



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

PIEZOELEKTŘINA V TECHNICKÉ PRAXI

PIEZOELECTRICITY IN TECHNICAL PRACTICE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lenka Škarabelová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

BRNO 2016

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**
Ústav elektrotechnologie

Studentka: Lenka Škarabelová

ID: 164418

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Piezelektřina v technické praxi

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte fyzikální základy piezoelektrického jevu a možnosti jeho aplikace v technické praxi. Zaměřte se na možnost využití v oblasti piezoelektrických rezonátorů a ultraakustiky. Seznamte se s využitím pro měření malých hmotnostních změn u Elektrochemických křemenných krystalových mikrovah (EQCM) a s možností využití piezoelektrických zdrojů ultrazvuku v komerčním ultrazvukovém zařízení fy. Olympus. Zaměřte se zejména na oblast ultrazvukové defektoskopie. Proveďte doporučená měření a sepište zprávu o dosažených výsledcích.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího bakalářské práce

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 2.6.2016

Vedoucí práce: prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Bakalářská práce se věnuje prostudování principu a možnosti využití piezoelektrického jevu. Jelikož využití piezoelektrického jevu v elektrotechnice je velmi rozsáhlé, hlavní zaměření je tu kladeno na možnosti využití tohoto jevu v oblasti piezoelektrických rezonátorů a ultraakustiky.

Dalším bodem této práce je praktické a teoretické seznámení s měřením malých hmotnostních změn pomocí elektrochemických křemenných krystalových mikrovah (EQCM), dále také s ultrazvukovým zařízením od firmy Olympus a ultrazvukovou defektoskopií pro detekci možných necelistvostí v materiálu a jejich vyhodnocení.

Klíčová slova

Piezoelektrický jev, Piezoelektrické materiály, Piezoelektrický jev v technické praxi, Piezoelektrické rezonátory, Ultraakustika, Elektrochemické křemenné krystalové váhy (EQCM), Ultrazvuková defektoskopie.

Abstract

Bachelor's thesis is dedicated to the study of the principle and possibilities of use of the piezoelectric effect. Since the use of piezoelectric effect in electrical engineering is very extensive, the main focus is placed on the ability to exploit this effect in the field of ultrasonic and piezoelectric resonators.

Next aim of this work is practically and theoretically to get acquainted with the measurement of small changes in weight, using electrochemical quartz crystal microbalance (EQCM), also with an ultrasonic equipment from company Olympus and ultrasonic defectoscopy for detection of possible imperfections in the material and their evaluation.

Keywords

Piezoelectric effect, Piezoelectric materials, Piezoelectric effect in technical engineering, Piezoelectric resonators, Ultrasonic, Electrochemical Quartz Crystal Microbalance (EQCM), Ultrasonic defectoscopy.

Bibliografická citace mé práce:

ŠKARABELOVÁ, L. *Piezoelektrina v technické praxi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 49 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že moji bakalářskou práci na téma „**Piezoelektrina v technické praxi**“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 2. 6. 2016

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Jiřímu Kazellemu, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

V Brně dne 2.6.2016

.....
podpis autora

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Fyzikální základy piezoelektrického jevu.....	9
2.1 Piezoelektrické materiály.....	9
2.1.1 Křemen	10
2.1.2 Piezoelektrická keramika	10
3. Princip piezoelektrického jevu.....	11
4. Možnosti aplikace piezoelektrického jevu v technické praxi	12
5. Piezoelektrické rezonátory	13
6. Elektrochemické křemenné krystalové váhy (EQCM)	14
7. Ultraakustika	17
7.1 Fyzikální princip ultrazvuku.....	17
7.2 Základní veličiny ultrazvukového pole	17
7.3 Odraz a lom ultrazvukových vln.....	19
8. Rychlost šíření ultrazvuku v různých látkách	20
8.1 Plynné látky	20
8.2 Kapalně látky.....	20
8.3 Pevné látky	21
9. Ultrazvukový přístroj	21
9.1 Zdroje vlnění.....	22
9.2 Sondy.....	23
9.2.1 Sondy s piezoelektrickými měniči	23
9.2.2 Sondy s elektromagnet-akustickými měniči (EMAT).....	24
9.3 Metody zobrazení	25
9.3.1 A zobrazení.....	25
9.3.2 B zobrazení.....	25
9.3.3 C, D a F zobrazení	25
10. Ultrazvuková defektoskopie.....	26
10.1 Definice vad	26
10.2 Základní metody detekce vad za pomoci ultrazvuku	26
10.2.1 Metoda Phased Array	27
10.2.2 Metoda TOFD (Time of Flight Diffraction)	27
10.2.3 Metoda SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique).....	27
10.2.4 Imerzní metoda	28

10.3	Faktory ovlivňující zkoušku	29
10.3.1	Akustická vazba.....	29
10.3.2	Zkoušený povrch	29
10.3.3	Zkoušený materiál	29
10.3.4	Tvar zkoušeného výrobku.....	30
10.3.5	Vlastnosti chyby	30
	Praktická část.....	31
11.	Práce s elektrochemickými křemennými vahami (EQCM)	31
11.1	Měřicí stanoviště	31
11.2	Cyklická voltametrie	32
11.3	Galvanický článek.....	32
11.4	Elektrodepozice.....	32
11.5	Faradayovy zákony	33
11.6	Praktické měření s EQCM – depozice olova	33
12.	Práce s ultrazvukovým zařízením od firmy Olympus	36
12.1	Ovládání přístroje EPOCH LT.....	36
12.2	Kalibrace přístroje.....	37
12.3	Ultrazvukové sondy	37
12.4	Měření rychlosti šíření ultrazvuku ve vybraných materiálech.....	38
12.5	Návrh laboratorní úlohy - Detekování vady v materiálu	40
12.5.1	Cíl úlohy	40
12.5.2	Zadání úlohy	40
12.5.3	Postup měření	40
12.5.4	Praktické ověření	42
13.	Závěr.....	43
	Seznam použité literatury	45
	Seznam obrázků	47
	Seznam symbolů	48

1. Úvod

Tato práce je zaměřena na využití piezoelektrického jevu v technické praxi. Práce je rozdělena do několika hlavních kapitol a podkapitol, v kterých se zabývá jak principem piezoelektrického jevu a jeho fyzikálními vlastnostmi, tak jeho využitím v technické praxi. Další kapitoly jsou pak zaměřeny na teoretický rozbor piezoelektrických rezonátorů, se kterými se pracovalo v experimentální části.

Využití piezoelektriny jako takové je v technice velmi rozsáhlé. Piezoelektrické materiály jsou používány v současné době v mnoha aplikacích, jako jsou například generátory, senzory, motory, aktuátory, nebo tlumiče vibrací a různá zvuková a ultrazvuková zařízení.

Jedna z možností uplatnění piezoelektrického jevu v technice je při měření pomocí elektrochemických křemenných krystalových mikrovah (EQCM), které slouží k určení velmi malých změn hmotností materiálu. Při měření změny frekvence se dá odvodit změna hmotnosti. Základem tohoto měření je křemenný výbrus (rezonátor) kmitající na své vlastní rezonanční frekvenci. Pokud se na povrch pracovních elektrod absorbují další molekuly, zvýší se jejich hmotnost a tím dojde ke změně rezonanční frekvence výbrusu. K výpočtu reálné změny hmotnosti slouží Sauerbreyova rovnice, pro teoretický výpočet je pak užito Faradayových zákonů. Praktické měření na těchto vahách je dále popsáno v experimentální části této práce.

Mezi jeden z nejvyužívanějších oborů pracujících s piezoelektrinou se řadí i ultraakustika. Ultrazvukem lze nazvat mechanické kmity prostředí kolem rovnovážné klidové polohy s kmitočtem vyšším než 20 kHz. V této práci jsou popsány hlavní veličiny popisující ultrazvukové pole spolu s jejich vzorci, dále také odraz a lom ultrazvukových vln na rozhraní dvou prostředí a také šíření ultrazvuku v různých látkách. Tyto poznatky dále byly využity v experimentální části při měření šíření rychlosti ultrazvuku v různých materiálech o různých tloušťkách v experimentu s přístrojem od firmy Olympus EPOCH LT.

Další důležitou částí je ultrazvuková defektoskopie, která využívá ultrazvuku k hledání necelistvostí a různých vad v materiálu. Ultrazvuková defektoskopie má oproti ostatním defektoskopickým metodám tu výhodu, že jsou díky ní zjistitelné nejen povrchové, ale i vnitřní vady, které se nachází hluboko v materiálu. V této práci jsou nastíněny důležité teoretické poznatky týkající se ultrazvukové defektoskopie spolu s vlivy, které mohou defektoskopické měření ovlivňovat. Následně bylo provedeno praktické měření, kde bylo účelem najít a vyhodnotit vadu v materiálu. Toto měření je detailně popsáno v praktické části. Výsledkem tohoto praktického měření je návrh laboratorní úlohy sloužící studentům k seznámení se s ultrazvukovou defektoskopií. K měření bylo opět použito přístroje EPOCH LT.

2. Fyzikální základy piezoelektrického jevu

Piezoelektrický jev je schopnost krystalů generovat elektrický náboj při jejich deformaci, popřípadě jev opačný, kdy se krystal v elektrickém poli deformuje. Tento jev lze pozorovat pouze u některých látek, a to u takových, které nemají z krystalografického hlediska tzv. střed symetrie. Jedná se o tzv. anizotropní látky. [1] [2]

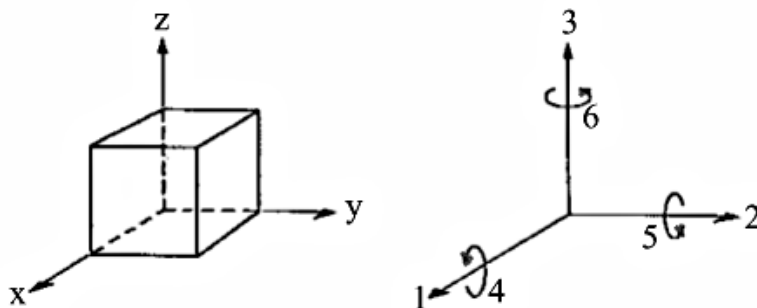
Látky s přirozenými piezoelektrickými vlastnostmi, jako je např. křemen, turmalín nebo Seignettova sůl, se vyskytují ve formě krystalů, jejichž ionty, tvořící krystalovou mřížku, jsou uspořádány tím způsobem, že při deformaci krystalu se negativní a pozitivní ionty posunou tak, že každý element krystalu získá elektrický dipólový moment a na celém krystalu vznikne náboj. Tento jev se nazývá přímý piezoelektrický jev. Elektrické napětí vzniklé na krystalu je přímo úměrné namáhání v krystalu a závisí na jeho směru vzhledem k osám krystalu, protože piezoelektrické krystaly jsou anizotropní. Opakem přímého piezoelektrického jevu je nepřímý piezoelektrický jev, kdy v elektrickém poli dochází k mechanické deformaci krystalu, rovněž v přímé úměrnosti. Kromě přirozených krystalů mají piezoelektrické vlastnosti i uměle rostlé krystaly, jako je lithium sulfát a niobát olova. [3]

Pomocí piezoelektrických stavových rovnic je možné popsat dielektrické, elastické a piezoelektrické vlastnosti anizotropních látek. Jako nezávislé proměnné u těchto rovnic se obvykle volí jedna z dvojic sestavených z T_λ , S_λ , E_i , D_i .

Příklad jedné z možných piezoelektrických stavových rovnic:

$$dD_j = \sum_{\lambda=1}^6 d_{j\lambda} \cdot dT_\lambda + \sum_{i=1}^3 \varepsilon_{ji} \cdot dE_i, \quad (2.1)$$

kde $d_{j\lambda}$ je piezoelektrický koeficient,
 T_λ složka tenzoru elastického napětí,
 E_i složka intenzity elektrického pole.



Obr. 2.1 Směry sil ovlivňující piezoelektrický prvek.

Indexy 1, 2, 3 popisují směr deformace a indexy 4, 5, 6 danou rovinu stříhu.

Zdroj: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40100

2.1 Piezoelektrické materiály

Existuje několik typů piezoelektrických materiálů, které lze rozdělit podle struktury. Další hlediska pro dělení jsou: hodnota Curieovy teploty, vhodnost pro objemové nebo tenkovrstvé prvky apod. Podle struktury rozlišujeme:

- Krystalické piezoelektrické látky (monokrystaly)
- Polykrystalické piezoelektrické látky (piezoelektrická keramika)
- Organické polymery (piezoelektrické polymery) [1]

2.1.1 Křemen

Křemen je chemickým složením kysličník křemičitý SiO_2 . V přírodě se vyskytuje ve velkých, dokonalých, čirých krystalech jako křišťál. Jinými odrůdami křemene jsou záhněda, ametyst, růženin atd. Pro technické aplikace se vždy užívá křišťálu. Jeho specifická hustota je $\rho = 2\,650 \text{ kg/m}^3$. Pro využití křemenu v elektrotechnice se v něm nesmí nacházet poruchy struktury, praskliny, nebo např. nečistoty. V přírodě se křemen takovýchto vlastností vyskytuje minimálně, proto se používá metody k vytvoření syntetického křemene. [4]

Křemen má také velmi dobré chemické a mechanické vlastnosti. Je využíván především v elektrotechnice nebo radioelektronice. Je možné ho najít například v radarech, senzorech, telefonech či počítačích. U těchto zařízení bývá většinou v podobě rezonátoru.

Matrice piezoelektrických koeficientů:

$$d_{i\mu} = \begin{bmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -2 \cdot d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$d_{11} = +2,31 \cdot 10^{-12} \text{ m.V}^{-1},$$

$$d_{14} = -0,626 \cdot 10^{-12} \text{ m.V}^{-1}.$$

V této matici index $i = 1, 2, 3$ definuje směr elektrického pole. V případě indexu μ záleží, zda se jedná o přímý nebo nepřímý piezoelektrický jev. Pro případ nepřímého piezoelektrického jevu popisuje index $\mu = 1, 2, 3$ směr vyvolané deformace, pro $\mu = 4, 5, 6$ rovinu stříhu. Co se týče přímého piezoelektrického jevu index $\mu = 1, 2, 3$ popisuje směr působícího elastického napětí na rovinu a index $\mu = 4, 5, 6$ rovinu stříhu. [5]

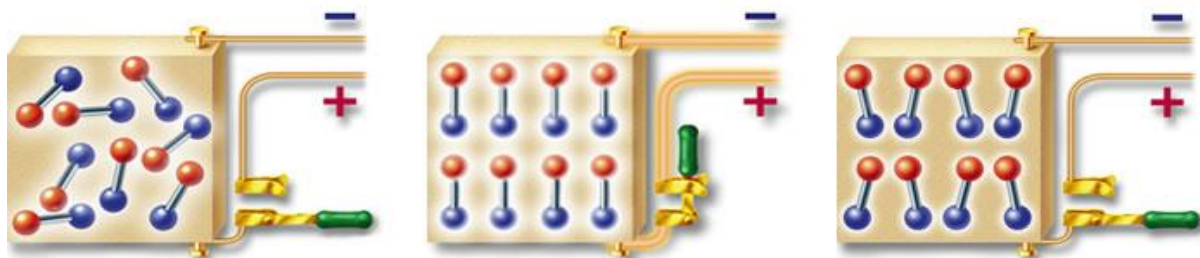
2.1.2 Piezoelektrická keramika

Piezoelektrická keramika se dá zařadit do skupiny feroelektrických materiálů. Například PZT keramika se skládá ze smíšených krystalů zirkonátu olova (PbZrO_3) a titanátu olova (PbTiO_3). Název látky PZT je odvozen z prvních písmen základních prvků, z kterých je tato látka složena: P (Pb - olovo) – Z (Zr - zirkonium) – T (Ti - titan). Tyto základní prvky jsou pak modifikovány pomocí dalších prvků (Sr, Ba, Ca) za účelem zvýšení permitivity, či pro usnadnění výrobní technologie.

Piezokeramika má polykrystalickou strukturu, která se skládá z různých domén, které obsahují elementární buňky. Látka se na první pohled jeví jako nepiezoelektrická. Piezoelektrickou se stává až po vystavení účinkům elektrického pole, které při zvýšené teplotě zapříčiní její polarizaci. Díky působení elektrického pole se domény natočí ve směru působícího polarizačního elektrického pole a látka tak získá anizotropní vlastnosti. [2] [5] [6]

Matrice piezoelektrických koeficientů:

$$d_{i\mu} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$



Obr. 2.2 Feroelektrická keramika před polarizací, během polarizace a po ní

Zdroj: <http://www.ceramtec.cz/ceramic-materials/piezo-ceramics/basics/>

3. Princip piezoelektrického jevu

Princip piezoelektrického jevu spočívá v mikrostruktuře materiálu. Krystal je složen z iontů, které jsou vázány na určitých místech v pravidelně uspořádaném a opakujícím se vzoru. Toto uspořádání tvoří krystalovou mřížku. Nejmenší periodicky se opakující část mřížky je elementární buňka. Symetrické vlastnosti této buňky rozhodují, zda může mít krystal piezoelektrické vlastnosti. Piezoelektrický jev můžeme pozorovat jen u krystalů, které nemají střed symetrie, protože ionty v buňkách bez středu symetrie se vlivem mechanického namáhání přesouvají, a tak vytváří elektrický dipól. Ionty v buňkách se středem symetrie takový dipól vytvořit nemohou. [3]

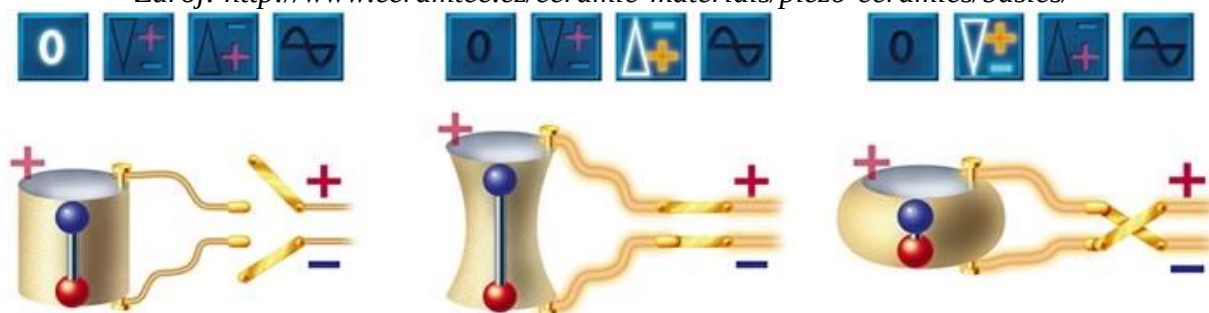
V podstatě je to schopnost krystalu generovat elektrický náboj při jeho deformování. Tento jev existuje i reverzně, kdy na krystal přivedeme elektrické napětí, a tím se deformuje. V zásadě dělíme tento jev na přímý piezoelektrický jev a nepřímý piezoelektrický jev.

Podstata tohoto jevu je, že v klidovém stavu jsou polohy kladných a záporných nábojů po vystředění přes objem buňky shodné a materiál nevykazuje žádné elektrické projevy. Začne-li na něj působit mechanická síla, jako je tlak, tah, ohyb nebo střih, posunou se polohy nábojů tak, že elektrická těžiště záporných a kladných iontů (nábojů), která v nezdeformovaném krystalu souhlasí, se od sebe vzdálí a na určitých plochách krystalu se objeví náboj. Je možná i kombinace směrů mechanického namáhání. Důležitým rysem obou jevů je závislost efektu na vzájemné poloze krystalografických os látky a směru přiloženého pole (elektrického či mechanického). Polarita náboje je dána směrem tlaku vzhledem k orientaci krystalu. [3] [5]



Obr. 3.1 Přímý piezoelektrický jev

Zdroj: <http://www.ceramtec.cz/ceramic-materials/piezo-ceramics/basics/>



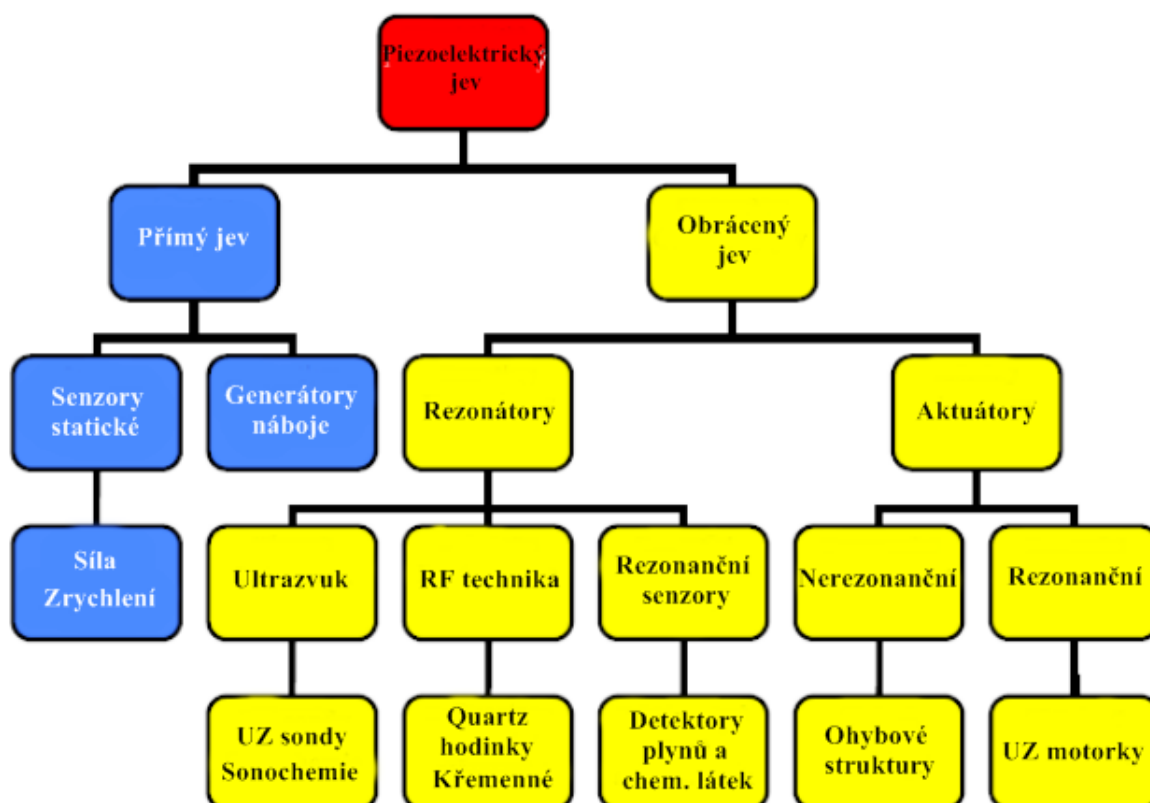
Obr. 3.2 Nepřímý (inverzní) piezoelektrický jev

Zdroj: <http://www.ceramtec.cz/ceramic-materials/piezo-ceramics/basics/>

4. Možnosti aplikace piezoelektrického jevu v technické praxi

Využití piezoelektriny v technické praxi je velmi rozsáhlé, proto uvádím nejvyužívanější možnosti použití piezoelektrického jevu.

- Generátory – tyto soustavy využívají energii okolí, jako jsou vibrace, akustický hluk, pohyb lidského těla atd. Generují malé napětí a malý výkon.
- Senzory – senzory tlaku, síly, toku, zrychlení, deformace, výchylky, vibrace atd.
- Motory a aktuátory – tiskárny, transformátory a motory v miniaturním měřítku, bimorfy a mnohavrstvé aktuátory pro přesné polohování.
- Tlumiče vibrací – používají se kompozity na aktivní tlumení vibrací a hluku.
- Zvuková a ultrazvuková zařízení – mikrofony, reproduktory, hydrofony, bzučáky, sonary, detekce přiblížení atd. [3]



Obr. 4.1 Možnosti využití piezoelektrického jevu

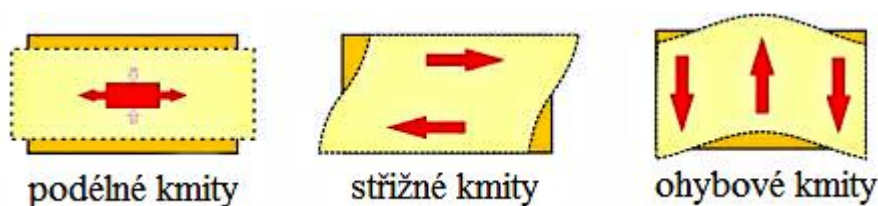
Zdroj: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/10094/DIPLOMKA.pdf?sequence=1>

5. Piezoelektrické rezonátory

Piezoelektrický rezonátor si lze představit jako destičku nebo tyčinku vybroušenou z piezoelektrické látky či nanesené vrstvy piezoelektrického materiálu, opatřené dvěma nebo více elektrodami a kmitající v rytmu harmonického napětí připojeného na elektrody v blízkosti své vlastní rezonance.

Každý rezonátor využívá řadu jednoduchých nebo vzájemně vázaných kmitů, z těchto kmitů zpravidla využíváme jen jeden kmit z odpovídajících rezonančních frekvencí. Takto využívaný kmit by měl být co nejméně ovlivněn konstrukcí rezonátoru a parametry náhradního elektrického obvodu. Piezoelektrické rezonátory jsou vyráběny se jmenovitým rezonančním kmitočtem v rozmezí od 1kHz až do 160MHz.

Hlavní při návrhu piezoelektrického rezonátoru je určení základních modálních parametrů, jako je vlastní (rezonanční) frekvence a vlastní tvar kmitu. U rezonátorů určených pro použití v radiotechnice nebo akustice je zásadní velikost a stabilita rezonanční frekvence a vzájemná vazba nebo odstup sousedních módů kmitů. [7]



Obr. 5.1 Vybrané typy kmitů piezoelektrických rezonátorů

Zdroj: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42356

Piezoelektrické rezonátory lze využít například pro stabilizaci kmitočtu krystalových oscilátorů, pro krystalové filtry, pro buzení ultrazvuku v plynech, kapalinách a pevných látkách, měření neelektrických veličin (mechanické napětí, atd.) a jiné. [7]

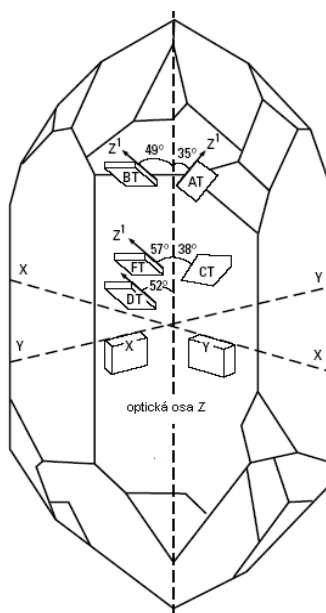
6. Elektrochemické křemenné krystalové váhy (EQCM)

Křemenné váhy (Quartz Crystal Microbalance, QCM) slouží k určení velmi malých změn hmotností za využití piezoelektrického jevu. Při měření změny frekvence se dá odvodit změna hmotnosti. Tato metoda QCM nabízí široké uplatnění v mnoha průmyslových i vědních oborech od potravinového průmyslu až po nanotechnologie a medicínu.

Základem měření QCM je křemenný výbrus (rezonátor), který je připojen ke zdroji střídavého napětí pomocí dvou elektrod, většinou ze zlata. Rezonátor kmitá na své vlastní rezonanční frekvenci. Jestliže se na povrch kovové elektrody absorbují další molekuly, zvýší se její hmotnost a sníží se rezonanční frekvence rezonátoru. Změnu hmotnosti lze za pomoci softwaru a upravené Sauerbreyovy rovnice vypočíst. Jedná se o velmi citlivou metodu umožňující sledovat rozdíly hmotností až řádech nanogramů.

Hlavní předností této metody je měření v reálném čase bez toho, aby bylo nutné značit mnoho molekul. Lze ji využít i při pozorování vzájemných interakcí molekul, pokud k absorbovaným molekulám přidáme další látku. [8]

Pro křemenné mikrováhy se využívá především tzv. AT řezu (možno využít i řez BT), který má sklon řezu od osy Z přibližně 35° a využívá tloušťkově střižné kmity. Úhel řezu je volen tak, aby byl rezonanční kmitočet v intervalu teplot asi od 10 °C do 40 °C teplotně nezávislý. [9]



Obr. 6.1 Typy řezů křemenného krystalu

Zdroj: [9]

Díky střižným kmitům se objemem krystalu mezi elektrodami šíří transversální akustické vlny. Je-li vlnová délka těchto kmitů rovna $2t$, kde t je tloušťka destičky, vzniká zde stojaté vlnění. Frekvence této vlny je pak dána rovnicí:

$$f_0 = \frac{v_{tr}}{2t_q} = \frac{\mu_q^{1/2}}{2t_q \rho_q^{1/2}}, \quad (6.1)$$

kde v_{tr} je rychlost šíření vlny v AT výbrusu křemene.

Pokud nanese se souvislou vrstvu materiálu na povrch výbrusu, vlnění se začne šířit i tímto materiálem. Pokud má materiál vrstvy podobné akustické vlastnosti jako křemen, lze tento systém považovat za kompozitní rezonátor a vrstva vyvolá stejnou změnu, jako by byla z křemene. Při nepatrné změně tloušťky Δt , dojde i k nepatrné změně rezonanční frekvence Δf . Tyto změny frekvence lze vyjádřit z následující Sauerbreovy rovnice:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{-\Delta t}{t_q} = \frac{-2f_0 \Delta t}{v_{tr}}, \quad (6.2)$$

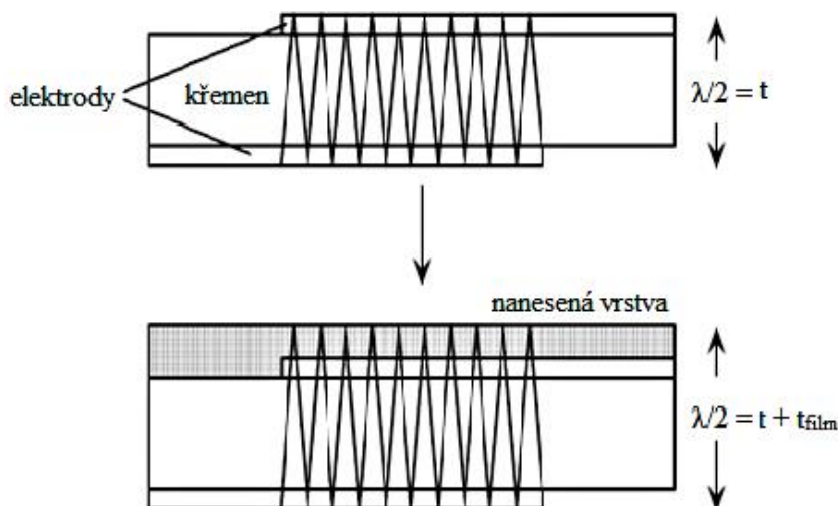
$$\Delta f = \frac{-2f_0^2 \Delta m}{A_p (\mu_q \rho_q)^{1/2}}, \quad (6.3)$$

kde Δf je změna frekvence,
 f_0 je rezonanční frekvence samotného rezonátoru,
 Δm je změna hmotnosti,
 A_p je piezoelektricky aktivní oblast (plocha, kde se elektrody překrývají),
 ρ_q je hustota křemene ($2,648 \text{ g.cm}^{-3}$),
 μ_q je modul pružnosti ve střihi ($2,947 \cdot 10^{11} \text{ g.cm}^{-1}.\text{s}^{-2}$),
 t_q je tloušťka destičky,
 v_{tr} je rychlost šíření vlny v AT výbrusu křemene.

Změnu tloušťky Δt pak můžeme vyjádřit z rovnice:

$$\Delta t = \Delta m / \rho_q \cdot A_p. \quad (6.4)$$

Platnost této rovnice je dána předpokladem stejné rychlosti šíření akustické vlny v křemenu a naneseném materiálu. [9]



Obr. 6.2 Nahoře – transversální střižná vlna v křemeni a elektrodách

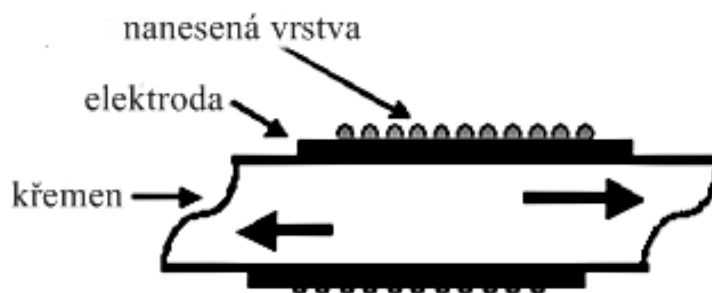
Dole – transversální střižná vlna v křemeni a rezonátoru s nanesenou vrstvou.

Zdroj: [9]

S rostoucí tloušťkou materiálu roste i vlnová délka, a tím klesá rezonanční frekvence. Aby byla Sauerbreyova rovnice platná, musí být splněny tyto podmínky:

- Hmotnost nanesené vrstvy mnohonásobně menší než hmotnost krystalu.
- Vrstva rovnoměrně pokrývá celou plochu krystalu.
- Vrstva pevně přiléhá na elektrodu.
- Vrstva je pevná (nerozptyluje se).

Pokud by tyto podmínky nebyly dodrženy, rovnice bude platit s menší, či větší odchylkou. [9]



Obr. 6.3 Řez QCM krystalu kmitajícího ve střižném módu.

Zdroj: [9]

7. Ultraakustika

Ultrazvukem nazýváme mechanické kmity částic prostředí kolem rovnovážné klidové polohy s kmitočtem vyšším než 20 kHz. Mechanické kmity lze rozdělit do těchto kmitočtových pásem:

- kmitočet nižší než 20 Hz – infrazvuk,
- kmitočet od 20 Hz do 20 kHz – akustické pásmo (slyšitelné),
- kmitočet nad 20 kHz do 1 GHz – ultrazvuk,
- kmitočet vyšší než 1 GHz – hyperzvuk.

[10]

7.1 Fyzikální princip ultrazvuku

Mechanické kmity se šíří prostředím charakteristickou rychlostí a přenáší energii šířící se stejnou rychlostí jako uvažované vlnění. Podle velikosti přenášené energie můžeme ultrazvuk rozdělit na aktivní a pasivní. Aktivním lze nazvat takové vlnění, které se projevuje fyzikálními nebo chemickými účinky. Pasivní ultrazvuk má naopak velmi malý výkon a jeho využití lze hledat v oblasti měřicí techniky a diagnostiky. [10]

Druhy šíření ultrazvukových vln lze rozdělit v závislosti na prostředí, kterým procházejí. Z hlediska fyzikálního principu vzniku je dělíme na vlnění podélné, příčné a povrchové. Všechny tyto typy vlnění se vyskytují při průchodu pevnými látkami. Při interakci s prostředím plynným a kapalným převažuje vlnění podélné. [11]

7.2 Základní veličiny ultrazvukového pole

Uvážíme-li, že částice prostředí kmitají s malými amplitudami a jejich pohyb nemá větší odchylky od sinusového průběhu, lze tento druh kmitání popsat vlnovou rovnicí:

$$\frac{\partial^2 u(t,x)}{\partial t^2} = v \frac{\partial^2 u(t,x)}{\partial x^2}, \quad (7.1)$$

jejíž partikulární řešení pro rovinnou vlnu je rovnice pro harmonický pohyb:

$$u(t,x) = Y \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \text{ resp. } u(t,x) = Y \sin(\omega t - \varphi), \quad (7.2)$$

kde

u	je okamžitá výchylka (posunutí),
Y	je amplituda výchylky,
ω	je kruhový kmitočet ($\omega = 2\pi f$),
v	je rychlost šíření vlny,
x	je souřadnice polohy,
φ	je fázový úhel ($\varphi = \omega (x/v)$).

Rychlost kmitání částice kolem rovnovážné polohy nazýváme akustickou rychlostí a můžeme ji stanovit derivováním průběhu posunutí $u(t, x)$ podle času:

$$v_a = \frac{du(t,x)}{dt} = \omega Y \cos(\omega t - \varphi). \quad (7.3)$$

Dopadá-li ultrazvukové vlnění na určité prostředí, potom každý bod se vychyluje ze své rovnovážné polohy. Velikost výchylky označujeme jako akustickou výchylku, která je dána polohovým vektorem bodu, ve kterém je v daném okamžiku vychýlená částice vzhledem ke své rovnovážné poloze. Amplituda rychlosti kmitavého pohybu je:

$$V_a = \omega Y = 2\pi f Y. \quad (7.4)$$

Doba, po které se okamžité hodnoty výchylek částic opakují se nazývá periodou T . Platí:

$$T = \frac{1}{f}. \quad (7.5)$$

Jestliže se akustická vlna šíří prostředím rychlostí v , platí mezi délkou vlny λ , periodou T a kmitočtem f vztah:

$$\lambda = vT = \frac{v}{f}. \quad (7.6)$$

Délku vlny můžeme definovat vždy jak při spojitém vlnění, tak i pro impulsy, kdy se v určitém časovém intervalu opakuje alespoň několik period kmitů. [10]

Další důležitou veličinou ultrazvukového pole je akustický výkon, který lze vyjádřit ze vztahu:

$$N = P_{a_{ef}} \cdot V_{a_{ef}} \cdot S = \frac{P_a}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_a}{\sqrt{2}} \cdot S = \frac{1}{2} \rho \cdot v \cdot \omega^2 \cdot Y^2 \cdot S = I \cdot S, \quad (7.7)$$

kde N je velikost akustického výkonu,
 I je intenzita ultrazvuku,
 S je jednotka plochy.

Intenzita ultrazvukové energie rovinného postupného vlnění v homogenním izotropním prostředí ve velké vzdálenosti od zdroje lze vyjádřit vztahem:

$$I = \frac{1}{2} \rho \cdot v \cdot \omega^2 \cdot Y^2. \quad (7.8)$$

Velikost akustického tlaku lze pak vyjádřit vztahem:

$$P_a = \omega \cdot Y \cdot \rho \cdot v, \quad (7.9)$$

kde P_a je akustický tlak,
 ω je kruhový kmitočet,
 Y je amplituda výchylky,
 ρ je objemová hustota,
 v je rychlost šíření vlny.

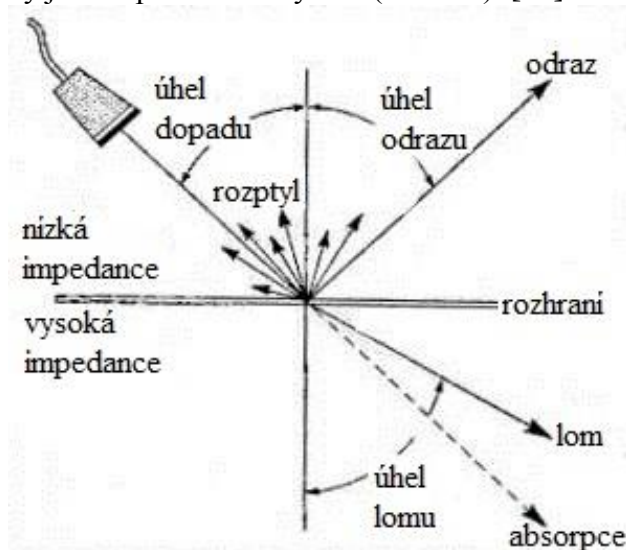
[11]

Mezi hlavní ultrazvukové veličiny lze také zařadit absorpci ultrazvukového vlnění. Absorpce ultrazvukového vlnění je proces, kdy je energie při průchodu daným prostředím transformována na jiný druh energie, převážně na energii tepelnou. Míra absorpce v daném prostředí je ovlivňována těmito třemi faktory:

- Viskozitou prostředí – míra třecí síly mezi částicemi, které se posouvají jedna po druhé a tvoří prostředí, kterým se ultrazvuková vlna šíří. Čím větší budou tyto síly, tím více energie se přemění na teplo a vzroste i míra absorpce ultrazvukového vlnění.
- Dobou trvání relaxace částic – ta je nutná k tomu, aby se částice vrátily do rovnovážného stavu. Je-li tato doba krátká, částice se navracejí rychleji do své rovnovážné polohy, avšak je-li relaxační doba příliš dlouhá, ultrazvukový svazek naruší návrat těchto částic do rovnováhy a působí tak proti síle, která částice navrácí. Důsledkem toho pak je že se část energie ze svazku přemění na energii tepelnou.
- Základní frekvenci – s rostoucí budicí frekvencí roste míra absorpce ultrazvukového vlnění. [10]

7.3 Odraz a lom ultrazvukových vln

Dopadne-li ultrazvukový svazek na rozhraní dvou prostředí s různými akustickými vlastnostmi, projde z části do druhého prostředí a z části se odrazí zpět. Při přechodu z jednoho prostředí do druhého mění vlnění svůj směr šíření (pokud nejde o kolmý dopad), dochází k lomu. K odrazu a lomu však dojde pouze tehdy, pokud jsou rozměry rozhraní, resp. překážky, větší než vlnová délka ultrazvukového vlnění. Při řádově stejných rozměrech překážky a vlnové délky je lom provázen ohybem (difrakcí). [10]



Obr. 7.1 Odraz a lom akustické vlny na rozhraní

Zdroj: http://ftplf2.agarek.com/fyzio/prvak/biofyzika/semin/tercaza_uz.php

Úhel lomu α_t je závislý na rychlosti šíření ultrazvukové vlny v obou prostředích. Poměr sinu úhlu dopadu a úhlu lomu je dán Snellovým zákonem, který definuje index lomu n ultrazvukové vlny:

[11]

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2, \text{ resp. } \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (7.10)$$

8. Rychlost šíření ultrazvuku v různých látkách

8.1 Plynné látky

Pro výpočet rychlosti šíření ultrazvukové vlny v plynné látce platí rovnice:

$$v = \sqrt{\kappa \cdot \frac{p_0}{\rho_0} \left(1 + \frac{1}{2} \gamma \cdot t\right)}, \quad (8.1)$$

kde p_0 je tlak plynu při teplotě 0°C ,
 ρ_0 je hustota plynu,
 κ je Poissonova konstanta (poměr měrných tepel),
 γ je teplotní součinitel rozpínivosti plynu.

[12]

8.2 Kapalně látky

Šíření ultrazvuku v kapalinách je závislé především na hustotě prostředí a tlaku v prostředí, kterým se ultrazvuk šíří. Vzorec pro výpočet šíření ultrazvuku v kapalinách:

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\beta_{ad} \rho}} = \sqrt{\frac{\kappa}{\beta_{iz} \rho}}, \quad (8.2)$$

kde K je adiabatický modul objemové pružnosti,
 β_{ad} je adiabatická stlačitelnost,
 β_{iz} je izotermická stlačitelnost,
 ρ je hustota kapaliny,
 κ je Poissonova konstanta.

Pokud se změní teplota, změní se i rychlost šíření ultrazvukových vln v kapalině. Rovnice popisující závislost rychlosti šíření ultrazvukových vln na změnách teplot:

$$v = v_0 + b(\theta - \theta_0), \quad (8.3)$$

kde v_0 je rychlost šíření s počáteční teplotou Θ_0 ,
 Θ je teplota,
 b je teplotní součinitel.

[12]

8.3 Pevné látky

U pevných látek na rozdíl od kapalin a plynů dochází k příčnému a podélnému vlnění. V kapalinách i plynech existuje pouze vlnění podélné, jelikož v těchto látkách nevzniká smykové napětí. Pro rychlost šíření příčného vlnění v pevných látkách platí tato rovnice:

$$v_T = \sqrt{\frac{G_S}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_p}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1 + \kappa)}}, \quad (8.4)$$

kde v_T je rychlost šíření příčného vlnění,
 G_S je modul pružnosti ve smyku,
 E_p je modul pružnosti v tahu,
 ρ je hustota prostředí.

Pokud se jedná o vlnění podélné, pak pro rychlost šíření vlny platí:

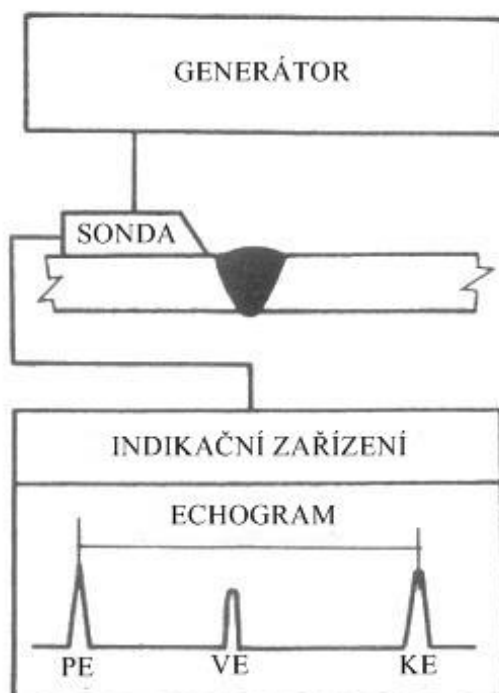
$$v_L = \sqrt{\frac{E_p}{\rho}}, \quad (8.5)$$

kde v_L je rychlost šíření podélného vlnění.
[13]

9. Ultrazvukový přístroj

Na sondu jsou z generátoru přiváděny vysílací impulzy, které sonda transformuje na ultrazvukové impulzy šířící se dále materiálem. Echa vracející se z materiálu se následně kvůli jejich malé amplitudě zesílí v zesilovači. Dále jsou převedeny do digitální formy, potřebné k zobrazení na elektroluminiscenční obrazovce, pomocí analogovo-číslicového převodníku (A-D).

Perioda vysílacích impulzů do materiálu musí být dostatečně dlouhá, aby se stačili utlumit echa příslušící vysílacímu impulzu z předchozí periody. Kdyby byla perioda krátká, mohly by se na obrazovce zobrazovat tzv. bludná echa, tedy echa, která „zabloudila“ až do další periody. [14]



Obr. 9.1 Měřicí sestava

PE – počáteční echo, VE – vadové echo, KE – koncové echo

Zdroj: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1810>

9.1 Zdroje vlnění

Za zdroje vlnění se považují ty přístroje, ve kterých funguje přeměna určitého druhu energie (elektrické, kinetické, atd.) na energii ultrazvukovou. Pro generování ultrazvukového vlnění se využívá piezoelektrických měničů, které jsou zabudovány v sondě. Piezoelektrické měniče pracují na principu přímého a nepřímého piezoelektrického jevu v rozsahu frekvencí od 100 kHz do 100 MHz. [15]

9.2 Sondy

Ultrazvukové sondy jsou nedílnou součástí každého ultrazvukového zařízení. Díky nim lze do materiálu vysílat vlnění a přijímat echa od chyb. Za nejdůležitější požadovanou vlastnost u sond lze považovat schopnost generování impulzů s velkou amplitudou, aby bylo možno přezvučit možné nesrovnalosti zkoušeného materiálu. Tato vlastnost je důležitá především u materiálů s velkým útlumem, jako je například austenitická ocel, plasty či kompozitní materiály. Další důležitou vlastností ultrazvukových sond je, aby sonda vysílala co nejkratší impulz pro dosažení dobré hloubkové rozlišovací schopnosti, aby bylo možné rozeznat i blízko sebe ležící defekty. Sonda by měla také být dostatečně mechanicky odolná a konstrukčně řešená tak, aby nevznikaly parazitní odrazy uvnitř sondy.

Ultrazvukové sondy lze na základě způsobu generování ultrazvuku rozdělit na sondy s piezoelektrickými nosiči, sondy s magnetostrikčními nosiči a sondy s elektrodynamickými měniči. [14]

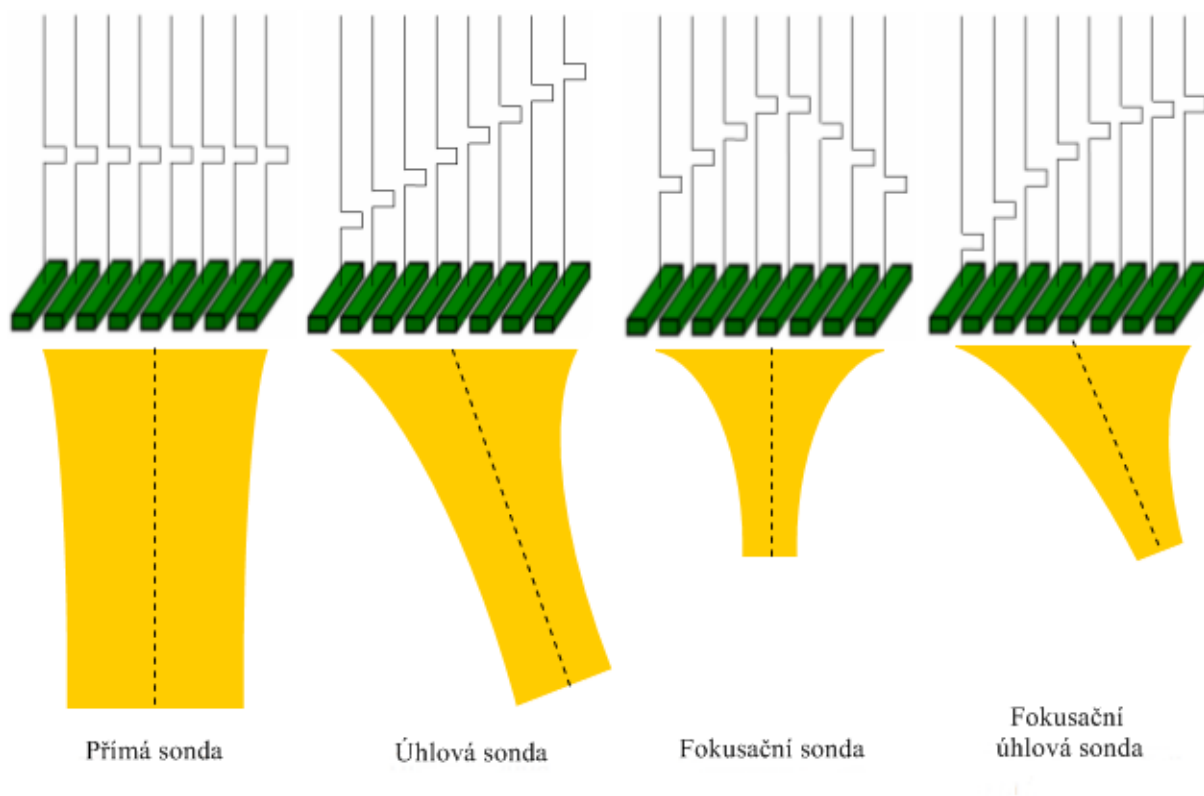
9.2.1 Sondy s piezoelektrickými měniči

Materiál, ze kterého bývají nejčastěji měniče vyrobeny, je piezokeramika. Sondy pak bývají nejčastěji ve dvou provedeních: čelní a úhlové.

Čelní sonda se skládá z měniče chráněného před mechanickým poškozením tvrdou otěruvzdornou ochrannou vrstvou, tlumicím tělískem a přizpůsobovací cívkou, která má za úlohu impedanční přizpůsobení sondy k vstupním obvodům ultrazvukového přístroje. Sonda bývá jako celek uzavřena v kovovém pouzdře s konektorem. Na kovové pouzdro sondy je pak vyveden jeden z elektrických kontaktů měniče. Tloušťka ochranné vrstvy se volí $\lambda/4$, aby nedocházelo ke zkreslení nebo prodloužení impulzu při jeho průchodu ochrannou vrstvou. Čelní sondy jsou vhodné pro zkoušení výrobků, kde je povrch přístupný a dostatečně rovný pro přiložení sondy. Díky těmto sondám lze odhalit zdvojeniny u plechů, ale už ne trhliny orientované kolmo na povrch. Tyto sondy také nejsou příliš vhodné pro zkoušení svarů, pro toto zkoušení je výhodnější užití úhlových sond.

Úhlové sondy obsahují plexisklový klín, což umožňuje, že jeho dosedací plocha tvoří se zkušebním povrchem akustické rozhraní. Na tomto rozhraní nastává lom. Úhlová sonda nemá ochrannou vrstvu, jelikož měnič je oddělen od zkušebního povrchu plexisklovým klínem. Nevýhodou však je odolnost tohoto klínu. Při několikahodinovém zkoušení se opotřebovává, dochází ke změně jeho geometrie, a tím se mění i vysílaný úhel sondy. Toto opotřebování pak má za následek nepřesnou lokalizaci chyb, proto je nutné v průběhu zkoušky kontrolovat úhel a bod výstupu ultrazvukového svazku.

Oba typy těchto sond mohou být jedno-měničové, nebo dvojité. U dvojitých sond pak jeden měnič plní roli vysílače a druhý přijímače ech z materiálu. Oba leží v jednom tělese, avšak jsou akusticky oddělené přepážkou, tzv. akustickým stíněním. Výhodou tohoto uspořádání je velmi malé mrtvé pásmo. [14]



Obr. 9.2 Princip funkce ultrazvukových sond s piezoelektrickými měniči s různým provedením

Zdroj: [13]

9.2.2 Sondy s elektromagnet-akustickými měniči (EMAT)

Princip elektromagnetického měniče je založen na působení Lorentzovy síly ve vrstvě materiálu, ve kterém proudí vířivé proudy, a zároveň je vystaven účinkům vnějšího magnetického pole. Vnější magnetické pole je vytvořeno buď permanentním magnetem, nebo elektromagnetem, tj. vinutím navinutým kolem jádra napájeným magnetizačním proudem s nízkou frekvencí (50Hz). Pod pólem magnetu je umístěna plochá spirálová cívka napájená impulzně proudem vysoké frekvence (500 kHz – 1,5 MHz). V kokovém materiálu v blízkosti cívky se následně indukují impulzy vířivých proudů. Na částice materiálu tvořící dráhu vířivých proudů působí Lorentzova síla, jejíž velikost závisí na velikosti proudu v materiálu a na magnetické indukci vytvořené vnějším polem:

$$\vec{F} = \vec{j} * \vec{B}, \quad (9.1)$$

kde $\vec{F}$ je Lorentzova síla,
 $\vec{j}$ je velikost proudu v materiálu,
 $\vec{B}$ je magnetická indukce.

U feromagnetických materiálů kromě kmitů vybuzených Lorentzovou silou dochází i k magnetostrikci, kdy v magnetickém poli dochází u feromagnetických materiálů k změně rozměrů. Směr magnetostrikce je rovnoběžný s vnějším polem. [14]

9.3 Metody zobrazení

Přijaté údaje z prostředí jsou vyhodnoceny a následně zobrazeny na obrazovce ultrazvukového přístroje. Ultrazvuková defektoskopie využívá několika typů zobrazení ultrazvukových signálů. Zde je popis základních typů zobrazování ultrazvukových signálů:

9.3.1 A zobrazení

Je to typ zobrazení, kdy na ose x je zobrazována dráha ultrazvuku a na ose y je amplituda signálu. Na obrazovce se objevují echa odpovídající odraženým vlnám a vstupnímu impulzu, tedy echa vstupní, výstupní (koncové) a echo vadové. [13]

9.3.2 B zobrazení

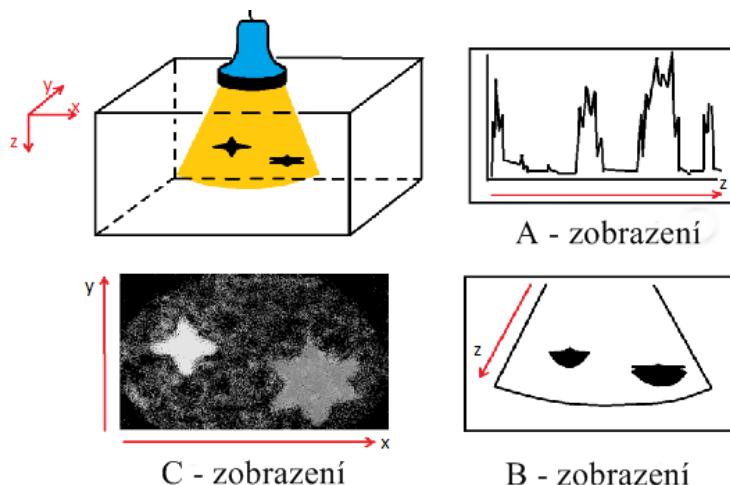
Jedná se od dvourozměrné zobrazení, kde na ose x je vynesena dráha sondy a na ose y je zobrazena hloubka zkoušeného materiálu. Vadu lze zobrazit, pokud amplituda echa překročí nastavenou úroveň, nebo je možné zobrazit vadu v barevné paletě, kdy barva zobrazení závisí na velikosti amplitudy. Sonda se pohybuje po přímce (křivce) s tím, že je vyhodnocována její okamžitá poloha. [13]

9.3.3 C, D a F zobrazení

Pomocí „C“ zobrazení je možno vidět rozložení chyb na ploše povrchu. Sonda se pohybuje meandrovitě.

Zobrazení „D“, tak jako „C“ zobrazení, ukazuje rozložení vad na ploše povrchu. Hloubkové úrovně chyb je pak možné barevně rozlišit.

„F“ zobrazení je modifikace „C“ zobrazení, kdy je místo amplitudy zobrazována jiná veličina ultrazvukového signálu, například frekvenční nebo amplitudové spektrum. [13] [16]



Obr. 9.3 Typy zobrazení ultrazvukových signálů

Zdroj: [13]

10. Ultrazvuková defektoskopie

Ultrazvukové defektoskopie se nejčastěji využívá pro zjišťování možných defektů ležících pod povrchem testovaného vzorku, nebo také pro měření tloušťky materiálu. Podle interakcí ultrazvuku s defekty nacházejícími se v materiálu lze určit, o jaký typ vady se jedná. Díky šíření ultrazvukových vln materiálem je možné detekovat případné vady materiálu do velkých hloubek. Pomocí ultrazvukových metod lze zjistit nejen vnitřní, ale i povrchové vady materiálu. Výhodou ultrazvukových metod je především okamžité zobrazení výsledků zkoušky. [17]

10.1 Definice vad

Jako vadu lze označit různorodou odchylku od předepsaných požadavků na výrobek, ať už to jsou odchylky rozměrů, tvaru, či barvy. Tyto vlastnosti jsou předepsány v technických normách nebo v jiných technických dokumentech. Vady je možné z hlediska jejich výskytu rozdělit na vady povrchové a vnitřní. Povrchové vady jsou v přímém kontaktu s povrchem součásti, zatímco vnitřní vady se nacházejí uvnitř materiálu a nemají s povrchem jakýkoliv kontakt.

Ultrazvukovými zkouškami je možné detekovat vady rozměrů, kdy se jedná o nedodržení požadavků na předepsané jmenovité rozměry výrobku. Dále také vady tvaru a polohy, kdy není dodržen požadavek na vzdálenost vyjadřující polohu posuzované plochy, osy nebo roviny vzhledem k její jmenovité poloze. Vady povrchu je možno nalézt, nebyl-li dodržen požadavek na předepsané provedení povrchu. Ultrazvukem se také dá detekovat necelistvost hmoty výrobku a následně různé vady zjišťované za pomoci zvláštních laboratorních zkoušek, pokud nebyly dodrženy požadavky na předepsané hodnoty mechanických, technologických a fyzikálních vlastností výrobku, či nedodržení předepsané makrostruktury nebo mikrostruktury. [16]

10.2 Základní metody detekce vad za pomoci ultrazvuku

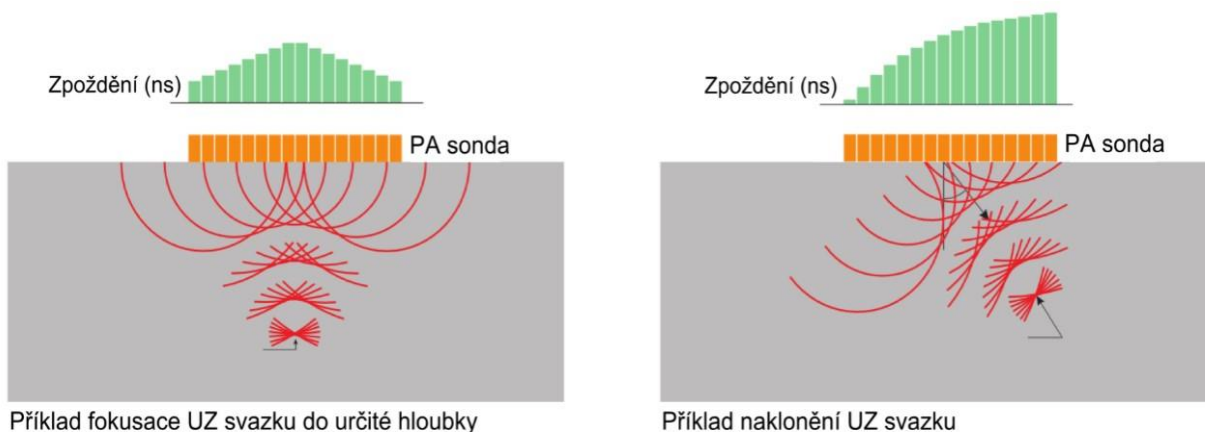
V ultrazvukové defektoskopii existují dvě základní metody pro zjišťování možných vad materiálu. První z nich je průchodová metoda, která využívá zeslabení ultrazvuku při průchodu materiálem v místě výskytu vady. U této metody se používají dvě sondy, které jsou umístěné proti sobě. Jedna z nich plní funkci vysílače a druhá přijímače ultrazvukového signálu procházejícího materiálem. Této techniky lze využít v případě, že máme přístup k oběma protilehlým povrchům zkoumaného materiálu. Nevýhodou této metody je to, že je nutné, aby byla zajištěna dokonalá osová souměrnost použitých sond.

Další základní metodou je pak metoda odrazová, která využívá odrazu ultrazvukové vlny od defektů a nehomogenit uvnitř materiálu. Pro realizaci se používá jedna sonda, která slouží jako přijímač i vysílač zároveň. Pro měření tedy stačí přístup pouze k jedné pracovní ploše materiálu. Z doby uplynulé mezi vysláním impulsu a přijetím signálu zpět do sondy se následně určí vzdálenost chyby od daného měniče a velikost amplitudy echa, z čehož se dá určit přibližná velikost zjištěné vady. Nevýhodou této metody je především omezující minimální vzdálenost měniče, kterou musí vada mít, aby byla odlišitelná od vysílače impulsu. [16]

10.2.1 Metoda Phased Array

Tato metoda fázových polí je založena na počítačové technice. Měníč je rozřezán na tenké pásy, na 8 až 128 pásů (měníčů). Na základě toho, jak je řízeno buzení daných měníčů, je možno dosáhnout různé vlnoplochy, která určuje jaká vlna a kterým směrem se bude šířit. Dále také, zda bude ultrazvukový svazek fokusován a v jaké dráze, či fokusován nebude.

Defektoskopy pro tuto metodu umožňují A, B a C zobrazení. Díky možnosti měnit úhel svazku tak lze docílit větší sledované oblasti bez toho, aby bylo nutné sondou pohybovat. Další výhodou je také lepší prostorové rozlišení a přesnější vyhodnocení vad. [18]



Obr. 10.1 Měření metodou Phased Array

Zdroj: <http://cvrez.cz/komercni-sluzby/ndt-laborator-plzen/ndt-rozsah-cinnosti/ndt-kovu/>

10.2.2 Metoda TOFD (Time of Flight Diffraction)

Tato metoda je založena na principu difrakce, tj. rozptylu a ohybu vlny ultrazvukového záření na hranách trhliny. Pro měření se využívá dvou úhlových sond. Výhodou této metody je především detekce vady nezávisle na její orientaci ke zkoumanému povrchu. Avšak nevýhodou je, že nelze této metody použít pro příliš zrnitý materiál, či pro materiál obsahující vměstky s vysokou četností vad. [19]

10.2.3 Metoda SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique)

U této metody je plocha na povrchu materiálu skenována jednou nebo polem sond, přičemž je aktivována vždy jen jediná sonda. Na základě změřené rychlosti šíření vlny daném prostředí se vypočtou časové intervaly (zpoždění) od vyslání impulzu a zpětného dopadu odražené vlny od možné vady ve zvoleném bodě. Podle časových zpoždění se následně signály fázově srovnají a vzájemně korelují. V případě že se v daném bodě nachází vada je ultrazvukový signál zesílen. [20]

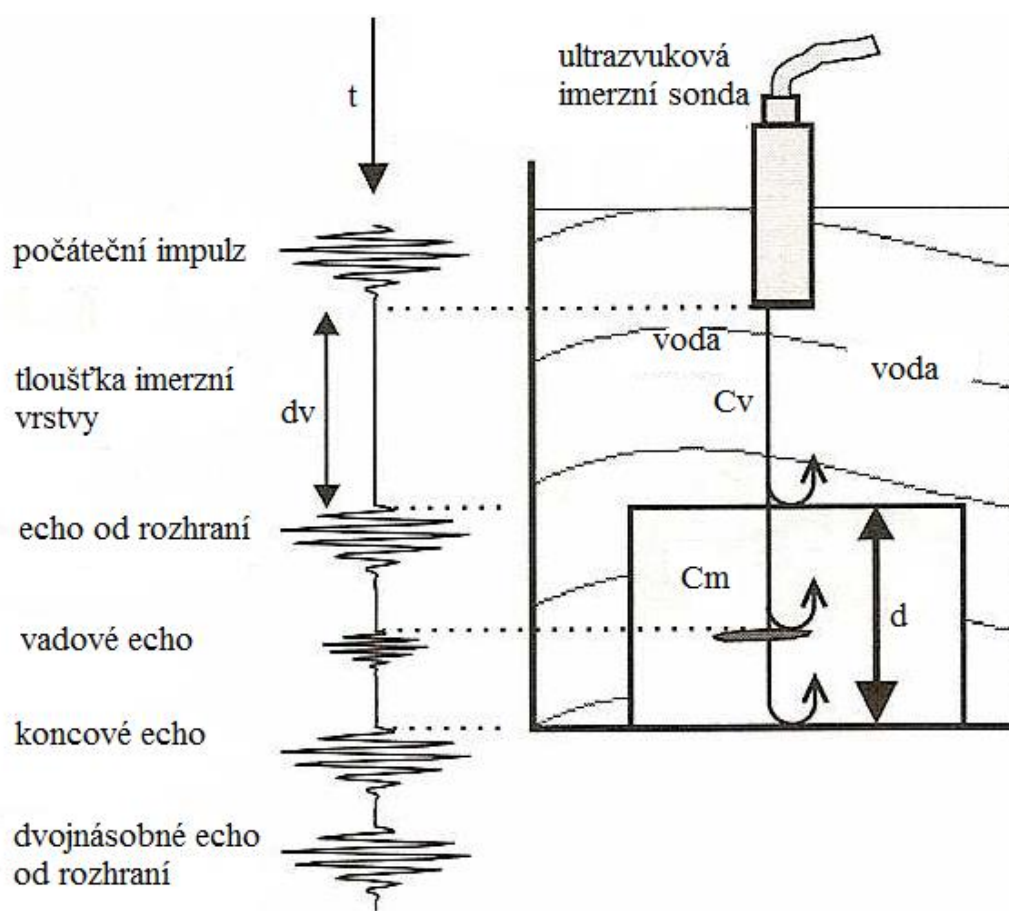
10.2.4 Imerzní metoda

Imerzní metoda probíhá stejně jako metoda odrazová, avšak s využitím imerzní vrstvy (vody) mezi sondou a vzorkem. Nanesená vrstva kapaliny pak tvoří tzv. kapalnou předsádku. Tloušťka této vrstvy závisí na tloušťce měřeného vzorku dle vztahu:

$$d_v = (1,1 - 1,5) \frac{c_v}{c_m} d, \quad (10.1)$$

kde c_v je rychlost šíření vlny v kapalině,
 c_m je rychlost šíření vlny v měřeném tělese,
 d_v je tloušťka imerzní vrstvy,
 d je tloušťka měřeného objektu.

[20]



Obr. 10.2 Imerzní ultrazvuková metoda

Zdroj: [20]

10.3 Faktory ovlivňující zkoušku

Na výsledek měření má vliv mnoho faktorů. Kromě přístroje a sondy to mohou být: akustická vazba, zkoušený povrch, zkoušený materiál, tvar zkoušené části a vlastnosti chyby. [14]

10.3.1 Akustická vazba

Kvůli přítomnosti vzduchu na rozhraní mezi sondou a zkoušeným materiálem se nanáší na povrch vrstva kapaliny, protože koeficient odrazu by byl velmi blízký číslu 1 a do zkoušeného materiálu by pronikla jen nepatrná část akustického tlaku vytvořeného měničem sondy. Po nanesení kapaliny na povrch se koeficient výrazně sníží, a tím se docílí, že do zkoušeného materiálu pronikne více akustického tlaku. Nejčastěji se jako kapalná vazbové médium používá voda, olej, speciální gel a při hrubším povrchu pak vazelína nebo glycerín.

Vazby lze pak následně rozdělit podle tloušťky vazbového média na:

- Kontaktní vazbu
- Mezerovou vazbu
- Imerzní vazbu

Kontaktní vazba se používá při ručním zkoušení. Přenos ultrazvuku materiálu pak závisí na přítlaku sondy.

Co se týče mezerové vazby, při malé změně tloušťky dojde k velkým změnám přenášeného akustického tlaku. Je tedy výhodné používat tuto vazbu tam, kde je zaručena stálá geometrie povrchu.

O imerzní vazbu se jedná tehdy, pokud zkouška probíhá tak, že je výrobek ponořen do nádrže s kapalinou, nebo přes stříkající proud kapaliny. Kapalina nesmí při zkoušení obsahovat bublinky a ani na povrchu zkoušené části se žádné bublinky vyskytovat nesmí. [14]

10.3.2 Zkoušený povrch

Vlastnosti zkoušeného povrchu mají podstatný vliv na přesnost vyhodnocování chyb. Na zaručení dobrého přenosu energie ultrazvukového impulsu ze sondy do materiálu musí být povrch zbaven rzi, barvy a špíny. Způsob čištění pak závisí od druhu vykonávaných zkoušek, u mnoha případů stačí očištění ocelovým kartáčem. Při náročnějších zkouškách je pak vhodné, aby byl povrch obroušen, avšak je nutné šetrné zacházení, aby broušený povrch neměl „vlny“. Vlnitost povrchu by měla za následek bodový styk s povrchem, a tedy nedostatečný přenos ultrazvuku do materiálu, nebo také deformaci vyzařovacího diagramu, což by mohlo zapříčinit nesprávné vyhodnocení chyb a možnost reprodukovatelnosti zkoušky. [14]

10.3.3 Zkoušený materiál

U anizotropních materiálů bývá časté, že jsou prozvučitelné jen v jednom určitém směru. Dalším vlivem ovlivňujícím měření je také zrnitost materiálu. Na prozvučitelnost materiálu má vliv jak orientace zrn, tak i střední velikost zrna. U hrubozrnných materiálů je nutné volit nízké frekvence, aby nedocházelo k „šumovému“ obrazu, avšak tím klesá rozlišovací schopnost. [14]

10.3.4 Tvar zkoušeného výrobku

Tvar zkoušené části je často příčinou ech nepocházejících z chyb materiálu. Tato echa se nazývají nepravá, falešná nebo tvarové indikace. Při komplikovaných tvarech zkoušených výrobků je nutné před zkouškami projít výkresovou dokumentaci a vypočítat pravděpodobnou polohu tvarových ech na časové základně. [14]

10.3.5 Vlastnosti chyby

Nejpodstatnější vlastnosti chyb jsou: skutečná velikost chyby, tvar chyby, povrch chyby a poloha a orientace chyby vůči ultrazvukovému svazku.

Při vyhodnocení velikosti chyby se vychází především z velikosti zobrazovaného echa (velké echa způsobují velkou chybu, avšak i malé echo může být velká chyba). Je to způsobené tvarem a orientací chyby vůči dopadajícímu svazku, kdy za nejvhodnější je považován kolmý dopad na povrch chyby, protože se odrazí největší část akustického tlaku zpět do sondy a echa jsou nejvyšší.

Tvar nalezené chyby má vliv na rozptyl ultrazvuku na chybě, například okrouhlé chyby odráží ultrazvuk v širokém prostorovém úhlu, to znamená, že se jen malá část odrazí zpět do sondy.

Povrch chyby ovlivňuje zkoušku tak, že i při malých odchylkách od ideálního geometrického povrchu je způsobeno, že se malá část odrazí zpět do sondy, i když chyba není vhodně orientovaná. [14]

Praktická část

11. Práce s elektrochemickými křemennými vahami (EQCM)

11.1 Měřící stanoviště

Měřící stanoviště se sestávalo z počítače s programovým prostředím, mikrovah QCM a potenciostatu VSP. Dále bylo k měření použito přípravku na uchycení krystalu a především samotný křemenný krystal a další nezbytné laboratorní pomůcky.

Při použití krystalů pro měření na EQCM vahách dochází ke kontaktu roztoku jen s jednou elektrodou, a to s tou, která má větší plochu. Nevýhodou u těchto krystalů je však jejich křehkost a vysoká cena. Při práci s těmito krystaly je důležitá opatrnost, jelikož může lehce dojít k odstranění nebo poškození elektrody při vkládání a dotahování krystalu do přípravku. Lze jej také poškodit nepřiměřeným utažením přední a zadní kontakt, který je připojen přes hranu, a tedy může dojít k odloupenutí a následnému zrušení propojení. [21]

Pro toto měření se využívá tříelektrodové zapojení které se sestává z těchto elektrod: Pracovní (working) – elektroda nanesená na krystalickém výbrusu, která je v kontaktu s roztokem.

Referenční (reference) – tato elektroda udržuje konstantní potenciál, může být kalomelová nebo argento-chloridová.

Pomocné (auxiliary) – bývá vyrobena z platinového drátku nebo plíšku.

[9]



Obr. 11.1 Přední a zadní strana krystalu (Au krystal)

Zdroj: [21]

11.2 Cyklická voltametrie

Cyklická voltametrie (cyclic voltammetry, CV) je jedna z mnoha metod odvozených od polarografie, při které zkoumanou soustavou prochází elektrický proud. Zkoumaný povrch je ponořen do elektrolytu a tvoří pracovní elektrodu. Mezi touto elektrodou a proti elektrodou proudí elektrický proud. Proti elektroda bývá nejčastěji zhotovena z platiny (Pt) a pracovní elektroda z uhlíkové pasty či kovových krystalů (Pt, Au), na které jsou naneseny zkoumané katalytické vrstvy. Napětí na pracovní elektrodě je nastavováno vzhledem k referenční elektrodě, která bývá tvořena například kalomelem nebo argent-chloridem (Ag-AgCl).

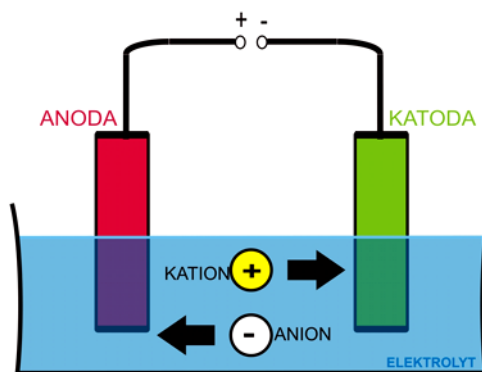
Měření probíhá tak, že napětí, které je na pracovní elektrodě, je vůči referenční elektrodě cyklicky lineárně navyšováno a snižováno za použití potenciostatu. Cyklické změny napětí následně vyvolávají změny proudu, které jsou dále vynášeny a zaznamenávány v podobě závislosti daného napětí na proudu a tvoří tzv. voltamogram. [9]

11.3 Galvanický článek

Galvanické články využívají chemické reakce, při které dochází k uvolňování energie ve formě elektrického pole. Galvanický článek se sestává ze dvou chemicky různých elektrod a elektrolytu. Elektrodu, na které probíhá oxidace, nazýváme anodou. Elektrodu, na které probíhá redukce, nazýváme katodou. Elektrické napětí je dáno rozdílem elektrických potenciálů na elektrodách. Po zapojení článku do obvodu probíhají uvnitř něj chemické reakce, kterými se postupně snižuje elektrická energie uložená v článku. Tím se článek vybíjí. Tyto reakce lze rozdělit na vratné, při kterých se dá článek znovu nabít (tzv. sekundární články – akumulátory), nebo nevratné, u kterých se napětí po vybití článku již nedá obnovit (tzv. primární články). Jednotlivé galvanické články vytvářejí napětí řádově v desetinách, či jednotkách voltů, proto dochází k jejich sériovému spojování do baterií, jejichž hodnota je pak dána součtem hodnot propojených galvanických článků. [22]

11.4 Elektrodepozice

Elektrolýza je fyzikálně chemický jev, který je vyvolán průchodem elektrického proudu kapalinou. Díky disociaci vznikají v kapalině kladné a záporné ionty, které se průchodem elektrického proudu uvedou do pohybu směrem k elektrodě na které je opačný potenciál. Kladně nabité kationty přijímají elektrony z katody a záporně nabité anionty předávají své přebytečné elektrony kladně nabitě anodě. Takto vzniká elektroneutrální látka. Na elektrodách probíhají oxidační a redukční děje, kdy při redukčním procesu dochází k vylučování kovu na katodě a zároveň dochází k rozpouštění kovu na anodě. [9]



Obr. 11.2 Schéma průběhu elektrolýzy

Zdroj: <http://www.webchemie.cz/elektrolýza.html>

11.5 Faradayovy zákony

První zákon: „Hmotnost látky vyloučené na elektrodě při elektrolýze je přímo úměrná prošlému náboji, který přenesly ionty při této elektrolýze.“

$$m = A \cdot I \cdot t, \quad (11.1)$$

kde m je hmotnost vyloučené látky,
 A je elektrochemický ekvivalent,
 t je čas,
 I je proud.

V této rovnici je možno nahradit $I \cdot t$ za náboj Q .

Druhý zákon: „Hmotnostní množství různých látek přeměněných na elektrodách průchodem stejného elektrického náboje jsou k sobě v poměru svých ekvivalentních hmotností. Elektrochemický ekvivalent A závisí přímo úměrně na molární hmotnosti látky (M_m).“

$$A = \frac{M_m}{F \cdot z}, \quad (11.2)$$

kde A je elektrochemický ekvivalent,
 F je Faradayova konstanta; $F = 9,6481 \cdot 10^4 \text{ C.mol}^{-1}$,
 z je počet elektronů potřebných pro vyloučení jedné částice,
 M_m je molární hmotnost látky.

[9]

11.6 Praktické měření s EQCM – depozice olova

Depozice olova probíhala po dobu 60 s ve 100 ml roztoku sestávajícího se z 0,5 M dusičnanu olovnatého ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) a 0,5 M kyseliny dusičné (HNO_3). Obvod byl po celou dobu měření napájen konstantním proudem hodnoty 0,5 mA.

Pro toto měření byl použit přípravek se zlatým krystalem, který sloužil jako pracovní elektroda. Tento přípravek byl pomocí kabelu připojen k oscilátoru. Jako pomocná elektroda byl zvolen platinový plíšek a referenční elektroda byla z kalomelu o potenciálu 244 mV.

Váhy byly před spuštěním procesu uvedeny do rezonance. Po spuštění měření počítačem se začaly zaznamenávat změny potenciálu E_{we} a frekvence f způsobené deponováním vrstvy na krystal, kdy se s přibývajícím hmotností na pracovní elektrodě snižovala frekvence. Tato křivka se vynášela v závislosti na čase probíhajícího měření.

Následně byl proveden výpočet teoretické a reálné hmotnosti, která vznikla na krystalu. Pro teoretickou hodnotu hmotnosti bylo použito upravené Faradayovy rovnice:

$$m = \frac{M_m \cdot Q}{n \cdot F} = \frac{207,2 \cdot 0,03}{2 \cdot 9,6481 \cdot 10^4} = 32,2 \mu\text{g}, \quad (11.3)$$

kde M_m je molární hmotnost olova; rovna $331,2 \text{ g.mol}^{-1}$,
 z je počet elektronů potřebných k vyloučení jedné molekuly,
(v tomto případě $z = 2$),
 F je hodnota Faradayovy konstanty ($F = 9,6481 \cdot 10^4 \text{ C.mol}^{-1}$),
 Q je náboj přenesený během depozice. Pro jeho výpočet byl použit vztah:

$$Q = I \cdot t = 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 60 = 0,03 \text{ C}. \quad (11.4)$$

Při výpočtu reálné hmotnosti nanesené vrstvy bylo použito Sauerbreyových rovnic, z kterých byla vyjádřena a vypočtena změna hmotnosti:

$$\Delta f = \frac{-2f_0^2 \Delta m}{A_p(\mu_q \rho_q)^{1/2}}, \quad (11.5)$$

$$\Delta m = \frac{\Delta f A_p (\mu_q \rho_q)^{1/2}}{-2f_0^2} = \frac{-902,251 * 1,37 \cdot 10^{-4} * (2648 * 2,947 \cdot 10^{16})^{1/2}}{-2 * (5 \cdot 10^6)^2} = 21,9 \mu g, \quad (11.6)$$

kde Δf je změna frekvence,
 f_0 je rezonanční frekvence samotného rezonátoru;
 která v tomto případě byla rovna 5 MHz,
 A_p je hodnota piezoelektricky aktivní oblasti; která činila 1,37 cm²,
 ρ_q je hustota křemene; která byla dosazována v hodnotě 2648 kg.m⁻³,
 μ_q je hodnota modulu pružnosti ve střihu; rovna 2,947.10¹¹ g.cm⁻¹.s⁻².

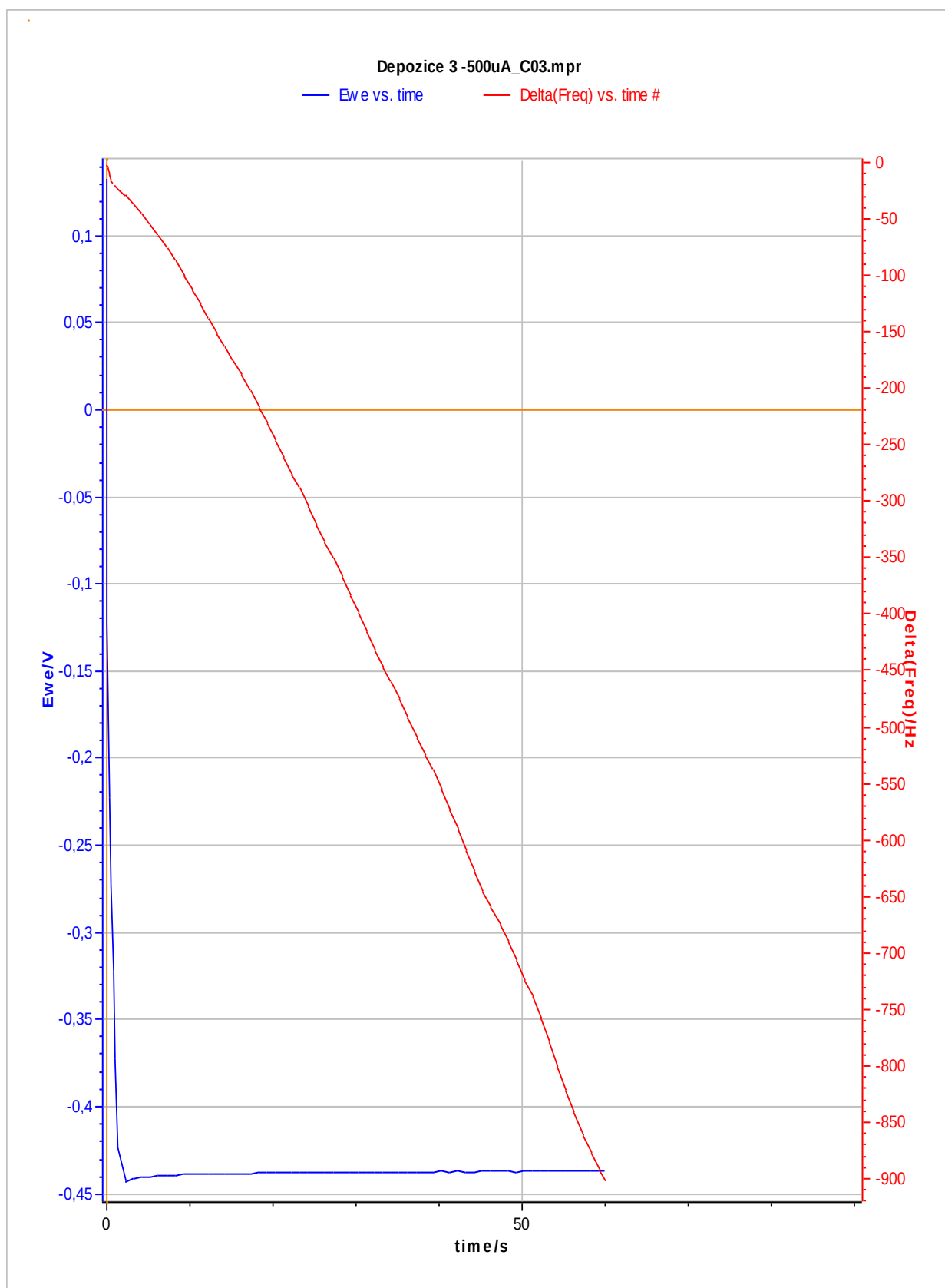
Rozdíl mezi teoreticky vypočtenou a reálně změřenou a následně vypočtenou hodnotou hmotnosti byl roven 10,365 μg. Příčinou rozdílnosti teoretické a reálné hodnoty hmotnosti může být důvod, že při teoretickém výpočtu je počítáno se 100 % účinností, kdežto reálná účinnost byla nižší.

Po vypočtení změny hmotnosti je pak možné spočítat výslednou změnu tloušťky nadeponované vrstvy:

$$\Delta t = \frac{\Delta m}{\rho_q A_p} = \frac{21,849 \cdot 10^{-6}}{2648 * 1,37 \cdot 10^{-4}} = 60,2 \mu m, \quad (11.7)$$

kde Δt je změna tloušťky nadeponované vrstvy,
 Δm je změna hmotnosti,
 ρ_q je hustota křemene,
 A_p je hodnota piezoelektricky aktivní oblasti.

K tomuto experimentu je dále přiloženo grafické znázornění provedeného experimentu, kde jsou graficky modře znázorněny změny potenciálu E_{we} a červeně změny frekvence f v závislosti na čase t .



Obr. 11.3 Znázornění provedeného experimentu v závislosti na čase t .

(modrá - změna potenciálu Ewe, červená změna frekvence f)

12. Práce s ultrazvukovým zařízením od firmy Olympus

12.1 Ovládání přístroje EPOCH LT

Hlavním ovládacím prvkem tohoto přístroje je klávesnice, která umožňuje jednoduchou manipulaci pomocí barevně rozlišených tlačítek s různými funkcemi. Pro zapnutí, či vypnutí přístroje slouží zelená klávesa [ON/OFF].

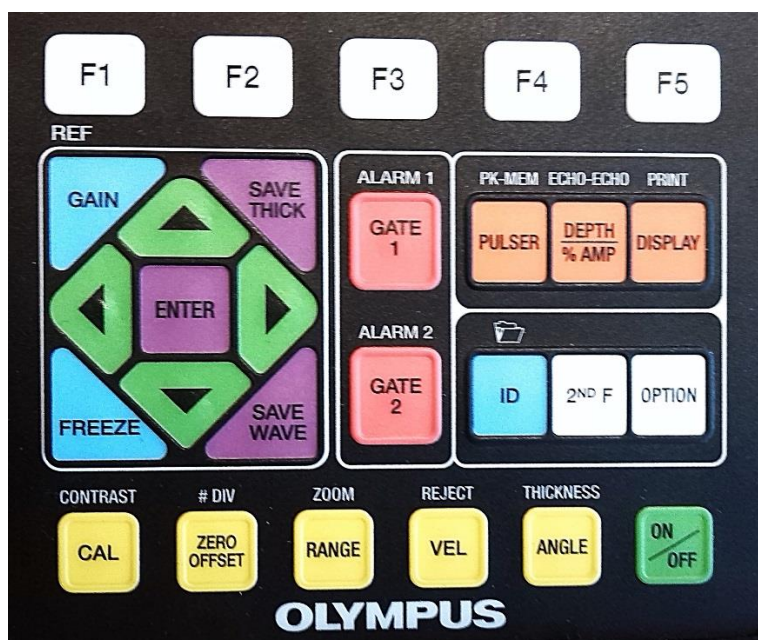
Skupina žlutých tlačítek ve spodní části je určena jak ke kalibraci přístroje, tak i k využití ostatních funkcí, jako je například tlačítko [RANGE] sloužící k nastavení rozsahu detektoru. Pomocí tlačítka [VEL] lze nastavit rychlost šíření ultrazvukových vln daným materiálem a tlačítkem [ANGLE] nastavujeme tloušťku měřeného materiálu.

Další skupinou jsou tlačítka šedé barvy ve vrchní části, která usnadňují přístup k předvoleným hodnotám parametrů. Stisknutím některé funkční klávesy (F1 – F5) lze změnit nastavení požadovaného parametru. Základní ultrazvukové parametry lze také měnit pomocí klávesy [ENTER] a zelených kurzorových kláves [↑] [↓] [←] [→] po stisknutí [OPTION].

Pomocí fialových kláves lze ukládat naměřenou tloušťku či uložit námi naměřenou vlnovou křivku. Klávesy [GATE1] a [GATE2] umožňují vymezení oblasti měření. Oranžové klávesy pak slouží k nastavení generátoru impulzů, nastavení režimu zobrazení a hloubky amplitudy.

V neposlední řadě jsou tu ještě modrá tlačítka, kde tlačítko [ID] slouží k vyhledávání uložených záznamů v paměti přístroje. Dále tlačítko [FREEZE], po jehož zmáčknutí dojde ke zmrazení aktuálního průběhu a umožňuje tak lepší čitelnost hodnot z přístroje a tlačítko [GAIN] sloužící k nastavení zesílení ultrazvukového svazku.

Jako poslední je tu klávesa [2nd F] po jejímž stisknutí se přepneme na druhou funkci dané klávesy, která je nadepsána nad tlačítkem. [23]



Obr. 12.1 Ovládací klávesy zařízení EPOCH LT

12.2 Kalibrace přístroje

Kalibrace slouží k nastavení přístroje, abychom dosáhli co nejpřesnějšího měření na konkrétním materiálu s danou teplotou a za pomoci správně zvoleného převodníku. Během kalibrace je nutno nastavit nulový posun, který kompenzuje časovou prodlevu mezi vysláním hlavní ultrazvukové vlny a vstupem zvuku do testovaného vzorku. Dále je také nutno nastavit rychlostní parametry detektoru EPOCH LT. Přístroj musí být naprogramován tak, aby rychlost odpovídala rychlosti zvuku v materiálu testovaného vzorku. Přístroj EPOCH LT je vybaven funkcí automatické kalibrace (klávesa [CAL]), což umožňuje snazší provedení kalibrace.

Ke kalibraci využíváme kalibračního bloku, jehož složení je vyryto na jedné z ploch přípravku. U tohoto bloku známe dvě tloušťky a také rychlost šíření ultrazvukových vln tímto materiálem. V bloku se nachází malý otvor, který slouží k nastavení úhlových sond. Na hraně bloku jsou dále vyznačeny velikosti jednotlivých úhlů, které s ním otvor svírá. [13]



Obr. 12.2 Kalibrační měrka

12.3 Ultrazvukové sondy

Ultrazvuková sonda je elektroakustické zařízení, které se skládá z jednoho nebo více měničů, které slouží k transformaci elektrické energie na mechanickou a naopak. Měníče v těchto sondách jsou vyráběny z piezoelektrických materiálů a piezoelektrických polymerů.

Ultrazvukové sondy se dají rozdělit do několika hlavních skupin:

- Přímá sonda – sonda obsahující jeden měnič pro vysílání nebo přijímání akustických vln. Akustická osa je kolmá k povrchu objektu. Při její aplikaci je generátor impulzů přímo spojen se vstupem zesilovače přes oddělovací diody. Nevýhodou u těchto sond je dokmitávající impuls, který prodlouží počáteční echo a způsobí tzv. „mrtvou zónu“, ve které nelze rozpoznat vadové echo.
- Úhlová sonda – ta vysílá ultrazvukový svazek do materiálu pod určitým úhlem.
- Dvojitá sonda – skládá se ze dvou akusticky izolovaných měničů. Jeden z těchto měničů slouží jako vysílač a druhý plní funkci přijímače ultrazvukových vln.
- Fokusující sonda – v případě této sondy je akustický svazek soustředěn do malého prostoru. Kladem u této sondy je vysoká citlivost v místě, kde je fokusován ultrazvukový signál. [24]

12.4 Měření rychlosti šíření ultrazvuku ve vybraných materiálech

Pro měření bylo použito několika vzorků z různých kovových materiálů o rozdílných tloušťkách. V prvním kroku byla za pomoci digitálního mikrometru změřena průměrná tloušťka každého vzorku. Poté bylo možno začít s měřením ultrazvukovou sondou. K tomuto měření byla použita přímá sonda s frekvencí 4 MHz. Kontaktní prostředí mezi sondou a vzorkem tvořila destilovaná voda.

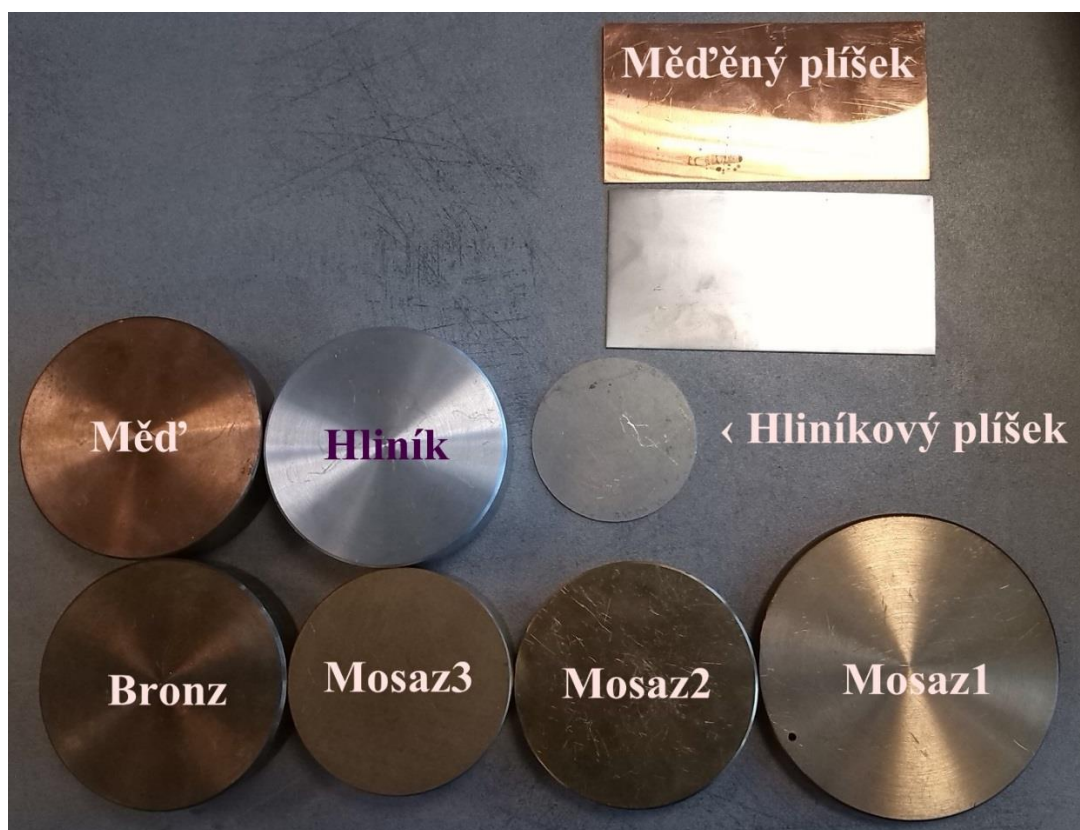
Po přiložení sondy na zkoušený prvek šlo pozorovat na displeji přístroje EPOCH LT echa, která znázorňovala odražené vlny od prostředí s jinou rychlostí ultrazvukového vlnění. Nejdříve byl nastaven pomocí tlačítka [RANGE] a kurzorů požadovaný rozsah. Stisknutím klávesy [GATE 1] (brána, na které byla sonda připojena) byla vymezena sledovaná oblast, která byla nastavena vždy podle šířky odraženého echa (koncové, nebo počáteční).

Nastavením přístroje pro měření tloušťky vzorku metodou echo-echo, stlačením kláves [2nd F] a [DEPT/%AMP], se v pravém horním rohu displeje zobrazila číselná hodnota udávající tloušťku materiálu v mm.

Poté klávesou [VEL] a šipek bylo možné měnit hodnotu rychlosti šíření ultrazvukových vln materiálem a s touto hodnotou se měnila i zobrazovaná hodnota tloušťky. V okamžiku, kdy hodnota tloušťky zobrazovaná přístrojem byla shodná s tloušťkou předem změřenou mikrometrem, bylo možné z displeje odečíst rychlost šíření ultrazvuku daným materiálem.

Toto měření bylo stejným postupem provedeno u všech vzorků a hodnoty odpovídající šíření ultrazvuku vzorků byly následně zaznamenány do tabulky (Tabulka 12.1), kde kromě naměřených hodnot jsou uvedeny i teoretické intervaly hodnot těchto rychlostí pro použité materiály.

Tyto teoretické hodnoty jsou však pouze orientační, neboť u každého materiálu záleží na jeho přesném složení. Další odchylky naměřených hodnot od hodnot teoretických mohly být způsobeny například nečistotami na povrchu vzorků.



Obr. 12.3 Fotografie vybraných vzorků měření

Tabulka 12.1: Tabulka naměřených a teoretických hodnot pro měřené vzorky materiálů

Materiál	Průměrná tloušťka materiálu [mm]	Rychlost šíření ultrazvuku [m/s]	
		Teoretická hodnota	Naměřená hodnota
Mosaz1	13,64	4385/4700	4036
Mosaz2	22,76	4385/4700	4180
Mosaz3	9,22	4385/4700	3886
Hliník	23,40	5200/6400	5953
Měď	22,81	3500/4720	4447
Bronz	23,49	záleží na slitině	4330
Měděný plíšek	0,52	3500/4720	3139
Hliníkový plíšek	0,92	5200/6400	6304

12.5 Návrh laboratorní úlohy - Detekování vady v materiálu

Návrh laboratorní úlohy má za úkol seznámit studenty s ultrazvukovou defektoskopií při vyhodnocování předloženého vzorku.

12.5.1 Cíl úlohy

Cílem úlohy je u předloženého vzorku najít a vyhodnotit podpovrchovou vadu materiálu. Dále také proměřit rychlost šíření ultrazvuku v tomto vzorku a z té určit, o jaký materiál se jedná.

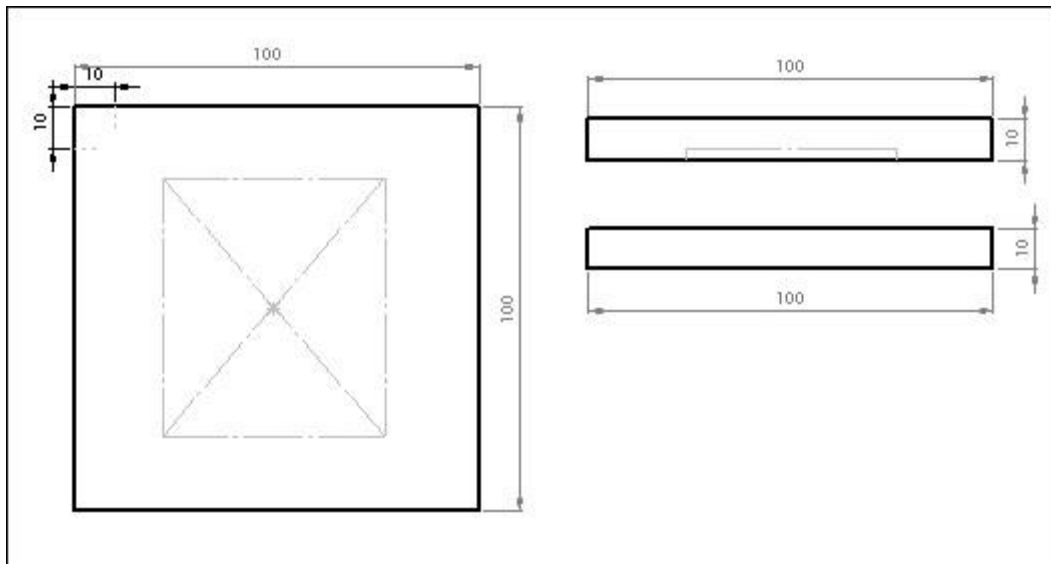
12.5.2 Zadání úlohy

U předloženého vzorku kovové destičky 100x100 mm, složené ze dvou dílů o tloušťce 2x10 mm, změřte rychlost šíření ultrazvukových vln materiálem a podle výsledné rychlosti se pokuste určit, o jaký materiál se jedná. Změřenou rychlost ultrazvuku použijte ke stanovení délky ultrazvukové vlny v materiálu a zdůvodněte vhodný kmitočet sondy pro další měření. Dále pak prozkoušením materiálu ultrazvukovou sondou určete místo, tvar vady a její hloubku.

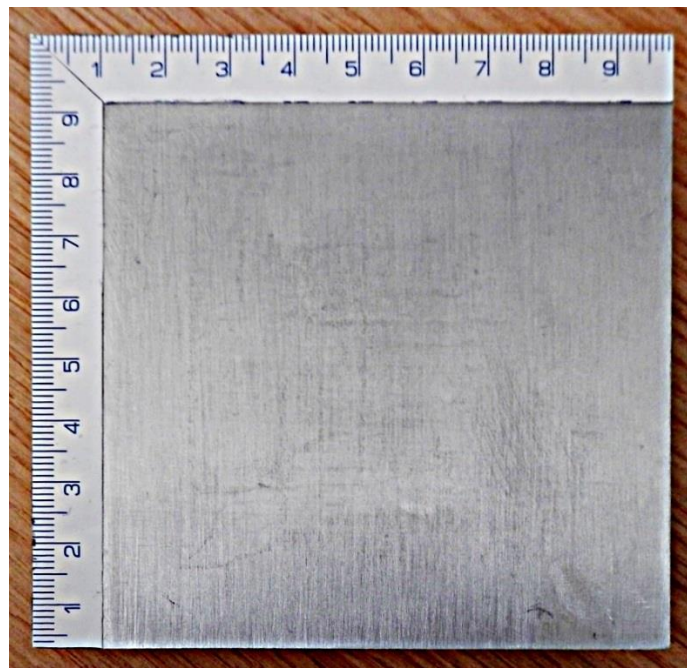
12.5.3 Postup měření

- Zapojte měřicí zařízení EPOCH LT do sítě a připojte k němu ultrazvukovou sondu.
- Zapněte přístroj a dle přiloženého návodu proveďte jeho kalibraci.
- Následně na vzorek naneste destilovanou vodu, která bude sloužit jako kontaktní vrstva pro přenos signálu. Podle návodu proveďte měření pro zjištění rychlosti šíření ultrazvuku daným zkušebním materiálem:
 - Nejdříve si za pomoci mikrometru několikrát na různých místech změřte tloušťku daného vzorku a její hodnotu zprůměrujte.
 - Stisknutím kláves [2nd F] a [DEPTH/%AMP] se aktivuje volitelný režim měření metodou echo-echo.
 - Následně pomocí kláves [F1] nebo [F2] určete, zda chcete zobrazit echa od vrcholu k následujícímu vrcholu, či od kraje ke kraji.
 - Poté za pomoci tlačítek [GATE1], či [GATE2] (záleží, na které bráně je sonda zapojena) a šipek, lze nastavovat polohu a šířku brány.
 - Přiložte sondu na zkoušený prvek. Na přístroji by se měla objevit alespoň 2 echa, tedy počáteční a koncové. Další echa jsou pak vadová.
 - Najed'te na koncové echo a v pravém horním rohu by se měla zobrazit měřená tloušťka. Po stisknutí tlačítka [ANGLE] se objeví tabulka, do které zadejte vámi změřenou průměrnou tloušťku materiálu kurzorovými klávesami. Poté se na displeji zobrazí výsledná rychlost ultrazvuku šířícího se materiálem. Podle této hodnoty pak lze určit, o jaký materiál se jedná.
 - Dále stanovte vlnovou délku ultrazvuku v materiálu a dle ní vyhodno'te vhodnou sondu pro zjištění vady v materiálu.

- Pro vyhodnocování vad v materiálu přejíždějte sondou po vzorku vodorovně s osou x a postupně se posouvejte vertikálně po ose y.
- Na displeji se budou zobrazovat vadová echa a po najetí brány na jejich polohu se zobrazí i jejich hloubka od povrchu materiálu. Je nutno počítat i s odrazy od spoje destiček, který zkušební vzorek pólí. Díky této drážce je pak možno určit přibližnou hloubku vady (odečtením hloubky spoje od hloubky vady). Dále pak lze odečíst polohu vady na základě rastrů na destičce.
- Po prozkoušení celé destičky zakreslete výsledný tvar nalezené vady. A určete její hloubku.



Obr. 12.4 Návrh destičky pro defektoskopické měření

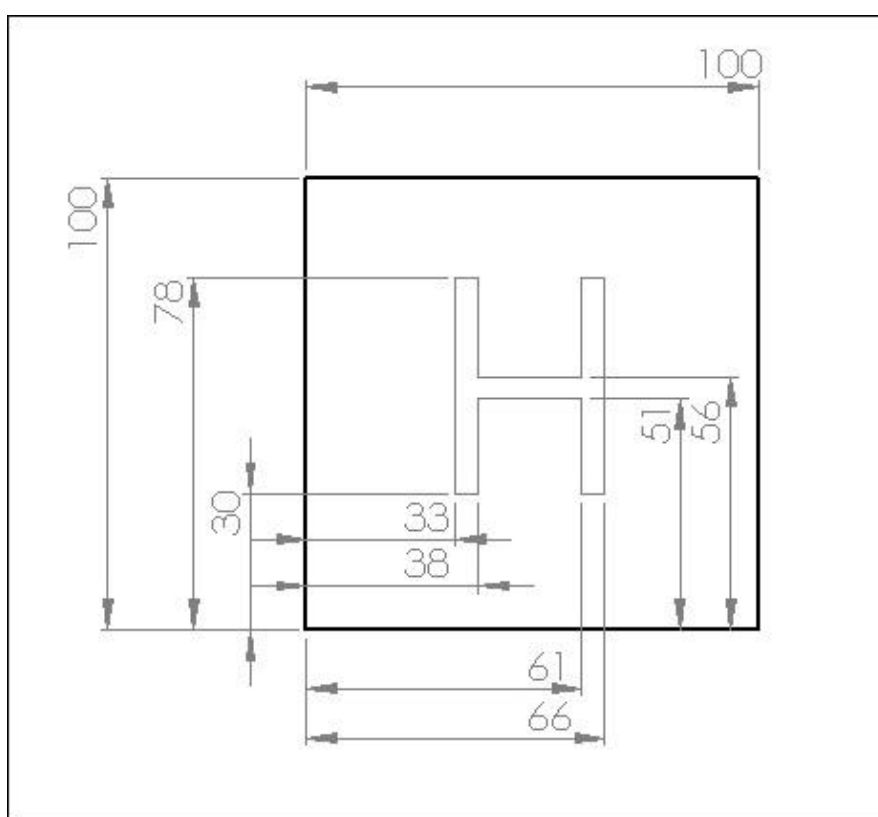


Obr. 12.5 Fotografie měřeného vzorku

12.5.4 Praktické ověření

Tento experiment byl dle předchozího měřicího postupu ověřen v laboratoři. Naměřená průměrná tloušťka vzorku byla 19,3 mm. Rychlost šíření ultrazvuku v materiálu určená přístrojem pak byla rovna $6\,267\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což materiálově odpovídá rychlosti ultrazvuku v hliníku. Dle vztahu (7.6) byla stanovena vlnová délka ultrazvuku v materiálu. Pro sondu 4 MHz je délka vlny 1,57 mm a pro sondu 20 MHz je délka vlny 0,31 mm. Vzhledem k tomu, že očekávaný rozměr vady byl očekáván v milimetrech, bylo třeba použít sondu pro niž je délka vlny kratší než rozměr vady, aby bylo dosaženo co nejlepší rozlišovací schopnosti. Z toho důvodu byla pro měření použita sonda 20 MHz.

Po prozkoušení celého vzorku pak byla vyhodnocena výsledná vada. Ta měla tvar písmene H, které mělo šířku čáry 5 mm a hloubku 2 mm. (viz. Obr. 12.6)



Obr. 12.6 Výsledný tvar vady

13. Závěr

Tato bakalářská práce spočívala v prostudování fyzikálních základů piezoelektrického jevu a možnosti jeho uplatnění v technické praxi se zaměřením na piezoelektrické rezonátory a ultraakustiku.

Tyto fyzikální základy jsou vysvětleny v teoretické části této práce, kde jsou nastíněny důležité fyzikální základy piezoelektrického jevu spolu s popisy dvou nejpoužívanějších piezoelektrických materiálů, což je křemen a piezoelektrická keramika. Dále je zde také vysvětlen samotný princip piezoelektrického jevu a jeho uplatnění v technické praxi. Do teoretické části také spadá základní rozbor piezoelektrických rezonátorů a jejich využití.

Následně je v teoretické části vysvětleno využití elektrochemických křemenných krystalových mikrovah (EQCM), kde jsou popsány i základní rovnice sloužící pro výpočet změny hmotnosti z naměřených veličin.

Hlavní teoretická část je pak zaměřena na oblast ultraakustiky, kde jsou popsány jak základní veličiny ultrazvukového pole, tak základní princip ultrazvuku, odraz a lom ultrazvukových vln či popis ultrazvukového přístroje. Na tuto část pak navazuje teoretický rozbor ultrazvukové defektoskopie sestávající se z definice vad a ze současně používaných ultrazvukových defektoskopických metod.

V rámci praktické části byl proveden experiment s elektrochemickými krystalovými křemennými mikrovahami (EQCM), kdy byla prováděna elektro-depozice olova ve 100 ml roztoku, sestávajícího se z 0,5 M $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ a 0,5 M HNO_3 , po dobu 60 s. Z tohoto měření je přiložen i graf, kde je znázorněna změna potenciálu E_{we} a frekvence f v závislosti na čase. Poté za pomoci Faradayovy rovnice byla vypočtena teoretická hodnota hmotnosti, která vznikla na krystalu. Tato hodnota pak byla srovnána s reálnou hodnotou hmotnosti, která byla vypočtena z upravených Sauerbreyových rovnic. Teoretická hodnota byla rovna hodnotě 32,2 μg a reálná vypočtená hodnota 21,9 μg . Rozdíl mezi těmito hodnotami mohl být způsoben tím, že při výpočtu teoretické hodnoty bylo počítáno se 100 % účinností, kdežto reálná účinnost byla o nižší.

Další praktickou činností byla práce s ultrazvukovým zařízením od firmy Olympus EPOCH LT. Na tomto zařízení byl proveden experiment týkající se šíření rychlosti ultrazvukového vlnění v různých materiálech o různých tloušťkách. Experiment byl proveden na celkem osmi kovových materiálech. U každého vzorku byla nejprve změřena jejich průměrná hodnota tloušťky za pomoci digitálního mikrometru. Poté bylo provedeno měření rychlosti, kde jako kontaktní prostředí byla použita destilovaná voda. Po nastavení přístroje na měření šíření rychlosti v látce za pomoci naměřené tloušťky byla na vzorek přiložena sonda. Při snižování, či zvyšování rychlosti ultrazvuku se v pravém horním rohu zobrazovala hodnota tloušťky materiálu. V okamžiku kdy byla hodnota tloušťky shodná s hodnotou předem změřenou mikrometrem, bylo možné odečíst rychlost šíření ultrazvuku pro daný materiál. Údaje o tloušťce a naměřené rychlosti ultrazvuku byly pro všechny vzorky zaneseny do tabulky, kde také byly uvedeny teoretické hodnoty šíření ultrazvuku v daných látkách, určeny k porovnání. Tyto teoretické hodnoty však mohou být zavádějící, jelikož u každého materiálu záleží na jeho přesném složení. Většina naměřených hodnot ležela v intervalu možných teoretických hodnot, nebo jim byla blízká. Další možné odchylky od těchto teoretických hodnot pak mohly být způsobeny nečistotami na povrchu materiálu, nebo necelistvostmi na povrchu.

Poslední praktickou částí pak byl možný návrh laboratorní úlohy pro studenty. Tento návrh se zabýval ultrazvukovou defektoskopií, kdy cílem této úlohy je najít a vyhodnotit podpovrchovou vadu materiálu. Předloženým vzorkem je kovová destička, složená ze dvou stejných dílů, z nichž v jednom z nich se nachází vada určená k vyhodnocení. Úkolem studentů tedy bude nejprve změřit tloušťku materiálu, která jim umožní identifikovat rychlost šíření ultrazvuku materiálem a následně z jakého materiálu je vzorek vyroben. Dalším úkolem poté bude určit vhodnější sondu pro následné defektoskopické měření. Posléze přejížděním sondy po povrchu materiálu vodorovně s osou x a postupným posouváním vertikálně po ose y , lze identifikovat tvar vady za pomoci rastrů, které jsou součástí destičky. Jako další parametr k zjištění je pak hloubka vad. Všechny tyto parametry by následně měly být zakresleny. Jako kontaktní prostředí by měla být použita destilovaná voda. Pro změření těchto parametrů je v bakalářské práci popsán stručný postup měření, podle kterého lze postupovat.

Tento návrh byl následně prakticky ověřen, dle navrženého pracovního postupu. Mikrometrem změřená průměrná tloušťka vzorku byla 19,3 mm. Rychlost ultrazvuku šířící se materiálem byla rovna $6\,267\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, podle které byl určen materiál zkoušeného vzorku, což byl hliník. Pro defektoskopické měření z důvodu rozlišovací schopnosti byla zvolena sonda s frekvencí 20 MHz. Po prozkoušení celé destičky pak byl zakreslen výsledný tvar vady, která měla tvar písmene H o šířce čáry 5 mm a hloubce 2 mm (viz Obr. 12.6).

Seznam použité literatury

- [1] ČVUT PRAHA, Ústav Fyziky. *Piezoelektrické jevy: Základy piezoelektrických jevů a jejich aplikace v moderních technologiích* [online]. Praha, 2013. Dostupné z: http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_11.pdf. Přednáška. ČVUT Praha.
- [2] KAZELLE, J. a kol. *Výrobní procesy*. Brno, 2014. Skripta předmětu Výrobní procesy. VUT v Brně
- [3] KOUKOLÍK, V. *Využití piezoelektrického jevu v praxi* [online]. Plzeň, 2013. Dostupné z: <tps://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/10094/DIPLOMKA.pdf?sequence=1>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Eva Kučerová, CSc.
- [4] PETRŽÍLKA, V. a SLAVÍK, J. B. *Piezoelektrina a její použití v technické praxi*. V Praze: Jednota českých matematiků a fyziků, 1940, 116, [I]
- [5] *Základy piezokeramické technologie: Piezoelektrický princip, perovskit a polarizace*. www.ceramtec.cz [online]. Dostupné z: <http://www.ceramtec.cz/ceramic-materials/piezo-ceramics/basics/>
- [6] Encyklopedie fyziky: Piezoelektrická keramika. <http://fyzika.jreichl.com/> [online]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main/article/view/422-piezoelektricka-keramika>
- [7] RYŠAVÝ, L.. *Odhad parametrů prvků v náhradním elektrickém obvodu piezoelektrického rezonátoru* [online]. Brno, 2011. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42356. Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Sedlák, Ph.D.
- [8] ZIMA, J. a P. ELEDER. METODA QCM-D DOBÝVÁ JEDEN OBOR ZA DRUHÝM. *CHEMAGAZÍN* [online]. 2012, XXII(5). Dostupné z: <http://www.chromspec.cz/download/chromspec-qcm-d.pdf>
- [9] KUŽÍLEK, J. *Sledování hmotnostních změn pomocí piezoelektrického rezonátoru* [online]. Brno, 2009. Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce P. Špičák.
- [10] KAZELLE, J. a kol. *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy*. Brno 2015. Elektronická skripta. VUT v Brně.
- [11] POUČ, P. *Měření rychlosti šíření ultrazvuku* [online]. Brno, 2009. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=14149. Diplomová práce. VUT v Brně.
- [12] VAŇKÁT, T. *Určování směru příchodu ultrazvukového signálu v prostředí s odrazy* [online]. Pardubice, 2012. Dostupné také z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/48512/VankatT_UrcovaniSmeru_ZN_2012.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Diplomová práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
- [13] KRISTEK, M. *Ultrazvuk v diagnostice materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 26 s. Bakalářská práce. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.
- [14] KOPEC, B. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 9788072045914. Dostupné také z: <http://krameriusndktest.mzk.cz/search/handle/uuid:426bef80-f2e5-11e4-88cd-005056827e52>
- [15] RUSINA, M. *Stanovení vlastností ultrazvukových sond: diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 87 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vratislav Harabiš, Ph.D. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=100121

- [16] ŠIMEČEK, R. *Moderní metody v nedestruktivním zkoušení materiálů pomocí ultrazvuku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Juliš, Ph.D. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39250
- [17] *TECHMAGAZÍN* [online]. Praha: TECH MEDIA PUBLISHING s r.o., 2011, 2011(8). Dostupné také z: http://www.techmagazin.cz/ke_stazeni/T082011M.pdf
- [18] REGAZZO, R. a REGAZZOVÁ, M. *Ultrazvuk: základy ultrazvukové defektoskopie*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2013, 290 s. ISBN 978-80-7300-466-8.
- [19] FORMAN, M. *Vliv struktury materiálu na hodnotitelnost ultrazvukovou defektoskopií* [online]. Pardubice, 2014. Diplomová práce. Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Doc. Ing. P. Švanda, Ph.D. Dostupné také z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/58959/FormanM_VlivStruktury_PS_2014.pdf?sequence=3&isAllowed=y.
- [20] KOKTAVÝ, J. *Elektroultrazvuková diagnostika poškození obráběných materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 33 s. Vedoucí práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29973
- [21] PLÉHA, D. *Měření vlastností oxidů manganu (MNOX) metodou EQCM* [online]. Brno, 2010. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27880. Vysoké učení technické V Brně. Vedoucí práce Novák, V.
- [22] ZUSKOVÁ, I. *Elektrochemie* [online]. Praha. Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze, Katedra fyzikální a makromolekulární chemie. Dostupné také z: <https://www.natur.cuni.cz/chemie/fyzchem/zuskova/soubory/fch-ii/elektrochemie-s1.pdf>
- [23] OLYMPUS NDT. *EPOCH LT: Ultrazvukový detektor trhlin - uživatelský manuál*. USA, 2005.
- [24] Ultrazvukové sondy. [Http://www.ndt.cz/](http://www.ndt.cz/) [online]. 2009. Dostupné z: http://www.ndt.cz/prilohy/44/uz_sondy.pdf

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Směry sil ovlivňující piezoelektrický prvek	9
Obr. 2.2 Feroelektrická keramika před polarizací, během polarizace a po ní	10
Obr. 3.1 Přímý piezoelektrický jev	11
Obr. 3.2 Nepřímý (inverzní) piezoelektrický jev	11
Obr. 4.1 Možnosti využití piezoelektrického jevu	12
Obr. 5.1 Vybrané typy kmitů piezoelektrických rezonátorů	13
Obr. 6.1 Typy řezů křemenného krystalu	14
Obr. 6.2 Nahoře – transversální střižná vlna v křemenu a elektrodách	16
Obr. 6.3 Řez QCM krystalu kmitajícího ve střižném módu	16
Obr. 7.1 Odraz a lom akustické vlny na rozhraní	19
Obr. 9.1 Měřicí sestava	22
Obr. 9.2 Princip funkce ultrazvukových sond s piezoelektrickými měniči s různým provedením	24
Obr. 9.3 Typy zobrazení ultrazvukových signálů	25
Obr. 10.1 Měření metodou Phased Array	27
Obr. 10.2 Imerzní ultrazvuková metoda	28
Obr. 11.1 Přední a zadní strana krystalu (Au krystal)	31
Obr. 11.2 Schéma průběhu elektrolýzy	32
Obr. 11.3 Znázornění provedeného experimentu v závislosti na čase t	35
Obr. 12.1 Ovládací klávesy zařízení EPOCH LT	36
Obr. 12.2 Kalibrační měrka	37
Obr. 12.3 Fotografie vybraných vzorků měření	39
Obr. 12.4 Návrh destičky pro defektoskopické měření	41
Obr. 12.5 Fotografie měřeného vzorku	41
Obr. 12.6 Výsledný tvar vady	42

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Název
ρ	[kg/m ³]	Objemová hustota
Q	[C]	Velikost náboje
$d_{j\lambda}$	[m/V]	Piezoelektrický koeficient
T_λ	[Pa]	Složka tenzoru elastického napětí
E_i	V/m	Složka intenzity elektrického pole
f	[Hz]	Frekvence
u	[m]	Okamžitá výchylka (posunutí)
Y	[m]	Amplituda výchylky
ω	[Hz]	Kruhový kmitočet
v	[m/s]	Rychlost šíření vlny
x	[mm]	Souřadnice polohy
φ	[°]	Fázový úhel
T	[s]	Perioda
λ	[m]	Délka vlny
n	[-]	Index lomu prostředí
v_{tr}	[m/s]	Rychlost šíření vlny v AT výbrusu křemene
f_0	[Hz]	Rezonanční frekvence
Δf	[Hz]	Změna frekvence
Δm	[kg]	Změna hmotnosti
A_p	[m ²]	Piezoelektricky aktivní oblast
ρ_q	[kg/m ³]	Hustota křemene
μ_q	[N/m]	Modul pružnosti ve stříhu
Δt	[m]	Změna tloušťky
N	[W]	Akustický výkon
I	[W/m ²]	Intenzita ultrazvuku
S	[m ²]	Plocha
P_a	[Pa]	Akustický tlak
V_a	[m]	Amplituda rychlosti kmitavého pohybu
m	[kg]	Hmotnost vyloučené látky
t	[s]	Čas
F	[C.mol ⁻¹]	Faradayova konstanta
M_m	[g/mol]	Molární hmotnost látky
z	[-]	Počet elektronů potřebný pro vyloučení jedné částice
A	[kg/C ⁻¹]	Elektrochemický ekvivalent
I	[A]	Elektrický proud
p	[Pa]	Tlak

κ	[-]	Poissonova konstanta
γ	[K ⁻¹]	Teplotní součinitel rozpínivosti plynu
K	[Pa]	Adiabatický modul objemové pružnosti
β_{ad}	[Pa ⁻¹]	Adiabatická stlačitelnost
β_{iz}	[Pa ⁻¹]	Izotermická stlačitelnost
Θ	[°C]	Teplota
b	[m.s ⁻¹ . K ⁻¹]	Teplotní součinitel
v_T	[m.s ⁻¹]	Rychlost šíření příčného vlnění
G_s	[Pa]	Modul pružnosti ve smyku
E_p	[Pa]	Modul pružnosti v tahu
v_L	[m.s ⁻¹]	Rychlost šíření podélného vlnění
$\vec{F}$	[N]	Lorentzova síla
$\vec{J}$	[A]	Velikost proudu v materiálu
$\vec{B}$	[T]	Magnetická indukce
c_v	[m.s ⁻¹]	Rychlost šíření vlny v kapalině
c_m	[m.s ⁻¹]	Rychlost šíření vlny v měřeném tělese
d_v	[mm]	Tloušťka imerzní vrstvy
d	[m]	Tloušťka měřeného objektu
F	[C.mol ⁻¹]	Faradayova konstanta