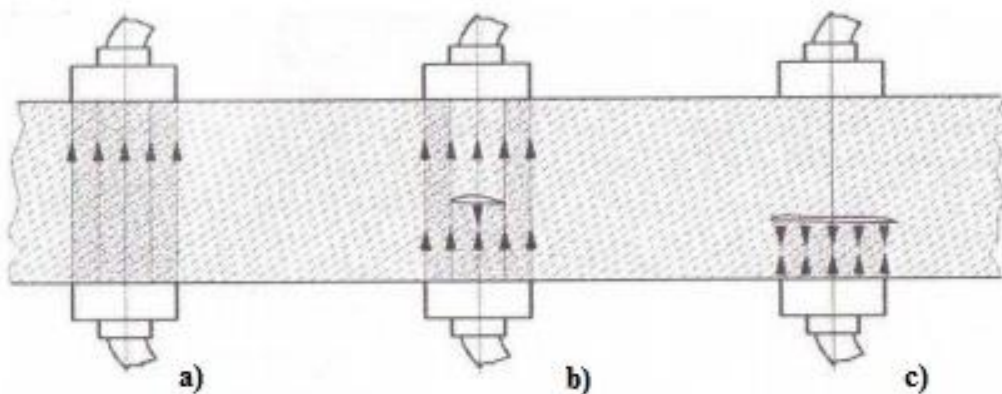
Další výhodou je, že pro provedení zkoušky stačí přístupnost pouze z jedné strany objektu. Jedná se o značně citlivou a poměrně přesnou metodu zjišťování vnitřních vad. Zejména vhodná pro kontrolu materiálů o tloušťce více jak 10 mm, dále se používá k měření tloušťek [14]



Obr. 2.4 Princip odrazové metody: a) jednosondové měření, b) dvousondové měření [16].

Průchodová metoda

U této metody se měří hodnota ultrazvukové energie, která projde zkoušeným materiálem. Pro měření se používají dvě sondy umístěné souose na protilehlých stranách zkoušeného materiálu. Jedna sonda se chová jako vysílač a druhá jako přijímač, vada materiálu se vyhodnocuje podle toho, jaká část signálu (energie) projde z vysílače k přijímači (viz obr. 2.5). Rozeznání vady je závislé na její hloubce a na ohybu ultrazvukových vln za vadou. V případě, že se vada nachází ve větší vzdálenosti od přijímací sondy a její průřez je menší než průřez svazku ultrazvukových vln, potom může dojít k uzavření akustického stínu a přijímací sonda zaznamená stejnou hodnotu energie jako v místě bez vady. Této metody se používá pro zkoušení těžko prozvučitelných materiálů, jako je například pryž. Dále je vhodná pro kontrolu materiálů menších tloušťek [14].



Obr. 2.5 Identifikace vady průchodovou metodou: a) materiál bez vady, b) materiál s vadou menší než je svazek ultrazvukových vln, c) materiál s vadou větší než je svazek ultrazvukových vln [16].

Ultrazvukem jsou dobře zjistitelné vady plošného charakteru, kdy rovina vady je Přibližně kolmá na směr šíření vlnění. Obtížně jsou však zjistitelné objemové vady (bubliny, póry) a plošné vady umístěné rovnoběžně se směrem vlnění. Nelze téměř vůbec usuzovat typ vady (nelze zjistit, zda jde o bublinu, pór či trhlinu), je možné pouze určit, že se jedná o nějakou vadu a přibližně určit velikost vady. Pro zkoušení ultrazvukem platí norma ČSN EN 1714 a pro vyhodnocení platí ČSN EN 1712 [18].



Obr. 2.6 Detail ručního skeneru pro kontrolu vnitřních vad ve svaru [19].

2.1.3 Měření průtoku

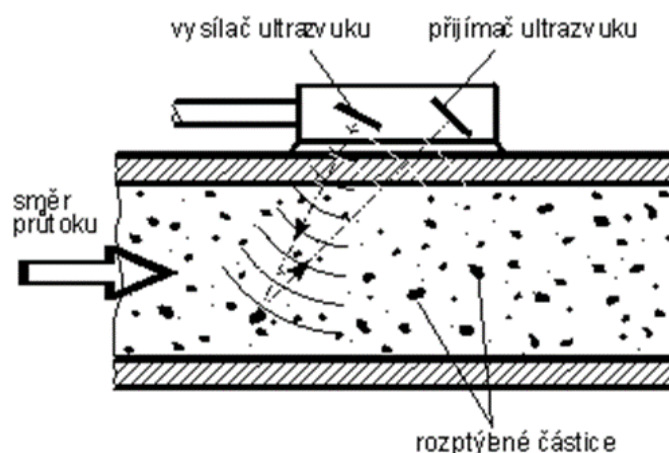
Měřením průtoku ultrazvukem je možné změřit téměř jakékoliv kapalně médium, elektricky vodivé i nevodivé, včetně např. agresivních kapalin. Díky čemuž má tato metoda velice široké uplatnění.

Ultrazvukové průtokoměry můžeme rozdělit do dvou skupin:

- průtokoměry využívající Dopplerova jevu,
- průtokoměry, u nichž se měří doba průchodu ultrazvukového signálu.

Průtokoměry využívající Dopplerova jevu

Průtokoměr se skládá z vysílače a přijímače ultrazvukového signálu, které jsou připevněny vně potrubí (viz obr. 2.7). Pro použití průtokoměru založeného na Dopplerově jevu je potřeba aby proudící médium obsahovalo částice odrážející zvuk, tj. např. pevné částice či bubliny vzduchu. Bez těchto částic nemůže průtokoměr toho typu pracovat.



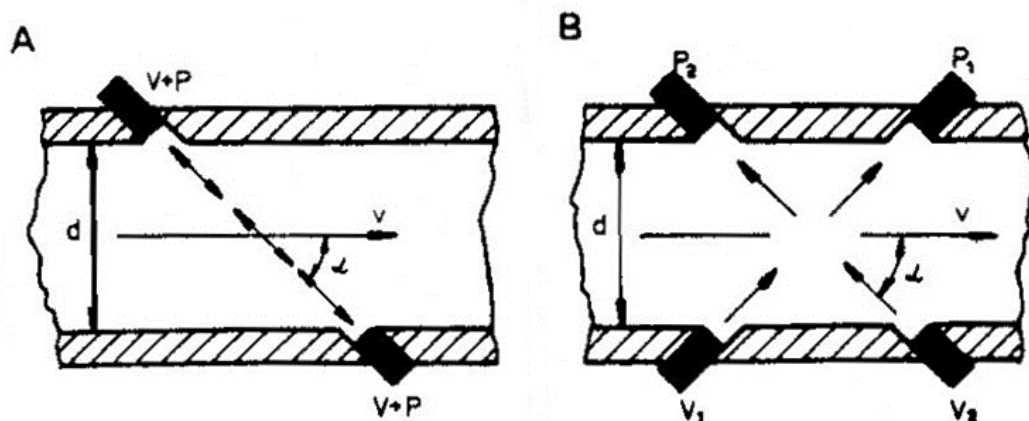
Obr. 2.7 Průtokoměr založený na Dopplerově jevu [20].

Ultrazvukový signál o určité frekvenci je vysílačem vysílán do proudící kapaliny, kde dochází k odrazu ultrazvuku od pohybující se částice či bubliny. Při zachycení odraženého signálu přijímačem se vyhodnocuje změna frekvence přijatého signálu. Změna frekvence je úměrná rychlosti proudícího média.

Tyto přístroje se vyrábějí i v malém přenosném provedení, které lze připevnit vně potrubí. Takovéto ultrazvukové průtokoměry neovlivňují měřený průtok, protože nezasahují do proudícího média a s výhodou jich lze využít k měření průtoku kalů a znečištěných tekutin, které způsobují těžkosti běžným průtokoměrům [20].

Průtokoměry, u nichž se měří doba průchodu ultrazvukového signálu

Průtokoměry, u nichž se vyhodnocuje doba šíření ultrazvukového signálu, se konstruují nejčastěji v diferenčním zapojení. Ultrazvukový signál (ve formě impulsů) se vysílá jednak ve směru a jednak proti směru proudění kapaliny. Na obr. 2.8A vidíme dva ultrazvukové měniče, kde se ultrazvukové vlnění šíří střídavě z jednoho měniče na druhý a naopak. Pomocí dvou párů ultrazvukových měničů lze vysílat ultrazvukový impuls po směru i protisměru současně (obr. 2.8B).



Obr. 2.8 Princip měření průtoku pomocí ultrazvuku [1].

Zdroj ultrazvukových vln může být v těsném styku s měřenou kapalinou (dotykové měření), nebo je nasazen na potrubí z vnějšku (bezdotykové měření). Provedení ultrazvukových průtokoměrů je technicky náročné a také jejich následná kalibrace je obtížná. Velkou výhodou těchto průtokoměrů je fakt, že nezasahují do proudícího média a dají se dodatečně zabudovat na povrch potrubí.

Ultrazvukové průtokoměry (viz obr. 2.9) mají vysokou přesnost měření, dlouhodobou stabilitou v širokém rozsahu měřených hodnot, nízké hydraulické ztráty a nenáročnou údržbou.



Obr. 2.9 Ultrazvukový průtokoměr [21].

Ultrazvukových metod lze použít i pro měření pulzujících průtoků, měření kapalin s obsahem kalů, tavením za vysokých teplot. Je to jedna z mála metod pro měření průtoku tekutých kovů, používaných k přenosu tepla v jaderné energetice [1].

2.1.4 Měření tloušťky

Měření tloušťky stěny je jedna z nejrozšířenějších aplikací ultrazvukového zkoušení. K měření se používají převážně jednoduché a lehce přenosné přístroje (viz obr. 2.10). Pro měření tloušťky lze rovněž použít defektoskop, který nemá takové kompaktní rozměry, zato má o něco vyšší přesnost měření.

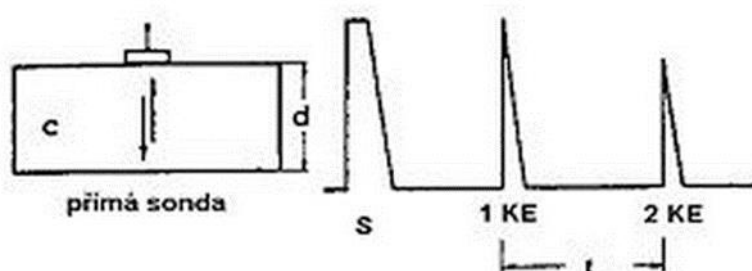


Obrázek 2.10 Digitální ultrazvukový tloušťkoměr UTG-140D [23]

Princip funkce ultrazvukových tloušťkoměrů je založen, stejně jako ultrazvuková defektoskopie, na měření doby průchodu ultrazvukového svazku materiálem. Dá se říci, že měřená tloušťka materiálu je určena měřením času, který potřebuje krátký ultrazvukový impuls k průchodu tloušťkou materiálu jednou, dvakrát nebo vícekrát [22].

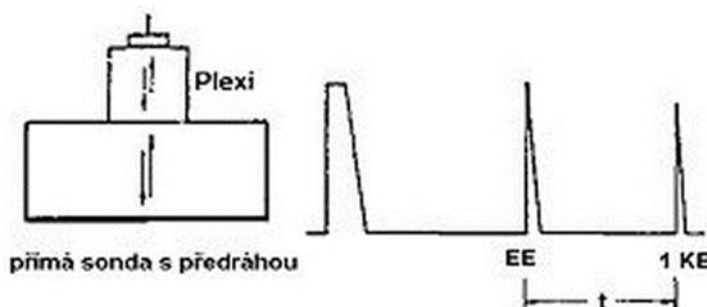
Způsoby měření tloušťky

- 1) Přímou sondou – měří se doba průchodu mezi vysílacím impulsem a prvním zpět odraženým echem. Pro správný výsledek se odčítá korekce nuly k vyrovnaní tloušťky ochranné vrstvy sondy a vrstvy akustického prostředí (viz obr. 2.11).



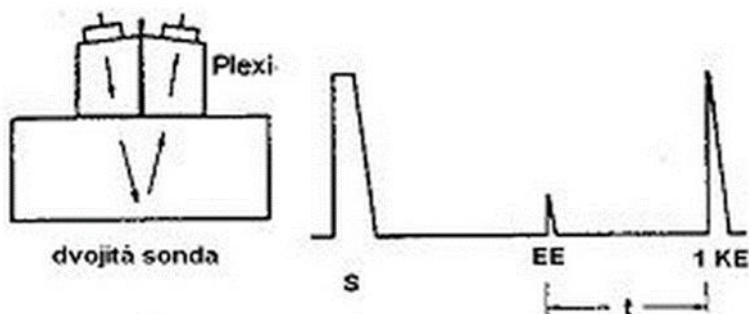
Obr. 2.11 Měření tloušťky – přímá sonda [22].

- 2) Přímou sondou s přihrádkou – měří se doba průchodu mezi koncem tělesa přihrádky a prvním koncovým echem (viz obr. 2.12).



Obr. 2.12 Měření tloušťky – přímá sonda s přihrádkou [22].

- 3) Dvojitou sondou – měří se doba průchodu mezi koncovými echy (viz obr. 2.13).



Obr. 2.13 Měření tloušťky – dvojitá sonda [22].

2.1.5 Měření tvrdosti

Principem ultrazvukového měření tvrdosti je využití axiálně kmitající tyčinky s Vickersovým diamantovým hrotem (viz obr. 2.14). Při zatížení měřeného materiálu se mění frekvence kmitání tyčinky. Tato změna frekvence určuje tvrdost materiálu a je závislá na ploše vpichu a modulu pružnosti měřeného materiálu.

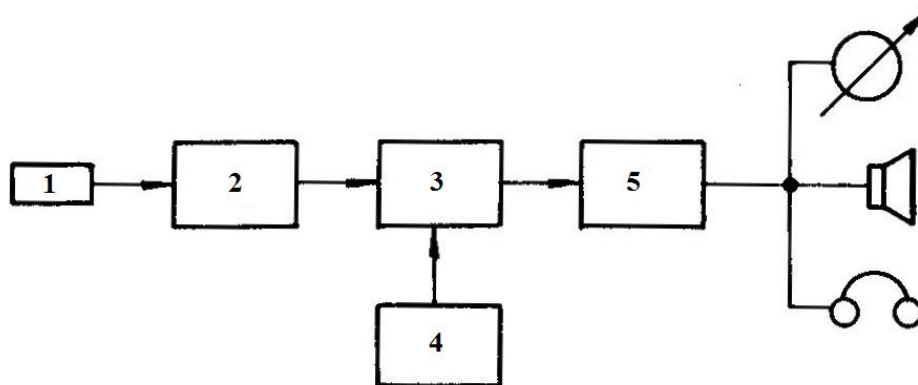


Obr. 2.14 Ultrazvukové měření tvrdosti – průřez sondou UCI [25].

Jedná se o rychlou a přesnou metodu měření tvrdosti s minimálním porušením povrchu měřeného materiálu. Tato metoda je vhodná k měření malých dílů a tvrdosti vrstev při malých zatěžovacích silách, dále k měření v těžko přístupných místech. Hlavně je vhodná pro kontrolu tvrdosti na finálních opracovaných plochách (lopatky turbín a kompresorů, svarové spoje, písty, evolventní plochy ozubených kol) [24].

2.1.6 Měření netěsností

Měření závisí na detekci ultrazvukové energie s širokým frekvenčním rozsahem, která vzniká v důsledku turbulentního proudění při úniku plynu netěsnostmi do volného prostoru. Většinou se jedná o přenosné zařízení (viz obr. 2.16), které je vhodné pro měření netěsnosti v terénu.



Obr. 2.15 Blokové schéma ultrazvukového indikátoru netěsností [1].

Princip činnosti ultrazvukové detekce netěsnosti plyne z blokového schématu na obr. 2.15. Ultrazvukový mikrofon 1 tvoří základ indikátoru netěsnosti a převádí snímaný ultrazvukový signál na elektrický signál se stejnou frekvencí. Frekvence elektrického signálu z mikrofonu se po zesílení ve vysokofrekvenčním zesilovači 2 mění ve směšovači 3 na frekvenci v oblasti slyšitelnosti. Po zesílení v nízkofrekvenčním zesilovači 5 lze pozorovat ve výstupním zařízení (reproduktoru, sluchátkách nebo v měřicím přístroji) šum, který je tím dál víc silnější, čím je větší únik plynu [1].



Obr. 2.16 Ultrazvukový detektor netěsností UltraSonic Leak Detektor, model 9061 [26].

2.1.7 Měření hustoty

Rychlost šíření ultrazvuku závisí na vlastnostech kapaliny, její hustotě, viskozitě a teplotě. Princip měření hustoty je tedy založen na stanovení rychlosti šíření ultrazvukových vln v měřené kapalině. Rychlost šíření ultrazvukových vln je dána vztahem (10).

$$v = \frac{L}{t} \quad (10)$$

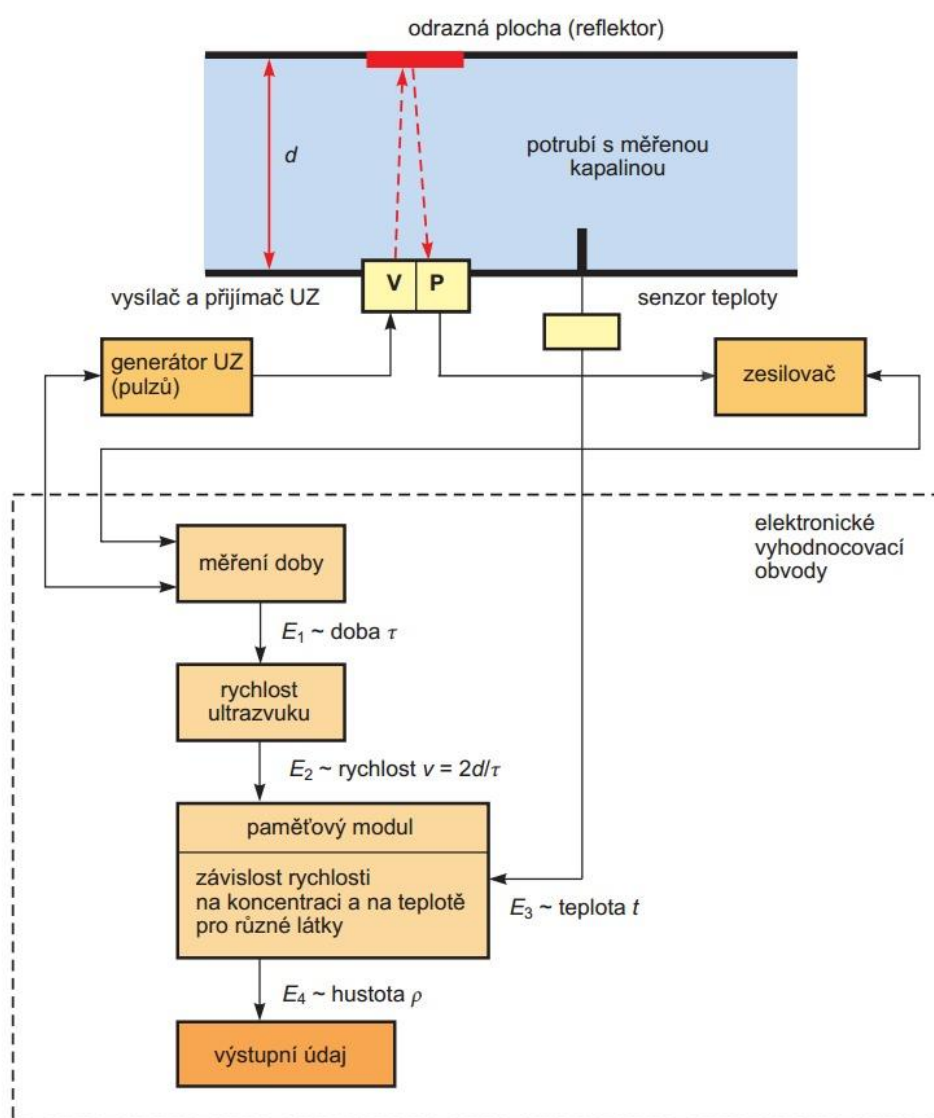
kde: v [m.s⁻¹] – rychlost šíření ultrazvukových vln,
 L [m] – vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem ultrazvuku,
 t [s] – čas potřebný k překonání vzdálenosti L .

Ultrazvukové snímače hustoty (viz obr. 2.17) zaznamenávají dobu potřebnou k překonání vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem a zároveň snímají teplotu měřené kapaliny. Pomocí těchto údajů se zjistí hustota kapaliny (viz obr. 2.18).



Obr. 2.17 Ultrazvukový snímač hustoty Sonatec [27].

Ultrazvukové snímače hustoty jsou vybaveny inteligentními převodníky signálu, díky kterým patří mezi moderní a perspektivní měřicí zařízení. Tyto snímače umožňují měření hustoty s přesností až $0,001 \text{ g.cm}^{-3}$ [28].



Obr. 2.18 Schéma zpracování signálů v ultrazvukovém snímači hustoty [27].

2.2 Nedestruktivní aplikace ultrazvuku v medicíně

Nedestruktivní aplikace ultrazvuku v medicíně v podobě sonografie je velmi rozšířená. Umožňuje nám získat informace o stavu vnitřních orgánů. Na jejichž základě a včasné diagnóze pomáhá uzdravovat a zachraňovat lidské životy.

2.2.1 Sonografie

Princip sonografie

Lidské tělo se skládá mimo jiné z měkké tkáně, které se chovají jako tekutina. Z toho plyne, že ultrazvukové vlnění uvnitř těla se šíří pouze podélně s průměrnou rychlostí 1540 ms^{-1} . Rychlost šíření ultrazvukového vlnění není ve všech tkáních stejná, tzn., že při průchodu tkání dochází k částečnému odrazu vlnění, toto odražené vlnění slouží k vizualizaci tkáně uvnitř těla. Ultrazvuk je vysílán v mikrosekundových impulzech s opakovací frekvencí řádově 10^2 - 10^3 Hz. U odraženého vlnění (signálů) se registruje jejich intenzita a doba za jakou dorazí do snímače. K dobré vizualizaci je potřeba detekovaný signál upravit (zesílit) [29].

Před vyšetřením pacienta se nanáší na povrch ultrazvukové sondy gel (EKG krém), který zajistí dobrý průchod vlnění do měkké tkáně.

U sonografie rozlišujeme více způsobů zobrazení:

- A mód,
- B mód,
- M mód,
- 2D zobrazení,
- 3D mód.

A mód

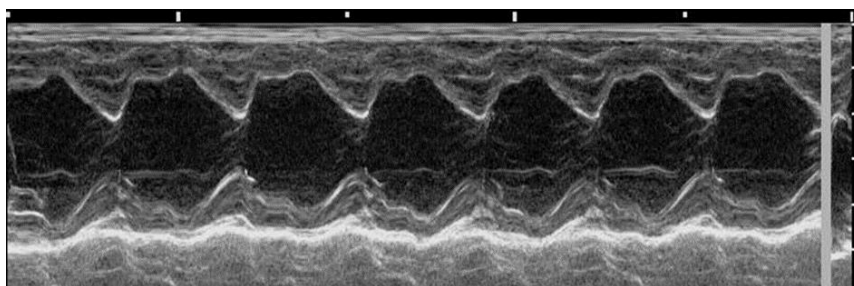
Jedná se o jednorozměrné zobrazení, při kterém se na stínítku zobrazují amplitudy odražených signálů. Výstupem je křivka zobrazující závislost korigované intenzity odraženého signálu na čase uplynulém od vyslání signálu. Tento mód umožňuje přesné měření vzdáleností a používá se v očním lékařství.

B mód

Zde se jedná také o jednorozměrné zobrazení, ve kterém se amplitudy odražených signálů převádějí do stupňů šedi. Výstupem je úsečka o různém jasu. Jedná se o základní mód, který se využívá pro další způsoby zobrazení.

M mód

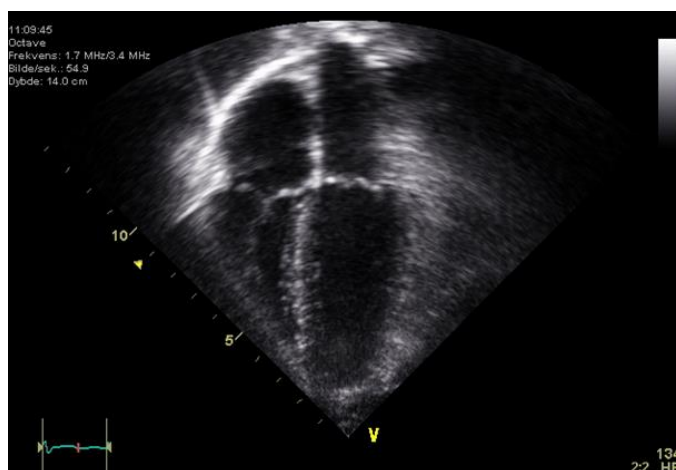
Je v základu B mód, jehož data jsou zobrazená v čase za sebou. Což nám umožňuje zobrazení pohybujících se struktur. Používá se při vyšetření srdce tzv. echokardiografie (viz obr. 2.19).



Obr. 2.19 Zobrazení srdce v M módu [29].

2D zobrazení

Jedná se o základní zobrazení v sonografii. 2D obraz je získán jako řada vedle sebe položených úseček jednorozměrného zobrazení v B módu. Z 2D zobrazení lze získat zobrazení jednorozměrné a to v A, B i M módu. 2D zobrazení je jedna z nejvíce používaných metod k vyšetření vnitřních orgánů (viz obr. 2.20).



Obr. 2.20 Průřez srdcem v 2D zobrazení [29].

3D mód

Jedná se o moderní zobrazovací metodu v medicíně. 3D zobrazení se skládá z několika 2D snímků. Tato rekonstrukce je prováděna pomocí počítače. Nejčastější využití 3D módu najdeme v porodnictví nebo v ortopedii (viz obr. 2.21).



Obr. 2.21 3D obraz plodu v děloze [29].

V dnešní medicíně má největší uplatnění 2D zobrazení. Pokud však použijeme výkonný počítač, lze provádět 3D zobrazení v reálném čase, tzv. 4D sonografii [29].

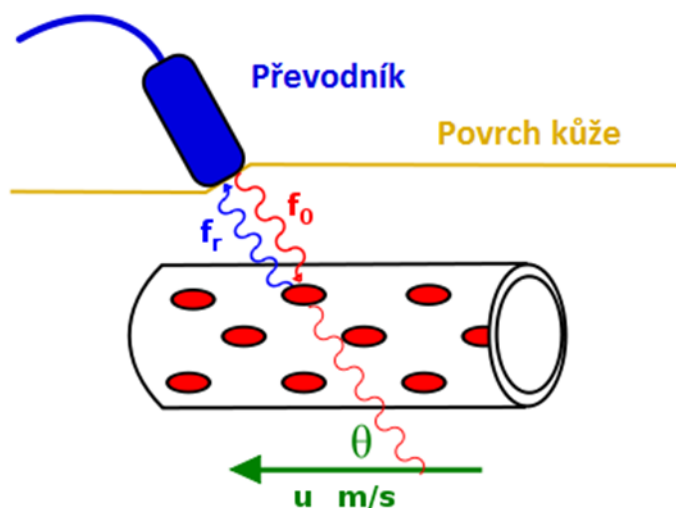
2.2.2 Dopplerovská ultrasonografie

Využitím Dopplerova jevu lze oproti běžné sonografii získat informace o rychlostech pohybu tkání, toho se využívá pro měření rychlosti průtoku krve (viz obr. 2.22). Toto měření lze provádět ve dvou módech:

- CW mód, kdy vysílací měnič stále vysílá,
- PW mód, kdy měnič vysílá v pulzech.

CW mód je technicky jednodušší, avšak nám poskytuje pouze informaci o průměrné rychlosti podél ultrazvukového paprsku. Používá se zejména k měření krevního tlaku na dolních končetinách a k orientačnímu hodnocení cévního řečiště.

PW mód umožňuje určit rychlost průtoku, ale také hloubku, ve které došlo k odrazu signálu. Výsledek měření v PW módu se zobrazuje jako 2D obraz naměřených rychlostí [29].

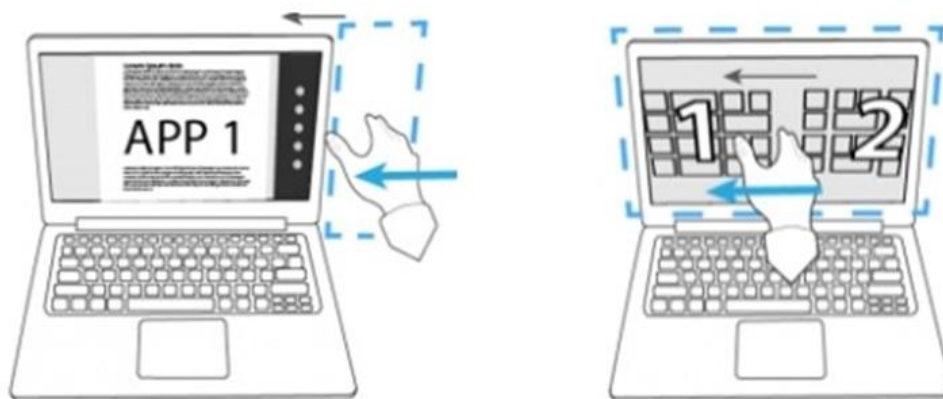


Obr. 2.22 Dopplerovská ultrasonografie – měření rychlosti průtoku krve [29].

2.3 Další nedestruktivní aplikace ultrazvuku

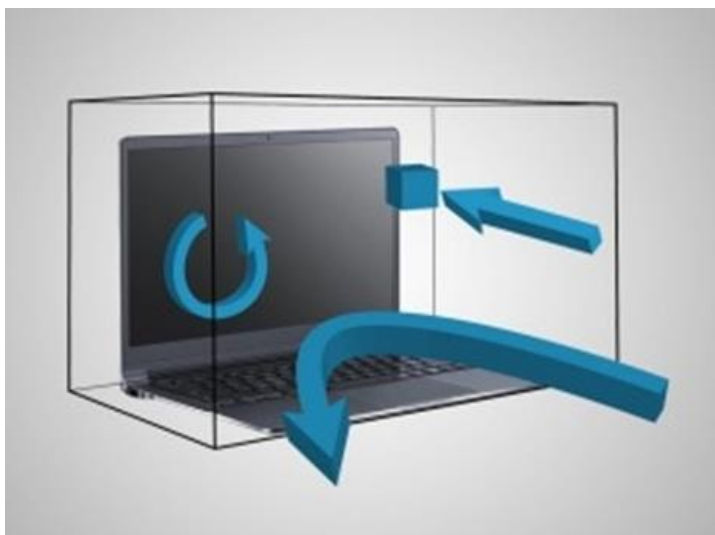
2.3.1 Bezdotykové ovládání

Norská firma Elliptic Labs vyvinula revoluční a funkční způsob ovládání, který může nahradit touchpad u notebooků. Technologie TGT (Touchless Gesturing Technology) funguje v pásmech kolem 40 kHz a snímá zvuk, který vytváří pohyb našich rukou, dlaní a prstů v pásmu před soustavou mikrofónů umístěných v rámečku displeje. Takto snímáný zvuk je softwarově převáděn na ovládání operačního systému. Ovládání lze přirovnat k dotykovému ovládání displeje, avšak tohle bezdotykové řešení je mnohem příjemnější. Jednoduchými gesty lze pohodlně ovládat posouvání textu, otáčení a přibližování fotografií apod. (viz obr. 2.23).



Obr. 2.23 Ukázka bezdotykového ovládání [30].

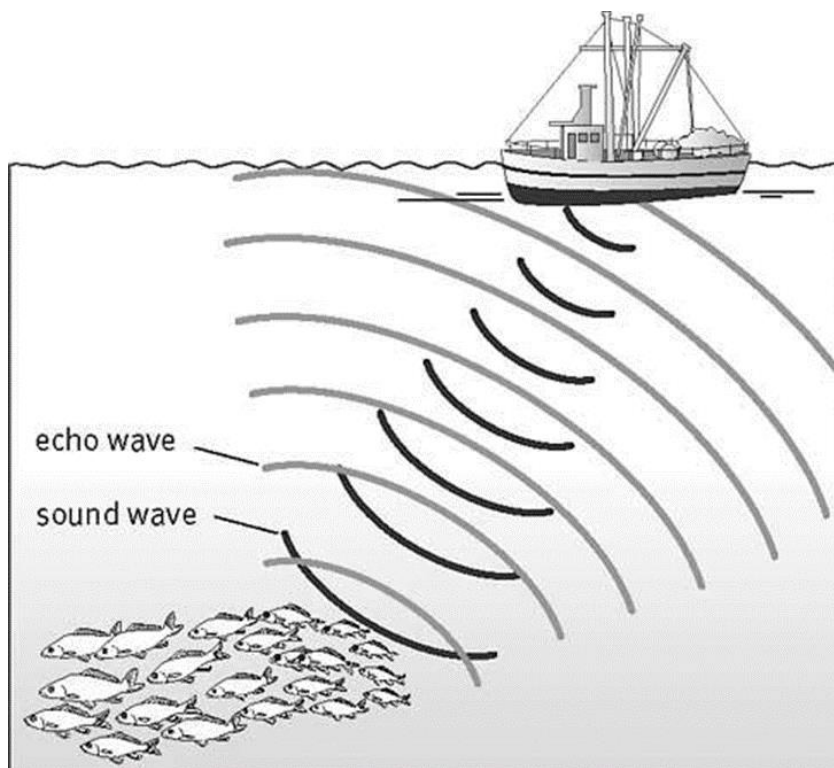
S bezdotykovým ovládáním jsme se mohli setkat už dříve, avšak většina těchto technologií je založena na vizuálním snímání pohybů (Kinect s kamerou nebo Wii s infračerveným senzorem). TGT se svými zvukovými senzory je novou technologií (viz obr. 2.24), která vyniká především velmi nízkou spotřebou energie, které není u přenosných zařízení (notebooků) nikdy dost [30].



Obr. 2.24 Bezdotykové ovládání Elliptic Labs [30].

2.3.2 Sonar

Jedná se o zařízení podobné radaru, které se používá v námořnictví. Sonar se skládá z vysílače a přijímače ultrazvukových signálů. Vyslaný signál putuje vodou, kde narazí na překážku, která signál odrazí zpět do sonaru. Z naměřeného času, za který se signál vrátí, se vypočítá vzdálenost překážky. Údaje o vzdálenosti a velikosti předmětu se zobrazují na displeji. Toto zařízení umožňuje měřit hloubku moře a reliéf mořského dna, pátrat po vracích potopených lodí nebo sledovat hejna ryb (viz obr. 2.25).



Obr. 2.25 Použití sonaru [32].

Parkovací senzory

Parkovací senzory nám umožňují bezstarostné parkování. Do zadního nárazníku automobilu je zabudováno několik čidel pro vysílání a příjem ultrazvuku, pozn. některé automobily mají zabudované přední nebo i boční senzory. Princip je stále obdobný, ultrazvukové vlny jsou vysílány do okolí, kde se odrazí od překážek zpět k automobilu (viz obr. 2.26). Čidla neustále zaznamenávají přijaté signály, miniaturní počítač průběžně vyhodnocuje vzdálenost a při přílišném přiblížení k překážce spouští zvukovou a někdy i světelnou signalizaci [31].



Obr. 2.26 Parkovací senzory [31].

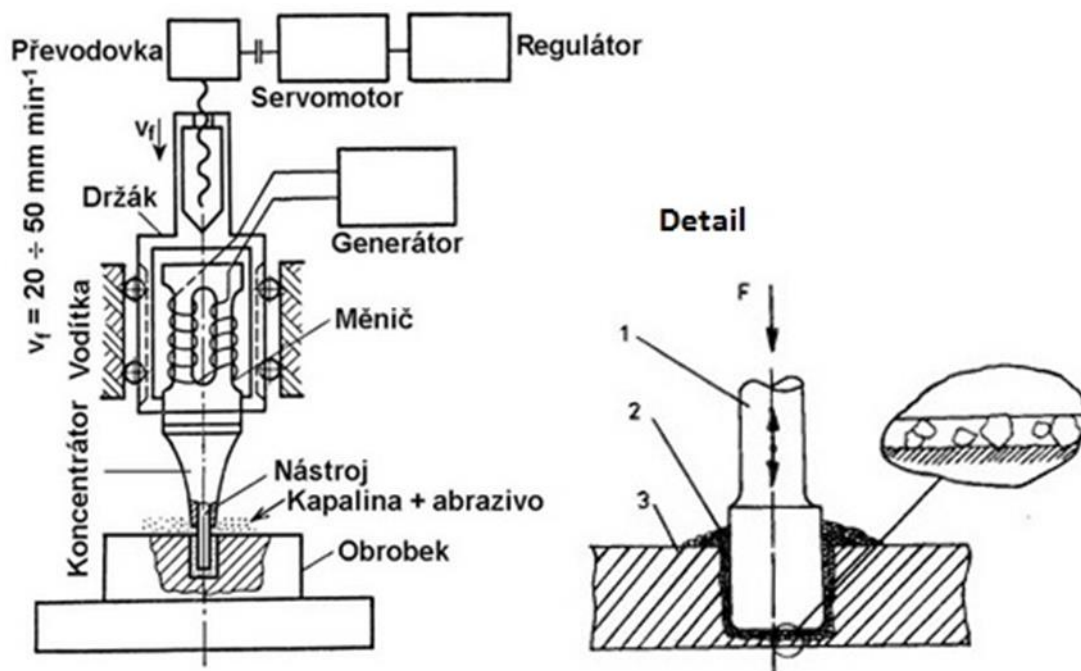
3 TECHNOLOGIE ULTRAZVUKOVÉHO OBRÁBĚNÍ

Využití ultrazvukových kmitů při mechanickém obrábění materiálu se používá [1]:

- k obrábění křehkých a tvrdých materiálů abrazivní suspenzí, kde nástroj kmitá ultrazvukovou frekvencí. Dále na obrábění pevně vázaným brusivem s rotujícím a kmitajícím nástrojem,
- zintenzivnění broušení rozkmitáním brousicího kotouče, současně s použitím ultrazvukového čištění kotouče,
- zintenzivnění některých konvenčních metod obrábění kovů rozkmitáním řezného nástroje (soustružení, frézování, vrtání, řezání závitů),
- odstranění otřepů z malých součástek volně rozptýleným brusivem v kapalině, kde se využívá ultrazvukové kavitace.

3.1 Fyzikální princip ultrazvukového obrábění abrazivní suspenzí

Metoda ultrazvukového obrábění prostřednictvím brousicí suspenze a kmitajícího nástroje ultrazvukovou frekvencí (18 až 25 kHz) umožňuje vytvářet do křehkých a tvrdých materiálů různé profilové otvory (průchozí i neprůchozí) velmi složitých tvarů, vyhotovení menších zápustek. Díky této metodě lze vykonávat takové operace, které by při jiných metodách obrábění byly velmi obtížné, výrobně příliš drahé a některé by se nedaly vykonat vůbec. Touto metodou lze obrábět tvrdé a křehké materiály, např. sklo, keramika, kevlar, spěkaný karbid, ferit, polodrahokam, diamant apod. K základním aplikacím ultrazvukového obrábění patří dělení materiálu, hloubení průchozích a neprůchozích děr, zhotovování reliéfních obtisků, gravírování tvrdých a křehkých materiálů [1].



Obr. 3.1 Princip ultrazvukového obrábění brousicí suspenzí [33].

1 – ultrazvukový nástroj, 2 – brusivo, 3 – obrobek.

Ultrazvukový generátor napájí piezokeramický měnič, ze kterého se přenáší kmity přes koncentrátor na nástroj. Rozkmitaný nástroj o frekvenci cca 20 kHz naráží na abrazivní suspenzi (roztok vody a abrazivních zrn), která je přiváděna mezi nástroj a obrobek, kde dochází k zatlačování abrazivních zrn do obráběného materiálu. Abrazivní zrna svými ostrými hranami vylamují drobné částice z povrchu materiálu, čímž dochází k překopírování tvaru činné části nástroje. Tyto částice spolu s abrazivní suspenzí jsou vyplavovány na povrch, přičemž na jejich místo je přiváděna čerstvá abrazivní suspenze. Celý cyklus se spojitě opakuje, dokud není dosaženo kýženého tvaru. Proces popisované metody je znázorněn na obr. 3.1. Obráběcí proces probíhá pouze pod spodní plochou nástroje, na stěnách hloubeného otvoru je obráběcí účinek minimální. Vytváří se zde pouze mezera o velikosti, která závisí na velikosti zrna použitého brusiva. Skutečný rozměr otvoru je větší než rozměr nástroje, a to o 1,6 – 1,8x než střední velikost použitého zrna. K dosažení požadovaného rozměru obrobku je nutné zmenšit nástroj o uvedenou hodnotu [1].

3.1.1 Technologické charakteristiky ultrazvukového obrábění abrazivní suspenzí

Ultrazvukové obrábění probíhá za stálé cirkulace a výměny abrazivní suspenze pod obráběcím nástrojem. Zde dochází k rázovému a periodickému vnikání jednotlivých abrazivních zrn do obráběného materiálu [1].

Na základní technologické charakteristiky ultrazvukového obrábění mají rozhodující vliv tyto vlastnosti:

- úběr materiálu,
- kvalita povrchu,
- geometrická přesnost obrábění.

Úběr obráběného materiálu

Úběr materiálu představuje množství materiálu odebraného z obráběné součástky za jednotku času ($\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$). Úběr materiálu závisí:

- a) na obráběném materiálu,
- b) na amplitudě výchylky,
- c) na abrazivní suspenzi,
- d) na obráběcím nástroji,
- e) na ostatních podmínkách obrábění.

Ad a) Materiály vhodné pro ultrazvukové obrábění charakterizuje kritérium křehkosti (11):

$$t_x = \frac{\tau_p}{\sigma_p} \quad (11)$$

- kde: t_x [-] – kritérium křehkosti,
 τ_p [Pa] – pevnost ve střihu,
 σ_p [Pa] – pevnost v tahu.

Dle kritéria křehkosti rozdělujeme materiály podle schopnosti ultrazvukového obrábění do tří skupin [1]:

- materiály pro které je $t_x > 2$ (sklo, ferit, polovodiče, keramika), jsou lehko obrobitelné ultrazvukem,
- materiály, kde $1 < t_x < 2$ (kalená ocel, slinutý karbid), jsou obrobitelné ultrazvukem,
- materiály, kde $t_x < 1$ (ocel, měď, olovo), jsou neobrobitelné ultrazvukem.

Ad b) Z hlediska amplitudy výchylky pro úběr materiálu platí (12):

$$V_m = k \cdot A_\xi^2 \quad (12)$$

- kde: V_m [mm³.min⁻¹] – úběr materiálu,
 A_ξ [μm] – amplituda výchylky,
 k [mm.min⁻¹] – konstanta zahrnující několik součinitelů.

Existuje určitá velikost amplitudy výchylky A_ξ , nad kterou úběr V_m začne klesat. Při frekvenci 18 až 25 kHz se amplituda pohybuje v rozsahu 30 až 80 μm.

Podobný pokles úběru V_m může nastat při velmi jemném nebo opotřebovaném abrazivním zrně, či obrábění velmi tuhých materiálů [1].

Ad c) Abrazivní suspenzi charakterizují:

- tvrdost brusiva,
- zrnitost brusiva,
- specifická hmotnost brusiva,
- koncentrace brusiva v suspenzi,
- vlastnosti kapaliny.

Tvrdość a hustota používaných brusiv pro ultrazvukové obrábění je uvedena v tabulce 2.

Tab. 2 Používané brusiva na UZ obrábění [1].

Poř. č.	Název	Značka	Tvrdość (MOHS)	Hustota (10^{-3} kgm^{-3})
1	Umělý korund Al_2O_3	A	9 až 9,5	4,1
2	Karborundum SiC	C	9,5	3,09
3	Karbid bóru B_4C	B	9,5 až 9,75	2,18
4	Diamant	D	10	3,5

Zvyšováním tvrdosti brusiva se nezvyšuje pouze úběr obráběného materiálu, ale i jeho cena. Mezi nejpoužívanější brusiva patří karbid bóru a karbid křemíku.

Zrnitost brusiva má velký vliv na úběr a drsnost obráběného materiálu. Obvykle se volí velikost zrna rovnající se velikosti amplitudy výchylky kmitajícího nástroje.

Specifická hmotnost brusiva je důležitá z hlediska rychlého vyplachování pracovního prostoru mezi nástrojem a materiálem. Platí také, že úběr materiálu roste tehdy, když je použito brusivo s malou specifickou hmotností. Z tab. 2 lze zjistit, že tomuto požadavku nejlépe odpovídá karbid bóru.

Koncentrace brusiva je důležitá pro rychlou dopravu suspenze do pracovního prostoru. Optimální koncentrace brusiva je 30 – 40 %.

Pro optimální úběr materiálu je také důležitá kapalina abrazivní suspenze. Kapalina by měla dokonale smáčet brusivo a zároveň by měla mít dobré chladicí vlastnosti. Nejčastěji se používá voda, která splňuje tyto požadavky a navíc je podstatně levnější než jiné chladicí kapaliny [1].

Ad d) Vliv nástroje na úběr

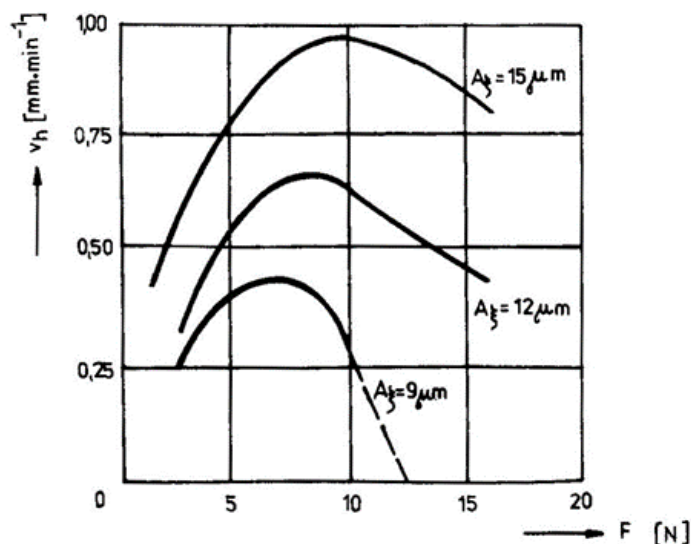
Na úběr a rychlost obrábění má velký vliv i nástroj. Materiál nástroje bývá nejčastěji zhotoven z konstrukční oceli, např. ocel 11 500 a 14 220, dále se může zhotovit z korozi-vzdorné oceli, mosazi či mědi. Tvar a úběr obráběného materiálu podstatně závisí na tvaru nástroje. Při ultrazvukovém obrábění dochází k opotřebování nástroje, což má za následek snížení přesnosti obrábění. Poměr opotřebování nástroje k odebíranému materiálu je cca 1:100 při obrábění skla. Při obrábění tvrdých kovů je tento poměr 1 – 1,5: 1. Je známo, že čím tvrdší a houževnatější materiál je obráběn, tím větší je opotřebování nástroje [1].

Ad e) Vliv podmínek obrábění na úběr materiálu:

- uchycení materiálu,
- přitlačná síla,
- hloubka obrábění,
- způsob zavádění brusiva.

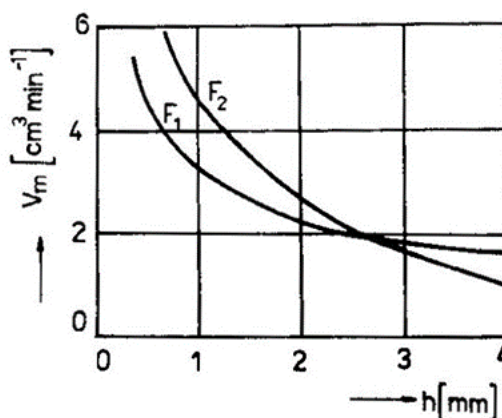
Pevné a dostatečně tuhé uchycení materiálu je velmi důležité nejen pro jeho úběr, ale i pro dosažení nejvyšší přesnosti obrábění.

Na základě experimentálních zkoušek se zjistilo, že rychlost obrábění ze začátku roste poměrně s růstem přitlačné síly, kterou je nástroj tlačěn do záběru (obr. 3.2). Při zvýšení síly nad určitou hranici začne úběr klesat. Volba optimální přitlačné síly je závislá na velikosti obráběné plochy, amplitudě kmitů nástroje a velikosti abrazivních zrn, obvykle však bývá 2 až 30 N.cm⁻².



Obr. 3.2 Závislost rychlosti obrábění v_h na velikosti přitlačné síly F při různých amplitudách výchylky A_x obráběcího nástroje. Nástroj $\varnothing = 6,3$ mm, obráběný materiál sklo [1].

Rychlost obrábění klesá v závislosti na hloubce. Zmenšení úběru způsobuje špatná výměna brusiva a hydraulický odpor při proudění v bočních mezerách mezi nástrojem a obráběným materiálem (obr. 3.3).



Obr. 3.3 Závislost úběru V_m na obráběné tloušťce h . Vrtání do skla při dvou přitlačných silách $F_2 > F_1$ [1].

S postupujícím procesem obrábění se větší částice brusiva drobí na menší. Což má za důsledek zmenšení velikosti úběru. Z toho plyne, že má obnova abraziva pod nástrojem velký význam. Nejlepších výsledků se dosahuje při použití nucené cirkulace abrazivní suspenze, která zajišťuje dobrou výměnu brusiva (téměř neustále se přivádí čerstvá abrazivní suspenze, která zároveň vytlačuje již použitou suspenzi spolu s obrobeným materiálem). Nucené cirkulace se dosahuje tlakem nebo odsáváním [1].

Kvalita opracovaného povrchu

Na kvalitu povrchu mají vliv zejména tyto faktory:

- amplituda výchylky nástroje,
- rozměry zrn brusiva,
- mechanická pevnost opracovávaného materiálu,
- způsob obrábění.

Nejlepší kvality povrchu lze dosáhnout použitím jemnějšího brusiva a malé amplitudy výchylky kmitů nástroje. Kvalita povrchu závisí zejména na křehkosti a tvrdosti obráběného materiálu. Čím je tvrdost a pevnost obráběného materiálu větší, tím je lepší kvalita povrchu. Kvalitu povrchu lze také zvýšit postupným obráběním tak, že vždy při následujícím obrábění se použije jemnější brusivo a nástroj o takovém rozměru, aby s otvorem lícoval. Pro nejpřesnější operace se používají zvláště jemné mikroprášky M3 ($\sim 2 \mu\text{m}$) až M32 ($\sim 17 \mu\text{m}$). S kterými lze dosáhnout drsnosti $R_a 1,6 - 0,4 \mu\text{m}$ [1].

Geometrická přesnost obrábění

Geometrickou přesnost ovlivňuje:

- nástroj,
- brusivo,
- mechanismy obráběcího stroje.

Nejdůležitějším faktorem pro přesné obrábění je přesná výroba nástroje. Nástroj musí být dostatečně tuhý s poměrně malou délkou vzhledem k tloušťce. Takovýto nástroj utlumí a zamezí vzniku bočních kmitů, které nepříznivě ovlivňují obrábění. Výsledná přesnost je ovlivněna také opotřebením nástroje a závisí i na materiálu obrobku.

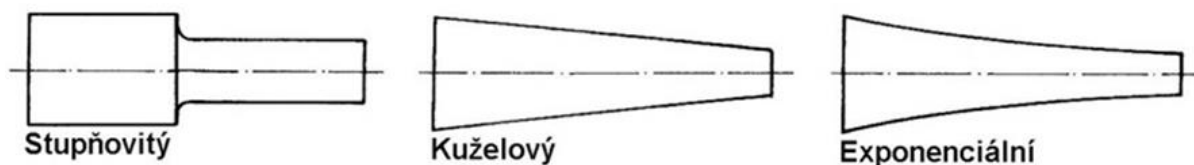
Opotřebování nástroje má za následek kuželovitost otvoru, kterou lze částečně odstranit dvěma způsoby:

- hříbkovitým tvarem nástroje,
- centrálním přívodem abrazivní suspenze.

Nejvyšší přesnosti se dosahuje při obrábění tvrdých a křehkých materiálů. Při dobrých podmínkách obrábění lze dosáhnout přesnosti od $0,02 - 0,01 \text{ mm}$. Přesnost se dá také zvýšit opakováním pracovního cyklu a použitím jemnějšího brusiva [1].

3.1.2 Nástroje pro ultrazvukové obrábění

Nástroje pro ultrazvukové obrábění musí vyhovovat rezonančním a amplitudo-transformačním podmínkám, které zaručují efektivní činnost ultrazvukové kmitající soustavy určené pro obrábění. Pro ultrazvukové nástroje se používají různé typy koncentrátorů, některé z nich lze vidět na obr. 3.4. Na jejich užším konci je připevněn nebo vyhotoven samotný tvar obráběcího nástroje (viz obr. 3.5, obr. 3.7).



Obr. 3.4 Typy koncentrátorů [33].

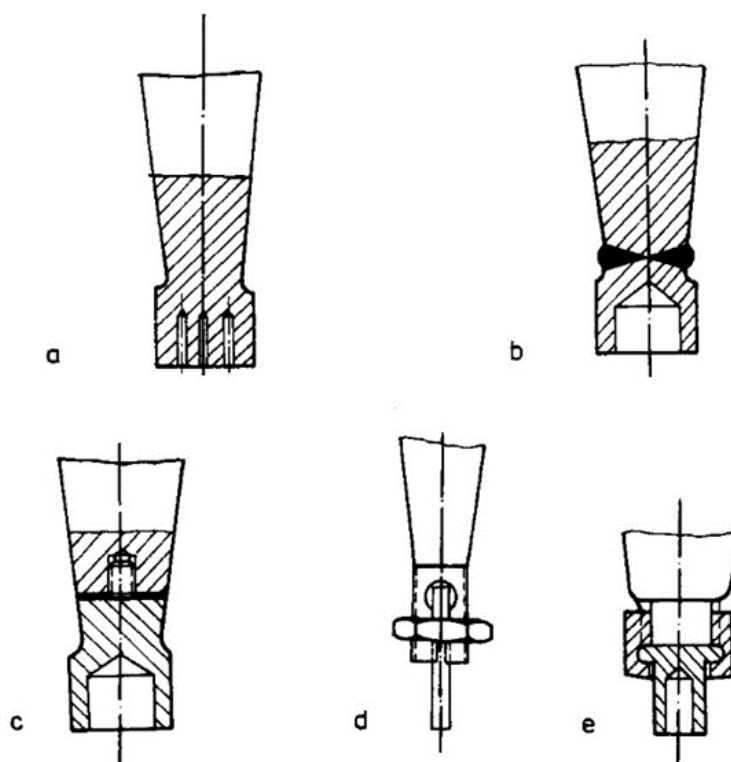
Během obráběcího procesu přichází nástroj do přímého styku s brusivem. Ultrazvukový nástroj spolu s koncentrátorem musí být zkonstruovány tak, aby nenarušovali rezonanční režim ultrazvukové soustavy. Připevnění vlastního nástroje ke koncentrátoru může být pevné nebo rozebíratelné (viz obr. 3.5).

Pevné spojení umožňuje nejpresnější a nejspolehlivější obrábění, je však ekonomicky nákladnější a v některých případech je velmi obtížné takovýto nástroj zhotovit. Další nevýhodou je, že po opotřebení vlastního nástroje se musí vyměnit celý nástroj za nový.

Rozebíratelné spojení je možno zhotovit našroubováním, uchycením v kleštině pomocí matice, uchycením převlečnou maticí, apod. (viz obr. 3.5) Šroubové spoje lze pojistit měkkým pájením. Jednotlivé spoje mohou ovlivňovat mechanicko-akustickou vazbu, jakož i přenos ultrazvukových kmitů. Proto se nástroje s rozebíratelným spojem používají zejména při menších amplitudách kmitů.

Materiál nástroje se volí podle druhu materiálu, který se má obrábět. Zejména se přihlíží na obrobiteľnost a výrobní požadavky. Nástroje jsou vyrobeny z houževnatých materiálů, které jsou dostatečně odolné proti broušení, z důvodu co nejmenšího opotřebování, které je od nástroje vyžadováno. Pro opracování velmi tvrdých materiálů (sklo, křemík, polodrahokamy, ferit apod.) nejlépe vyhovují konstrukční a korozivzdorné oceli, např. 11 500, 11 600, 12 060, 14 220, 14 260 a některé oceli třídy 17.

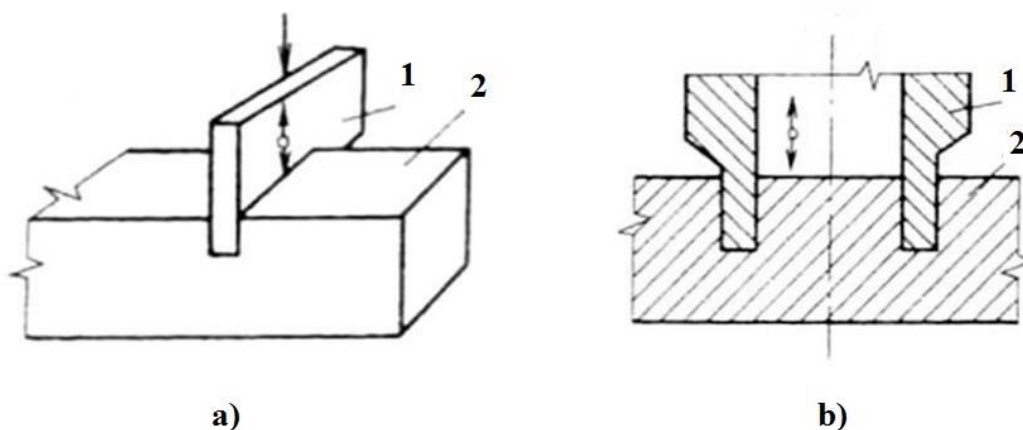
Na opracování přírodních a umělých minerálů, diamantů apod. se používají nástroje ze spékaných karbidů nebo nástroje s impregnovaným diamantovým brusivem, které jsou značně odolné vůči opotřebení [1].



Obr. 3.5 Připojení vlastního nástroje ke koncentrátoru: a, b) pevné (nerozebíratelné) spojení, c, d, e) rozebíratelné spojení, c) šroubem, d) sevření maticí, e) převlečnou maticí [1].

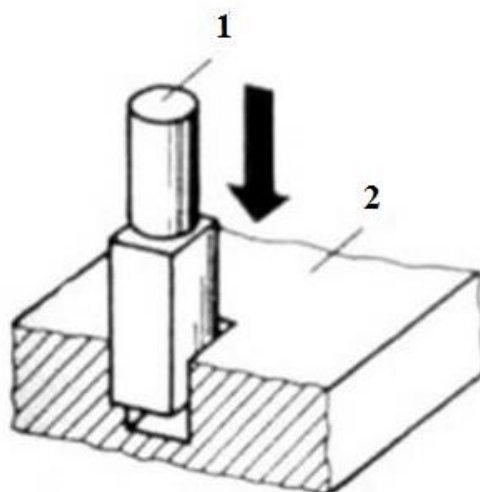
3.1.3 Použití ultrazvukového obrábění abrazivní suspenzí

Ultrazvukové obrábění je možné použít pouze na opracování křehkých a tvrdých materiálů. Mezi základní aplikace patří dělení materiálu, hloubení průchozích a neprůchozích děr, hloubení dutin (viz obr. 3.7), zhotovování reliéfních obtisků a gravírování tvrdých a křehkých materiálů. Na obr. 3.6 je znázorněno ultrazvukové řezání a hloubení průchozích otvorů. Ultrazvukovým řezáním se dají řezat tvrdé materiály (křemen, rubín apod.) do tloušťky 5 mm, tloušťka nástroje se pohybuje v rozmezí 0,1 – 0,8 mm. Hloubení průchozích otvorů lze provádět u materiálů do tloušťky až 10 mm [34].



Obr. 3.6 Technologické aplikace ultrazvukového obrábění [34]:
1 – nástroj, 2 – obrobek, a) ultrazvukové řezání, b) ultrazvukové hloubení průchozích otvorů.

Sklářský průmysl využívá ultrazvukové obrábění ke zpracování dekoračního, užitkového a technického skla, dále například na vrtání otvorů do stupnic měřících přístrojů a upichování malých kotoučů pro optické čočky.



Obr. 3.7 Ultrazvukové hloubení nerotační dutiny [34].

Ultrazvukové obrábění abrazivní suspenzí lze využít při obrábění grafitových forem na výrobu diamantových korunek, na obrábění perleti pro ozdobné přívěsky a jiné dekorační účely (obr. 3.8). Dále se dají opracovávat umělé minerály určené pro technické účely (ložiska a průvlaky) a drahokamy, kde se využívá ultrazvukové řezání, gravírování, a hloubení zápusťkových ploch k vyplnění drahými kovy [1].



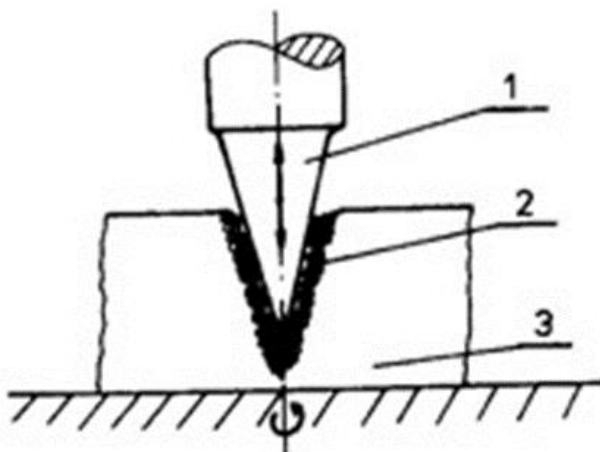
Obr. 3.8 Diamantová korunka české miss 2013 [41].

K opracování drahokamů a diamantů, gravírování skla, výrobě polovodičových součástek lze využít ultrazvukové vrtačky (viz obr. 3.7).



Obr. 3.9 Ultrazvuková vrtačka USM 150 [35].

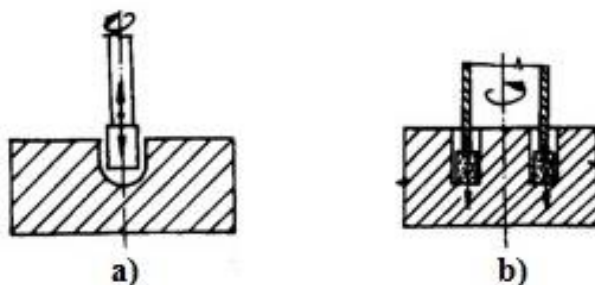
Experimentální využití ultrazvukového obrábění k obnovení opotřebovaných průvleků ze spékaných karbidů a diamantů na tažení drátů. Princip obrábění průvleků je stejný jako samotné ultrazvukové obrábění doplněné tím, že opracováváný průvlek se otáčí rychlostí $80 - 100 \text{ min}^{-1}$. Ultrazvukové kmity vrtací jehly s frekvencí $20 - 25 \text{ kHz}$ a amplitudou výchylky $20 - 30 \text{ }\mu\text{m}$ prostřednictvím diamantového brusiva nebo brusiva z karbidu bóru za spolupůsobení rotace průvleku vytvářejí otvor požadované velikosti a tvaru (viz obr. 3.10). Ve srovnání s klasickou metodou dochází k úspoře pracovního času a úsporám diamantového brusiva a to o $20 - 30 \text{ }\%$ [1].



Obr. 3.10 Princip ultrazvukového opracování průvleku [1]:
1 – ultrazvukový nástroj – brousící jehla, 2 – brusivo, 3 – průvlek.

3.2 Ultrazvukové vrtání brousícími diamantovými nástroji

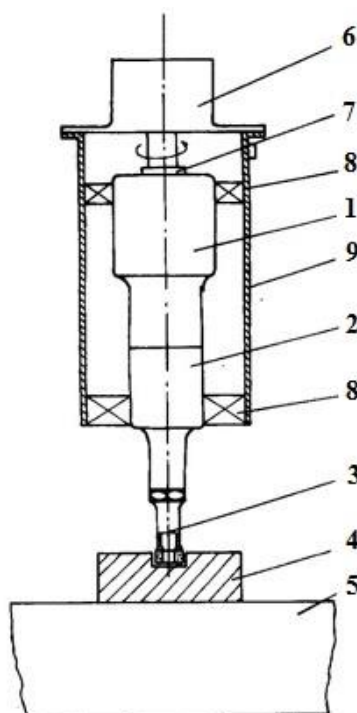
Ultrazvukové vrtání pomocí brousících diamantových nástrojů představuje speciální způsob broušení materiálu (viz obr. 3.12), při kterém se diamantový nástroj otáčí a současně axiálně kmitá. Brousící nástroje mají rotační tvar s plným nebo trubkovitým průřezem (viz obr. 3.11). Ultrazvukový brousící nástroj se otáčí konstantními otáčkami v rozsahu $50 - 20\,000 \text{ min}^{-1}$. Směrem k řezu je nástroj přisouván stálou silou. V místě broušení je obráběný materiál i nástroj chlazen chladicí kapalinou (obvykle vodou). Chladicí kapalina se používá také kvůli vyplavování obroušeného materiálu na povrch [1].



Obr. 3.11 Princip ultrazvukového vrtání [1]:

- a) vrtání s ultrazvukovým rozkmitáním diamantového nástroje ve směru hlavního řezného pohybu,
- b) vrtání jádra korunkovým diamantovým brousícím nástrojem.

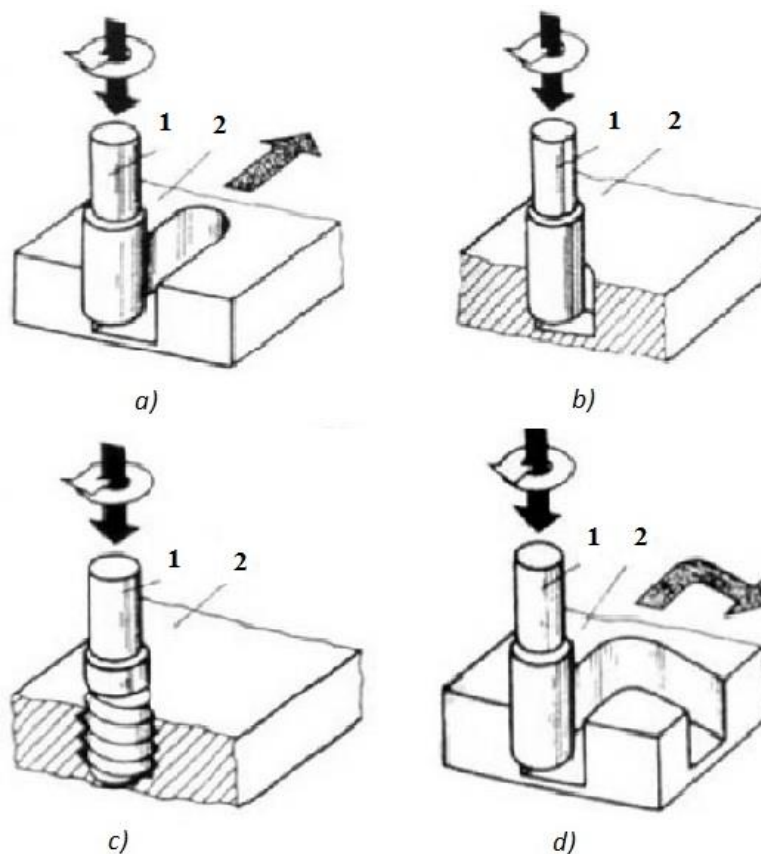
Výhodou ultrazvukového rotačního vrtání je schopnost obrábět nejen těžkoobrobitelné materiály, ale i kovy – titan apod. Proti klasickému rotačnímu vrtání má tato metoda výhodu, že při vrtání není nutné vytahovat vrták, kvůli odstranění třísek. Tím se zvyšuje rychlost vrtání na 2 – 6 násobek, zlepšuje se přesnost vrtání otvoru, prodlužuje se životnost vrtáku a snižují se náklady na vykonanou operaci.



Obr. 3.12 Ultrazvuková hlavice pro rotační obrábění diamantovými nástroji [1]:

- 1 – ultrazvuková hlavice, 2 – koncentrátor, 3 – diamantový nástroj, 4 – obrobek, 5 – pracovní stůl, 6 – motor,
- 7 – elektrický přívod, 8 – ložisko, 9 – kryt.

Ve srovnání s konvenčním ultrazvukovým obráběním s volným brusivem nelze díky rotačnímu pohybu vrtáku vyhotovovat otvory rozmanitých a složitých tvarů (viz obr. 3.13).



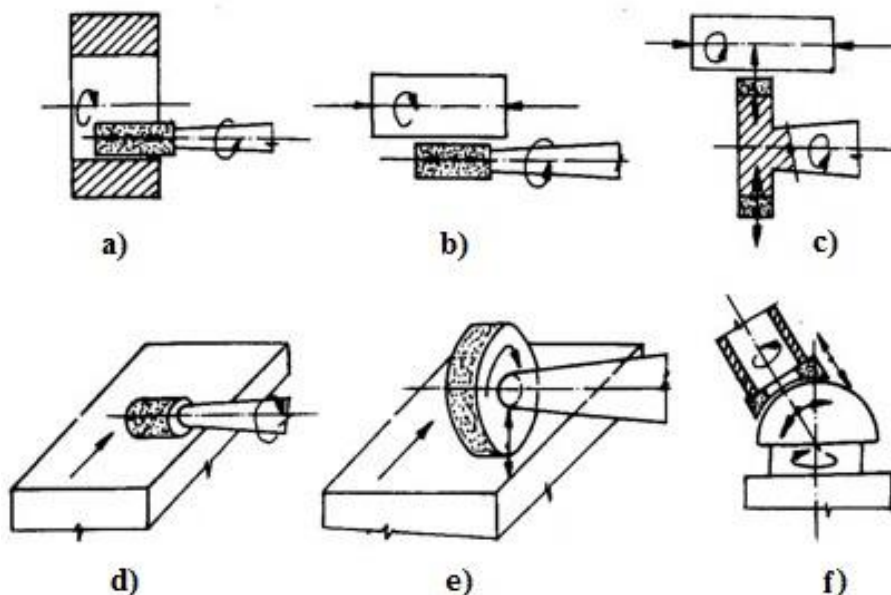
Obr. 3.13 Příklady ultrazvukového vrtání brousícími diamantovými nástroji [34]:
a) otevřené drážky, b) kruhové díry, c) závity, d) průchozí drážky, 1 – nástroj, 2 – obrobek.

Hlavní technologické parametry tohoto procesu jsou totožné s konvenčním ultrazvukovým obráběním. Vystupují zde navíc rotační rychlost, krouticí moment a vlastnosti brousícího nástroje. Proces neoptimálněji probíhá při frekvenci přibližně 20 kHz až 40 kHz a při amplitudách výchylek do 12 μm .

Brousící nástroje jsou impregnovány diamantovým brusivem. Touto metodou lze obrábět nejrůznější materiály: sklo, keramika, polodrahokamy, slinuté karbidy, složené materiály (bór epoxid, bór epoxid – hliník). Ve srovnání s konvenčním ultrazvukovým obráběním je ultrazvukové rotační obrábění rychlejší (cca 30 – 50x) a přesnější (hodnota R_a dosahuje hodnot pod 0,4 μm). Běžně lze vrtat do keramiky cca do hloubky 75 mm a do skla přibližně 300 mm dlouhý otvor s průměrem 1,5 mm [1].

3.3 Ultrazvukové broušení

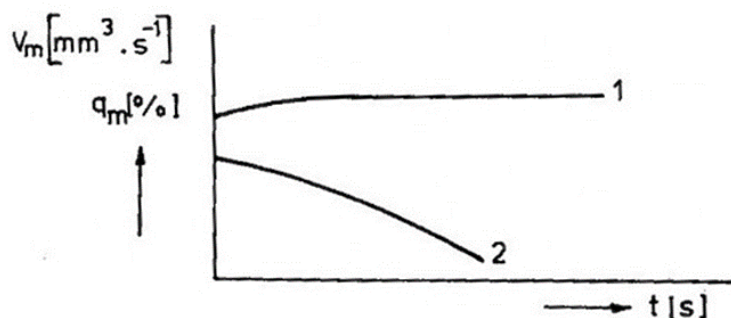
Technologie ultrazvukového broušení tvrdých, křehkých a těžko obrobitelných materiálů otáčejícími se a ultrazvukem rozkmitávanými broušicími nástroji (obr. 3.14) umožňuje zvýšení produktivity a zintenzivnění technologického procesu broušení, zejména působením ultrazvukových kmitů s vysokou intenzitou v místě řezu broušeného zrna. Vlivem ultrazvuku vzniká v procesu broušení nepřetržitá obnova řezných vlastností broušicího nástroje.



Obr. 3.14 Principy ultrazvukového broušení [1]:

- a) broušení otvorů axiálně kmitajícím broušicím nástrojem, b) broušení povrchu axiálně kmitajícím broušicím nástrojem, c) broušení povrchu radiálně kmitajícím broušicím nástrojem, d) rovinné broušení axiálně kmitajícím broušicím nástrojem, e) rovinné broušení radiálně kmitajícím nástrojem, f) broušení sférických ploch miskovitým broušicím diamantovým nástrojem.

Díky účinkům ultrazvukových kmitů v průběhu broušení diamantovými broušicími nástroji, má proces broušení konstantní intenzitu a hodnota objemového úběru materiálu V_m se nemění. To znamená, že vlivem ultrazvuku zůstává řezivost (broušící schopnost) broušícího kotouče konstantní. Tuto důležitou charakteristickou vlastnost ultrazvukového broušení lze vidět na obr. 3.15 [1].

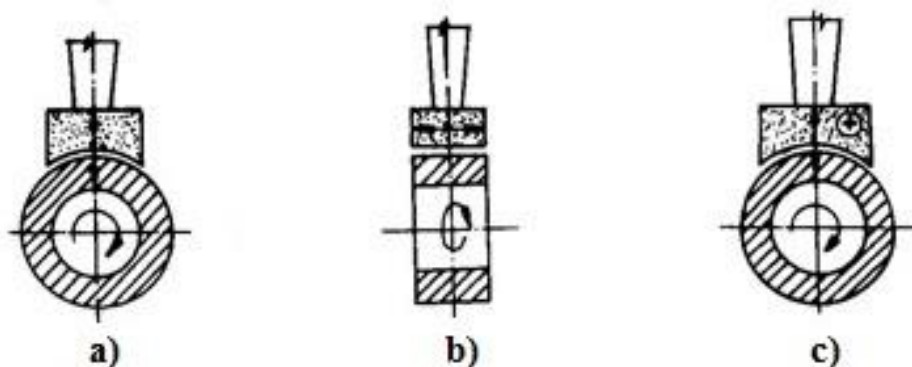


Obr. 3.15 Všeobecná experimentální závislost hodnoty objemového V_m a specifického q_m úběru materiálu na čase t [1]:

- 1 – broušení za působení ultrazvukových kmitů, 2 – broušení bez působení ultrazvukových kmitů.

3.4 Ultrazvukové honování a superfinišování

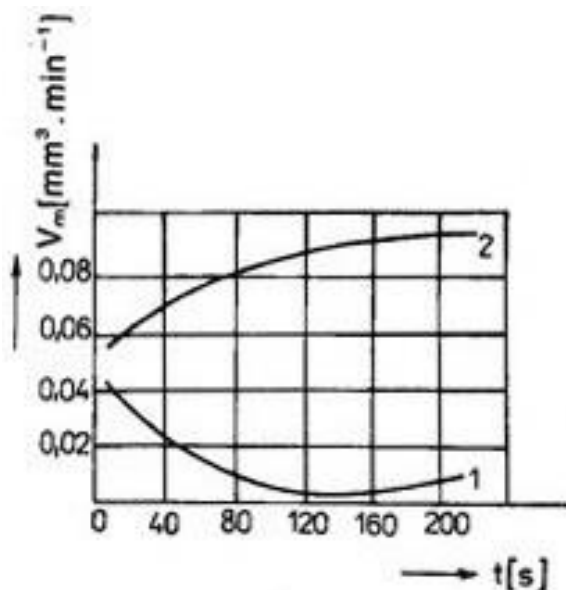
Z dalších aplikovaných metod ultrazvuku na procesy broušení při dokončovacích operacích přesných rotačních ploch je technologie ultrazvukového honování a superfinišování (obr. 3.16).



Obr. 3.16 Principy ultrazvukového honování a superfinišování [1]:

a) honování kamenem kmitajícím kolmo na honovací plochu, b) honování kamenem kmitajícím rovnoběžně s honovací plochou, c) superfinišování kamenem rozkmitaný ultrazvukem kolmo na plochu.

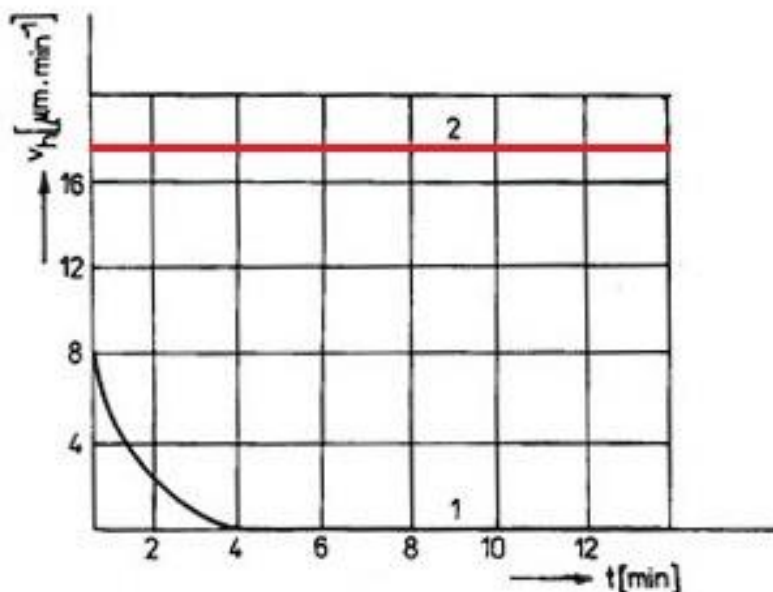
Experimentálními zkouškami bylo zjištěno, že pod vlivem ultrazvuku proces broušení, honování a superfinišování permanentně pokračuje, a to i bez postupného poklesu efektu řezání brousícími zrna. Celý proces probíhá za téměř konstantních a podstatně zvýšených hodnot řezivosti honovacích a superfinišovacích kamenů. Ze závislosti (viz obr. 3.17) vyplývá vysoce příznivý vliv ultrazvuku na proces broušení při honování diamantovým brusivem. Při ultrazvukovém honování se totiž zvyšuje hodnota objemového obroušení materiálu V_m , a to až 18x oproti klasickému honování [1].



Obr. 3.17 Ultrazvukového honování Ti slitiny VT8 [1]:

1 – klasické honování, 2 – ultrazvukové honování,
závislost objemového obroušení V_m na čase t , honování brousícími kameny ASB 100/80 M1, 100%, rychlost broušení 30 m. min⁻¹, statické zatížení nástroje 5. 10⁴ Pa, chladicí kapalina kerosin, rychlost vratného pohybu 8 m. min⁻¹.

Vliv ultrazvuku na proces superfinašování je také vysoce produktivní a umožňuje dosáhnout zkrácení pracovního času (viz obr. 3.18), podstatné zvýšení přesnosti geometrického tvaru superfinašovací plochy při dosáhnutí vysoké kvality povrchu.



Obr. 3.18 Ultrazvukového superfinašování ložiskových kroužků [1]:

1 – klasické superfinašování, 2 – ultrazvukové superfinašování, závislost rychlosti obroušení v_h na čase t , otáčky obrobku 400 ot. min^{-1} , specifický tlak brousících kamenů $1,8 \text{ MPa}$.

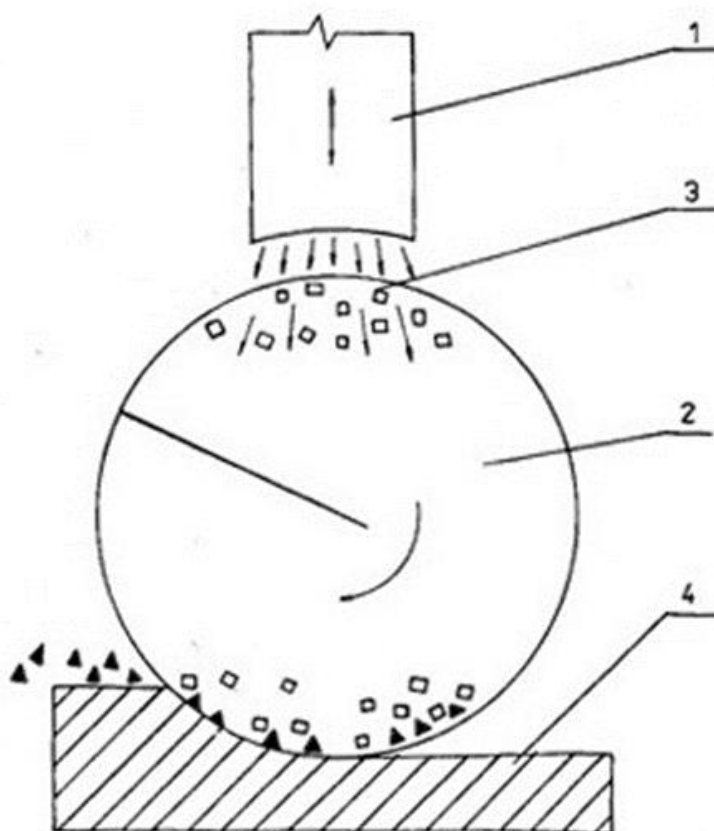
Při experimentálním superfinašování ložiskových kroužků, kdy superfinašovací kamen vykonává základní kývavý pohyb $600 - 1000$ kyvů za min a současně je rozkmitán kolmo na osu kývavého pohybu v ultrazvukovém frekvenčním pásmu s amplitudou výchylky několik μm se zjistilo, že vlivem ultrazvuku nabývá superfinašovací kamen další řezné vlastnosti a umožňuje vykonávat operaci superfinašování jedním druhem tvrdšího superfinašovacího kamenu v jednom pracovním cyklu [1].

3.5 Ultrazvukové čištění brousicího kotouče

Pro zachování řezných podmínek brousicího kotouče je nezbytné, aby povrch kotouče byl dostatečně čistý a dosahoval stále stejných řezných vlastností. Toho lze dosáhnout čištěním brousicího kotouče za chodu. Pro tyto účely se dá použít ultrazvukové čištění, které soustavně udržuje čistotu povrchu kotouče. Což má za následek zlepšení brousicího procesu.

Ultrazvukový čistící proces je znázorněn na obr. 3.19. Při čištění se využívá účinků ultrazvukové kavitace, která průběžně odstraňuje nečistoty, které jsou při broušení nanášeny na povrch kotouče. Při vhodném umístění ultrazvukového čistícího nástroje k brousicímu kotouči lze dosáhnout jeho soustavnému čištění. Čištění probíhá za pomoci chladicí kapaliny, která je vháněna pod tlakem přes otvor v ose čistícího nástroje přímo na povrch brousicího kotouče.

Experimentálně bylo zjištěno, že ultrazvukové čištění několikanásobně zvyšuje životnost brousicího kotouče. Díky čemuž se zvýšila produktivita práce a také kvalita povrchu [1].



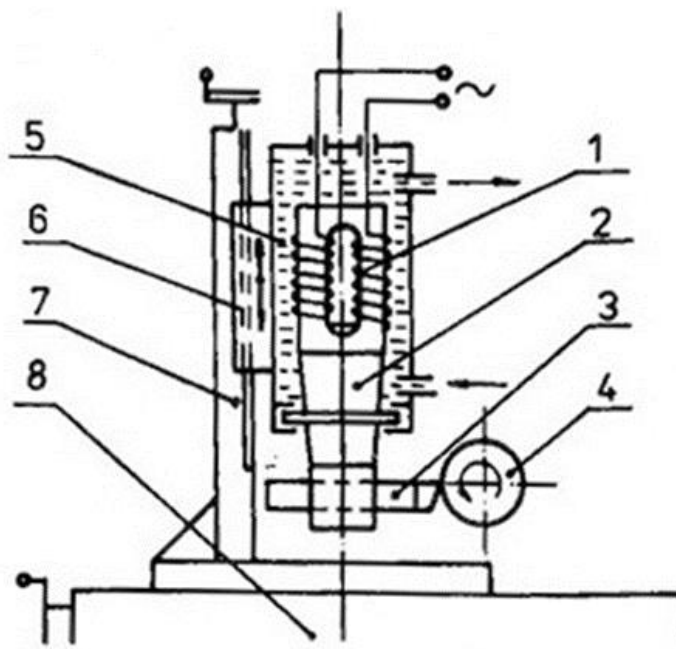
Obr. 3.19 Princip ultrazvukového čištění brousicího kotouče [1]:

1 – ultrazvukový čistící nástroj, 2 – brousicí kotouč, 3 – ultrazvukový čistící proces, 4 – obrobek.

3.6 Vliv ultrazvuku na procesy třískového obrábění

Efektivnost vlivu ultrazvuku na proces řezání třísky závisí na více faktorech: amplitudy a frekvence kmitů, poměru rychlosti kmitání k obvodové rychlosti opracovávané součástky, průřezu třísky, fyzikálně-mechanických vlastností obráběného materiálu a nástroje.

K řezání kovů s nuceně rozkmitaným nástrojem s frekvencí okolo 20 kHz (obr. 3.20) se soustružnický nůž 3 nebo fréza připájí natvrdo nebo se upevňuje k přenosovému članku (koncentrátoru) 2, který je spojen s ultrazvukovým měničem 1. Celá kmitající soustava je pevně připojena k upínači 5 a nosnému rámu 7 obráběcího stroje.



Obr. 3.20 Ultrazvuková hlavice s obráběcím nožem [1]:

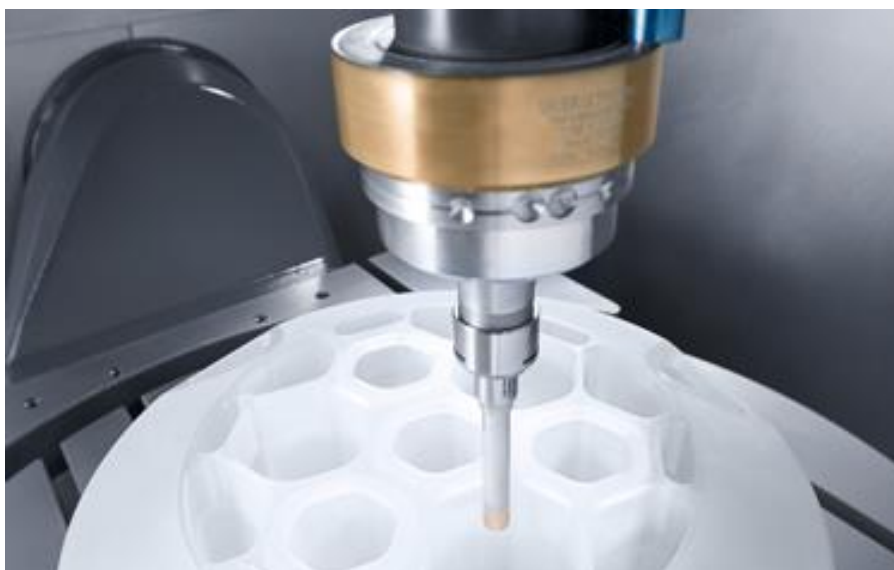
1 – ultrazvukový měnič, 2 – koncentrátor kmitů, 3 – rozkmitaný řezný nástroj, 4 – obrobek, 5 – upínač ultrazvukové hlavice, 6 – mechanismus nastavení polohy nástroje, 7 – nosný rám ultrazvukové hlavice, 8 – mechanismy posuvu nástroje do řezu.

V dnešní době je tento vliv hojně využíván. Dá se říci, že moderní obráběcí centra obdařená touto technologií mají daleko větší využití než ultrazvukové obrábění abrazivní suspenzí. Pro obrábění se používají konvenční vyspělé nástroje, které jsou indukčně spojeny s piezoelektrickými elementy vytvářející vysokofrekvenční ultrazvukové kmity (viz obr. 3.21). Tyto ultrazvukové kmity působí při obrábění ve směru řezné rychlosti a pozitivně ovlivňují deformační proces řezání (snižuje se síla potřebná k oddělení materiálu). Oddělování třísky se uskutečňuje v celém rozsahu řezné rychlosti. Stlačení třísky je menší, čímž se zmenšuje zpevnění řezné plochy a zlepšuje se kvalita obrobeného povrchu, která může dosahovat $Ra < 0,1\mu\text{m}$ (v závislosti na obráběném materiálu). Díky nejmodernějším obráběcím centrům a ultrazvukové technologii jsme schopni obrábět těžkoobrobitelné materiály, jako je keramika, optické sklo, korund, nitrid křemíku, oxid zirkoničitý apod. Na příklad u keramiky jsme schopni zhotovit tenkostěnné obrobky o tloušťce $< 0,5\text{ mm}$ (viz obr. 3.22) [1].



Obr. 3.21 Detail vřetena a nástroje – přenos ultrazvukových kmitů pomocí indukce [36].

Způsob třískové obrábění s kmitajícím nožem ultrazvukovou frekvencí je zejména vhodný pro dokončovací operace a obrábění při nižších řezných rychlostech a také při obrábění těžkoobrobitelných materiálů [1].



Obr. 3.22 Obrábění tenkostěnných konstrukcí [36]:
obráběný materiál Zerodur – keramické sklo

3.7 Ultrazvukové odstraňování otřepů – experiment SSSR

Princip metody je založen na využití erozivní aktivity kavitace působící ve vhodné kapalině, která obsahuje asi 40 % brusiva (karbid bóru nebo křemík) při odstraňování otřepů. Proces probíhá v ultrazvukové vaně, která obsahuje zejména vodu a glycerín (40 % glycerín + 60 % voda a brousící prášek). Ke kavitační erozi se v procese odstraňování otřepů přidružují abrazivní účinky brusiva, jejichž velikost má odpovídat velikosti jednotlivých kavitačních explozí. Proces může probíhat při normálním statickém tlaku na kapalinu, ale při zvýšení tlaku na 0,4 až 0,6 MPa se účinek úběru otřepů urychlí a zintenzivní nejméně desetinásobně. Kavitační zárodky se soustřeďují nejvíce v okolí ostrých otřepů, kde je nejnižší přilnavost kapaliny a nejvhodnější podmínky kavitační a brousící eroze, důsledkem čehož je oddělení otřepu od základní součástky.



Obr. 3.23 Hydroabrazivní odstranění otřepů antikoročních trubek v ultrazvukovém poli (před a po) [1].

Při ultrazvukovém odstraňování otřepů se zachovává tvar i přesnost rozměrů opracovávaných součástek (viz obr 3.23), avšak za předpokladu, že rozměry otřepů a součástek jsou dostatečně malé, aby se mohly při opracovávání v ultrazvukové vaně vznášet [1].

4 STROJE PRO ULTRAZVUKOVÉ OBRÁBĚNÍ

Strojů pro ultrazvukové obrábění není mnoho. Mezi ty nejmodernější patří obráběcí centra od renomované firmy DMG/MORI SEIKI, která jako jedna z mála společností vidí v ultrazvukovém obrábění budoucnost. Jedná se o velice kvalitní CNC obráběcí centra doplněné o ultrazvukovou technologii, kde se využívá kmitající nástroj o ultrazvukové frekvenci. Díky tomu lze obrábět velmi tvrdé a křehké materiály. Jednotlivé stroje se od sebe více méně liší velikostí, tuhostí rámu, použitím jiného motoru pro posuv (rotační, lineární), pracovním výkonem, příslušenstvím, apod. Použití ultrazvukové technologie je u všech strojů obdobné. Díky použití ultrazvuku jsou tyto moderní stroje (viz obr. 4.1) ještě více univerzální. Používají se pro třískové obrábění a broušení materiálů všech tvrdostí.

Dále se lze setkat s ultrazvukovými vrtačkami a obráběcími stroji převážně asijských výrobců, které se používají pro výrobu šperků a bižuterie. Pomocí těchto strojů, které využívají ultrazvuku a abrazivní suspenze, lze vrtat, hloubit, tvářit, gravírovat apod.

Vyskytují se i jiné stroje, které využívají vysokofrekvenčního vlnění k obrábění, např. ultrazvuková řezačka nevulkanizované pryže (viz obr. 4.5) [36].

Seznam uvedených strojů:

- Obráběcí centrum DMG/MORI SEIKI ULTRASONIC 50,
- Ultrazvuková vrtačka LUD-200B,
- Ultrazvukový obráběcí přístroj SONIC–MIL Sinker A-10HCV,
- Ultrazvuková řezačka BELSON UCS – 001.

4.1 Obráběcí centrum DMG/MORI SEIKI ULTRASONIC 50



Obr. 4.1 Univerzální obráběcí centrum ULTRASONIC 50 [36].

- 5-osá CNC frézka s ultrazvukovou technologií pro těžko obrobitelné materiály,
- dosažitelná drsnost povrchu až $Ra\ 0,2\ \mu m$,
- až 3x vyšší produktivita oproti konvenčnímu obrábění,
- široký rozsah použití pro měkké, tvrdé, i speciální materiály,
- pevný naklápěcí otočný stůl,
- zásobník nástrojů (až 60 nástrojů),
- přímý měřicí systém, zaručující vysokou přesnost.

Tab. 3 ULTRASONIC 50 – technické údaje [36].

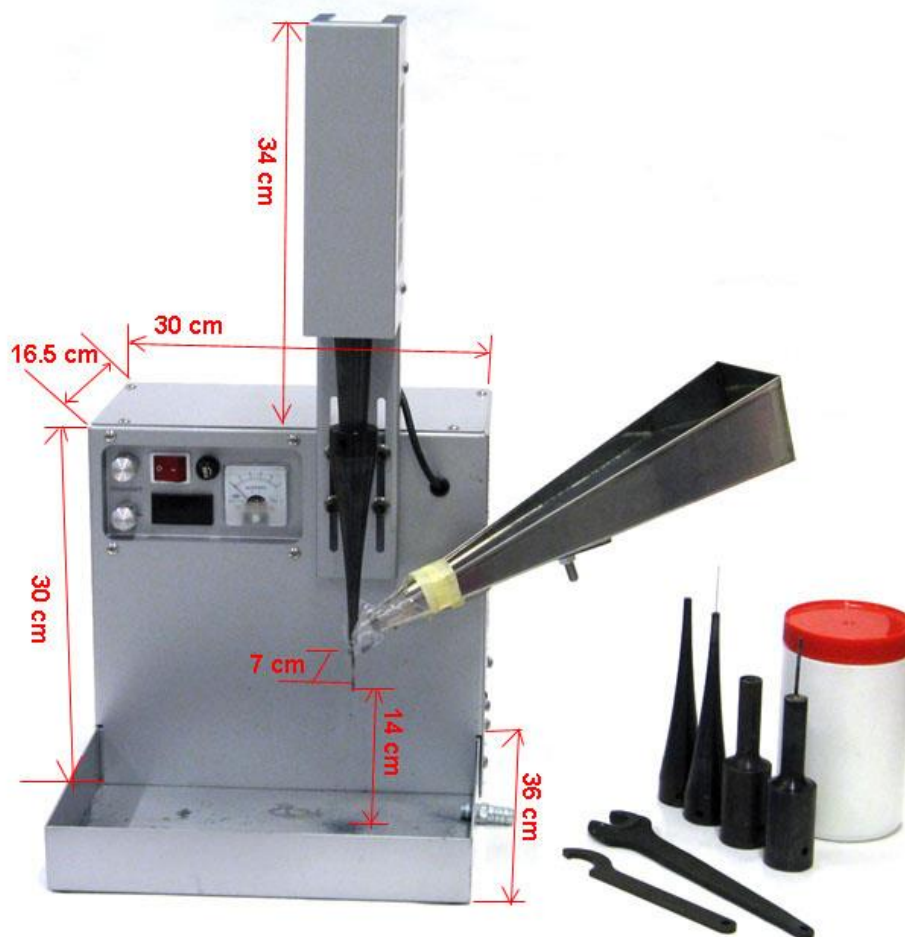
Pracovní rozsah X/Y/Z	mm	500/450/400
Rozsah otáček vřetena	ot.min ⁻¹	20 – 18 000
Výkon motoru vřetena (S1/S6 - 40%)	kW	25/35
Jmenovitý krouticí moment (S6 - 40%)	Nm	130
Rychloposuv	m.min ⁻¹	24
Upínací plocha	mm	ø 630x500
Max. zatížení stolu	kg	200/300
Rozsah otáčení stolu	°	-5/+100
Počet nástrojů v zásobníku		60
Maximální délka nástroje	mm	300
Maximální průměr nástroje	mm	130/80
Hmotnost stroje	kg	4 480
Příkon stroje	kW	21

Příklad použití na obr. 4.2.



Obr. 4.2 Těleso ventilu [36]:
materiál – oxid hlinitý, doba obrábění – 9 h.

4.2 Ultrazvuková vrtačka LUD-200B



Obr. 4.3 Ultrazvuková vrtačka LUD-200B neznámého výrobce [37].

Ultrazvuková vrtačka (viz obr. 4.3) pro vrtání křehkých a tvrdých materiálů (safír, sklo, keramika). Ideální pro výrobu šperků (vrtání děr pro korálky apod.) Dále se s touto vrtačkou dá gravírovat a hloubit různé otvory. Jako brusiva používá karbid křemíku [38].

Tab. 4 Ultrazvuková vrtačka LUD-200B – technické údaje [38].

Napájení (60 Hz)	V	220
Převodník		piezo-elektrický
Frekvence	kHz	20
Výstupní výkon	W	200
Max. průměr díry	mm	20
Hmotnost stroje	kg	20

4.3 Ultrazvukový obráběcí přístroj SONIC–MIL Sinker A-10HCV



Obr. 4.4 Ultrazvukový obráběcí přístroj Sinker Model A-10HCV [39].

Na obr. 4.4 je zobrazen univerzální ultrazvukový přístroj, který je vhodný ke zhotovení malých i dlouhých otvorů, vrtání, gravírování, řezání a tváření. Lze obrábět pouze tvrdé a křehké materiály (karbid boru, grafit, sklo, karbid křemíku, zirkonium apod.). Jako brusiva se používá karbid boru nebo karbid křemíku. Minimální a maximální dosažitelné rozměry závisí na obráběném materiálu, nástroji i kvalitě abraziva [39].

Tab. 5 Ultrazvukový obráběcí přístroj Sinker A-10HCV – technické údaje [39].

Příkon	W	1000
Převodník		piezo-elektrický
Frekvence	kHz	20
Min. průměr díry	mm	0,33
Max. tloušťka díry	mm	170
Max. hloubka díry	mm	400
Dosahovaná přesnost	mm	± 0,1

4.4 Ultrazvuková řezačka BELSON UCS – 001



Obr. 4.5 Ultrazvuková řezací soustava UCS – 001: ultrazvukový generátor, piezo-elektrický měnič a nástroj [40].

Ultrazvuková řezačka BELSON využívá vysokofrekvenční vlnění k řezání. Řezání probíhá kmitajícím nástrojem (viz obr. 4.6), který je přitlačován na materiál určitou silou. Tato řezačka je určena k řezání nevulkanizované pryže. Výsledný řez je čistý a hladký, rychlost řezu dosahuje cca 80 mm.s^{-1} [40].



Obr. 4.6 BELSON UCS – 001: různé typy ultrazvukových nástrojů (nožů) [40].

Tab. 6 BELSON UCS – 001: technické údaje [40].

Příkon	W	1000
Převodník		piezo-elektrický
Frekvence	kHz	30
Rychlost řezání	mm.s^{-1}	80
Regulace výkonu	%	40 – 100
Úhel řezu	°	10 – 30
Hmotnost	kg	6

DISKUZE

Experimentální příklady dokázaly, že ultrazvukové obrábění s použitím abrazivní suspenze je velmi účinné pro obrábění těžko obrobitelných materiálů, především velmi tvrdých a křehkých materiálů. Touto metodou lze dosáhnout geometrické přesnosti až 0,01 mm a drsnosti povrchu o hodnotě $R_a = 0,4 \mu\text{m}$. Tímto ultrazvukovým obráběním se dá řezat, hloubit průchozí i neprůchozí otvory, gravírovat, tvářit členité tvary do povrchu materiálu, který je velmi tvrdý a konvenčním obráběním neobrobitelný. I přes tento velký potenciál se tato metoda obrábění téměř nepoužívá. Na internetu se však lze setkat s různými menšími stroji, zejména asijských výrobců, které slouží k opracování drahokamů, diamantů a podobných materiálů, které se používají na výrobu šperků. Metodu ultrazvukového obrábění za pomoci abrazivní suspenze zřejmě vytlačily jiné nekonvenční metody, jako je obrábění laserem, vodním paprskem či plazmatem. Tyto metody mají oproti ultrazvuku výhodu v tom, že při jejich použití nepotřebujeme nástroj, který bývá často velmi členitý a tím pádem velice nákladný. Pro výrobu složitějšího obrobku pomocí ultrazvuku je zapotřebí použít více nástrojů, které se navíc při obrábění opotřebovávají a po určité době je nutné ho vyměnit. Z tohoto důvodu lze konstatovat, že se jedná o velice nákladnou metodu obrábění. A nejspíš proto se ultrazvukové obrábění s abrazivní suspenzí využívá jen při výrobě šperků a podobně malých a tvrdých obrobků, kde dokáže nástroj obrobit celou plochu obráběného materiálu. U těchto výrobků se nejvíce ukazuje efektivnost obrábění ultrazvukem abrazivní suspenzí, a proto se tato metoda používá.

Ultrazvukového obrábění abrazivní suspenzí bylo experimentálně použito k obnovení opotřebovaných průvlaků ze spékaných karbidů a diamantů určených na tažení drátů. Bylo dosaženo úspory pracovního času a úspory diamantového brusiva o 20 – 30 %.

Vliv ultrazvuku na procesy třískového obrábění i broušení materiálu se projevil velmi pozitivně, díky čemuž se používá v některých univerzálních CNC obráběcích center.

Při broušení rozkmitaným nástrojem lze také využít ultrazvukového čištění kotouče, které soustavně udržuje čistotu povrchu kotouče. Což má za následek zlepšení broušícího procesu.

Experiment z bývalého SSSR ukazuje využití ultrazvuku a jeho kavitačních účinků v kapalině k odstraňování otřepů. Tato metoda se ovšem nerozšířila. V dnešní době se pro tyto účely používá metoda termického odstraňování otřepů.

ZÁVĚR

Využití ultrazvuku je nepřehledné množství a s jeho aplikacemi se lze setkat v mnoha oborech. V technické praxi se používá především v defektoskopii, ke svařování plastů, k čištění povrchu a také pro měření různých veličin. V medicíně se používá zejména pro sonografické vyšetření lidského těla, k liposukci, k terapeutickým zákrokům apod. V námořnictví se používá sonar, který dokáže skenovat prostředí pod hladinou vody. Všechny tyto aplikace jsou hojně rozšířeny a využívány.

To se však říci nedá o ultrazvukovém obrábění. Jedinou světlou výjimkou je celosvětově známá společnost DMG/MORI SEIKI, která implementovala ultrazvukovou technologii do svých moderních obráběcích center. Jedná se tedy o metodu třískového obrábění a broušení, kde se využívá pozitivních účinků axiálně kmitajícího nástroje.

Lze konstatovat, že pro obrábění se v dnešní době uplatňuje ultrazvuk k axiálnímu rozkmitání nástroje, které nám umožňuje při použití konvenčních metod obrábění dosahovat lepších výsledků. Zejména se zkracuje pracovní čas, dají se obrábět velmi tvrdé a křehké materiály, dosahuje se vyšší přesnosti a nižší drsnosti materiálu. Je velmi pravděpodobné, že se tato metoda obrábění za pomoci ultrazvuku bude nadále rozvíjet, protože touto metodou lze obrobít téměř každý materiál a uplatnění obrobků z velmi křehkých a tvrdých materiálů bude stále narůstat.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ŠVEHLA, Štefan a Zdenko FIGURA. *Ultrazvuk v technologii*. 1.vyd. Bratislava: Alfa, 1984, 521 s.
- [2] Ultrazvuk. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2008-2013, 2013-03-16 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ultrazvuk>
- [3] SVOBODA, Viktor. Fyzikální popis vlnění. In: *Ultrazvuk.cz* [online]. 2003 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://www.ultrazvuk.cz/art_stat.php?art=34&app=1&PHPSESSID=76350ec99a32d394e5ac90f1bdb5864c
- [4] Piezoelektrický jev. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2005-2013, 2013-03-08 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Piezoelektrický%BD_jev
- [5] Elektrostrikce. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2009-2012 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrostrikce>
- [6] Piezoelektrický jev: Vysvětlení jevu. In: *Fyzika.jreichl.com* [online]. © 2006-2013 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/419-vysvetleni-jevu>
- [7] Piezoelektrický jev. In: *Fyzmatik.pise.cz* [online]. 23. srpen 2008 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/573-piezoelektricky-jev.html>
- [8] Dopplerův jev. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2005-2013 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Doppler%C5%AFv_jev
- [9] KUSALA, Jaroslav. Dopplerův jev. In: *Army.cz* [online]. Vzdělávací a osvětový program pro Ministerstvo obrany ČR, 2008 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/k14.htm
- [10] KADLEC. 5-FPBT09-Hladina.doc: Ultrazvukové hladinoměry. In: *Vscht.cz* [online]. 3.3.2009 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/predn/txt-Mgr/5-FPBT09-Hladina.pdf>
- [11] KADLEC, Karel. Snímače polohy hladiny: principy, vlastnosti a použití (část 2). In: *Odbornecasopisy.cz* [online]. ústav fyziky a měřicí techniky VŠCHT Praha, © 2013 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30540
- [12] Ultrazvukové měření hladiny: FMU 40/41/43. In: *Prutoky.cz* [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://www.prutoky.cz/kapaliny/otevrene-systemy/senzory/fmu-40-41-43>
- [13] STRNADOVÁ, M. Možnosti nedestruktivního zkoušení svarových spojů s ohledem na typ porušení[online]. Pardubice, 2008 [cit. 2012-04-11]. Dostupné z: <http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/29517/1/text.pdf>

- [14] KOPEC, B. a kol. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. Brno : CERM, 2008. 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4
- [15] MACHEK, V.; SODOMKA, J. Nauka o materiálu: Kovy a kovové materiály. 2. část. 1. vyd. Praha : ČVUT, 2002. 213 s. ISBN 80-01-02568-3
- [16] MACHEK, V. Zpracování a zkoušení kovových materiálů. Praha : ČVUT, 2011. 157 s. ISBN 978-80-01-04683-8
- [17] PTÁČEK, L. a kol. Nauka o materiálu I. Brno : CERM, s.r.o. 2001. 505 s. ISBN 80-7204-193-2
- [18] ČVUT-FSI. *Teoretický úvod k cvičení z předmětu Technologie I: Hodnocení kvality svarového spoje*. 10 s. Dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/def_kontrola_sv.pdf
- [19] KOVÁČIK, Miloš a Pavol KUČÍK. Ultrazvuková technika TOFD při určení hloubkových rozměrů vad. In: *Ndttrade.cz* [online]. Bratislava, Slovensko [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://www.ndttrade.cz/UserFiles/File/ut%20technika%20tofd%20oprava.pdf>
- [20] Měření průtoku a proteklého množství. In: *Uprt.vscht.cz* [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k45-prut.htm#k45>
- [21] Ultrazvukové průtokoměry kapalin. In: *Elis.cz* [online]. © 2011 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://www.elis.cz/cs/ultrazvukove-prutokomery.html>
- [22] DVOŘÁK, Jaroslav. Nedestruktivní zkoušení – Měření tloušťky ultrazvukem. In: *Tlakinfo.cz* [online]. 2.11.2006 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1306>
- [23] Digitální ultrazvukový tloušťkoměr UTG-140D. In: *Jirkaspol.cz* [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://www.jirkaspol.cz/digitalni-ultrazvukovy-tloustkomer-pro-mereni-pres-naterove-vrstvy-utg140d--utg141d.html>
- [24] Ultrazvuková metoda. In: TESTIMA, s.r.o. *Testima.eu* [online]. Praha 9 Horní Počernice, © 2011 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://www.testima.eu/prilohy/148/uci%20metoda.pdf>
- [25] Měření tvrdosti přenosnými tvrdoměry. In: TESTIMA, S R.O. *Testima.eu* [online]. Praha 9 Horní Počernice, © 2011 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://www.testima.eu/prilohy/174/tvrdost.pdf>
- [26] Ultrazvukové měření netěsností. In: *Kadrle.cz* [online]. [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://www.kadrle.cz/mereni-ultrazvuk.php>
- [27] KADLEC, Karel. Provozní snímače hustoty kapalin: část 1. *Odbornecasopisy.cz* [online]. 2011, č. 1, s. 5 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42735.pdf>

- [28] Měření složení: Měření hustoty kapalin. *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze: ústav počítačové a řídicí techniky* [online]. [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k46-sloz.htm#k46>
- [29] Lékařská ultrasonografie. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/L%C3%A9ka%C5%99sk%C3%A1_ultrasonografie
- [30] PAVLIS, Jakub. Bezdotykové ovládání - do roka a do dne?. In: *Notebook.cz* [online]. 5. 12. 2012 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://notebook.cz/clanky/technologie/2012/Bezdotykov%C3%A9-ovladani-Elliptic-Labs>
- [31] Aplikace ultrazvuku. In: *Army.cz* [online]. [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: http://www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/k13.htm
- [32] MORALES, Elizabeth. Sonar images. In: *Images.yourdictionary.com* [online]. © 1996-2013 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://images.yourdictionary.com/sonar>
- [33] VUT V BRNĚ. *DTB Technologie obrábění: DOKONČOVACÍ METODY OBRÁBĚNÍ A VYBRANÉ NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ*. Brno. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>
- [34] Nekonvenční metody obrábění – 3. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 18.12.2007, roč. 2007, č. 12 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-3-dil.html>
- [35] USM 150 Ultrasonic machine. *K & K ENGINEERS* [online]. [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.knkengineers.com/>
- [36] ULTRASONIC Series. In: *DMG MORI SEIKI* [online]. © 2013 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://en.dmgmori-seiki.com/sites/en/downloadcenter>
- [37] The ultrasonic drilling machine. *Free-form.ch* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.free-form.ch/tools/ultrasonicdrill.html>
- [38] CUTTING EDGE SOLUTIONS. In: *Cesdiamondtools.com* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.cesdiamondtools.com/ultrasonicdrills.html>
- [39] Welcome to Sonic-Mill. *SONIC-MILL: MACHINING THE UNMACHINABLE* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.sonicmill.com/>
- [40] ULTRASONIC CUTTING. [online]. [cit. 2013-05-23]. Soubor dostupný z: <http://www.belson-sk.sk/produkty/ultrazvukove-rezanie/>
- [41] Korunka české miss 2013. [online]. [cit. 2013-05-23]. Obrázek dostupný z: <http://brnensky.denik.cz/galerie/ceska-miss2013.html?mm=4361576>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
2D	[-]	dvojměrný prostor
3D	[-]	trojměrný prostor
4D	[-]	trojměrný prostor v závislosti na čase
A mód (<i>Amplitude mode</i>)	[-]	mód zobrazující amplitudy odražených signálů
B mód (<i>Brightness mode</i>)	[-]	mód zobrazující odstíny šedi
CNC	[-]	číslicové řízení pomocí počítače
CW mód (<i>continuous wave</i>)	[-]	mód nepřetržitého vlnění
L	[-]	podélná vlna
M3	[-]	zvlášť jemné brusivo o střední velikosti zrna cca 2 μm
M32	[-]	zvlášť jemné brusivo o střední velikosti zrna cca 17 μm
M mód (<i>Movement mode</i>)	[-]	mód zobrazující pohyblivé struktury
P	[-]	ultrazvukový přijímač
PW mód (<i>pulsed wave</i>)	[-]	mód pulzujícího vlnění
T	[-]	příčná vlna
TGT (Touchless Gesturing Technology)	[-]	technologie bezdotykových gest
UCI	[-]	ultrazvuková metoda měření tvrdosti
V	[-]	ultrazvukový vysílač

Symbol	Jednotka	Popis
A_{ξ}	[μm]	amplituda výchylky
D	[mm]	průměr
E_p	[Pa]	modul pružnosti v tahu
F	[N]	síla
I_a	[W.m ⁻²]	intenzita vlny
L	[m]	vzdálenost
N	[m]	vzdálenost mezi počátečním a poruchovým echem

R_a	[μm]	střední aritmetická hodnota drsnosti
R_o	[-]	koeficient odrazu
T	[°C]	teplota
T	[s]	perioda
V_m	[mm ³ .min ⁻¹]	úběr materiálu
Y	[m]	vzdálenost vady od povrchu
Z_o	[Pa.s.m ⁻¹]	akustický vlnový odpor
c	[m.s ⁻¹]	rychlost šíření vlnění v prostředí
d	[mm]	vnitřní průměr
f	[Hz]	frekvence
h	[mm]	tloušťka
h	[m]	výška
k	[mm.min ⁻¹]	konstanta zahrnující několik součinitelů
p_a	[Pa]	celkový atmosférický tlak
t	[s]	čas
t_x	[-]	kritérium křehkosti
v	[m.s ⁻¹]	rychlost
v_h	[mm.min ⁻¹]	rychlost obrábění (obroušení)
α, β, γ	[°]	úhel
β_{ad}	[Pa ⁻¹]	adiabatický koeficient stlačitelnosti
β_{iz}	[Pa ⁻¹]	izotermický koeficient stlačitelnosti
λ	[s]	vlnová délka
μ	[-]	Poissonovo číslo
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota
σ_p	[Pa]	pevnost v tahu
τ_p	[Pa]	pevnost ve stříhu
χ	[m ⁻¹ .kg.s ⁻²]	Poissonova konstanta