

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VLIV PARAMETRŮ VAZEBNÉHO MÉDIA A STRUKTURY POVRCHU NA KVALITU SNÍMANÉHO SIGNÁLU AKUSTICKÉ EMISE

INFLUENCE OF PARAMETERS OF BOND MEDIA AND SURFACE ROUGHNESS ON THE
QUALITY OF THE ACOUSTIC EMISSION SIGNAL SENSING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAN SCHREIER

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PAVEL MAZAL, CSc.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Schreier

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Konstrukční inženýrství (2301T037)**

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 diplomové práce:

Vliv parametrů vazebného média a struktury povrchu na kvalitu snímaného signálu akustické emise

v anglickém jazyce:

Influence of parameters of bond media and surface roughness on the quality of the acoustic emission signal sensing

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce je analýza experimentálních měření vlivu různých vazebných médií mezi povrchem sledovaného dílce a snímače AE. Sledovány budou základní charakteristiky signálu akustické emise. Úkolem je navrhnout metodiku zjišťování vlivu média a struktury kontaktních povrchů na kvalitu signálu AE vyvolaného Hsju Nielsenovým zdrojem. V případě potřeby budou provedeny nezbytné úpravy měřicího přípravku.

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat:

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Formulaci řešeného problému a jeho analýzu
4. Vymezení cílů práce
5. Návrh metodického přístupu k řešení
6. Analýzu a interpretaci získaných údajů
8. Závěr

Forma diplomové práce: průvodní zpráva

Typ práce: analytická

Účel práce: pro V-V a tvůrčí činnost ÚK

Výstup RIV: publikace

Seznam odborné literatury:

- KOPEC, Bernard. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2008. 610 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- KREIDL, Marcel, ŠMÍD, Radislav. Technická diagnostika : senzory - metody - analýza signálu. 1. vyd. Praha : Technická literatura BEN, 2006. 410 s. ISBN 80-7300-158-6.
- KLYUEV, Vladimir, ZUSMAN, George. Nondestructive Testing and Diagnostics : Handbook. 1st edition. Houston : Metrix Instr.Co., 2004. 656 s.
- MOORE, Patrick O.: NNDT Handbook – Acoustic Emission Testing : 3rd Edition Columbus USA, ASNT, 2005. 440 s. ISBN 1-57117-106-1.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 28.2.2011

L.S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vlivem různých vazebných prostředí a struktury povrchu na vybrané parametry akustické emise (AE). Jsou zde srovnány amplitudy signálu naměřené při použití pěti různých vazebných médií při teplotách 20°C a 80°C. Pro sledování vlivu drsnosti povrchu na parametry AE byl zkonstruován jednoduchý přípravek k měření. Realizací základních experimentálních měření byla ověřena jeho funkčnost.

KLÍČOVÁ SLOVA

diagnostika, analýza, akustická, emise, vazebné prostředí, snímač AE, emisní událost

ABSTRACT

This master's thesis deals with the influence of different AE sensor couplants and surface roughness on the selected acoustic emission parameters. There are compared the amplitude of the signal measured using five different couplants at 20°C and 80°C. To monitor the effect of surface roughness on the AE parameters simple measuring product was constructed. Its functionality has been verified by implementation of basic experimental measurements.

KEYWORDS

diagnostics, analysis, acoustic, emission, couplant, AE sensor, AE event

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SCHREIER, J. *Vliv parametrů vazebného média a struktury povrchu na kvalitu snímaného signálu akustické emise*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 60s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s pomocí vedoucího práce doc. Ing. Pavla Mazala, CSc. a uvedl v seznamu všechny literární a jiné zdroje.

V Brně 20. května 2012

.....
Bc. Jan Schreier

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat doc. Ing. Pavlu Mazalovi, CSc. za vstřícnost, odborné vedení, a v neposlední řadě také za cenné rady a připomínky při tvorbě této práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Františku Vlašicovi, Ph.D. za praktickou pomoc při měření v laboratoři, a také rodině za finanční a morální podporu po celou dobu studia.

OBSAH

ÚVOD	
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
1.1 Teorie akustické emise	14
1.2 Událost akustické emise	15
1.2.1 Nespojitá AE	15
1.2.2 Spojitá AE	16
1.3 Zdroj akustické emise	16
1.3.1 Pen-Test	16
1.3.2 Klepnutí tyče do povrchu materiálu	17
1.4 Detekce akustické emise a měřicí trasa	17
1.4.1 Snímače AE	17
1.4.2 Instalace snímačů	18
1.4.3 Kalibrace snímačů	19
1.4.4 Předzesilovače a kabelová trasa	20
1.5 Vazebné prostředí	20
1.5.1 Tekuté vazebné prostředí	20
1.5.2 Vazebné prostředí na bázi gelu	21
1.5.3 Vazebné prostředí na bázi tuku	21
1.5.4 Suché vazebné prostředí	21
1.5.5 Vazebné prostředí na bázi lepidel	21
1.5.6 Speciální vazebná prostředí	22
1.6 Vyhodnocení akustické emise	24
1.6.1 Hodnocené parametry spojitého signálu AE	24
1.6.2 Popis nespojitého signálu pomocí základních parametrů AE	25
1.6.3 Vícekanálové měření a lokalizace události AE	26
2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA	28
3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE	30
4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ	31
4.1 Vliv vazebného média na snímaný signál AE	31
4.1.1 Používaná vazebná média	31
4.1.2 Průběh měření	32
4.1.3 Osciloskop Cleverscope CS320A	33
4.2 Vliv struktury povrchu na snímaný signál AE	33
4.2.1 Návrh přípravku k měření	33
4.2.2 Konstrukce přípravku k měření	34
4.2.3 Průběh měření	37
4.2.4 Sledované parametry	37
4.2.5 Analyzátor Dakel IPL	38
5 ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH POZNATKŮ	39
5.1 Vliv vazebného média na signál AE	39
5.1.1 Hodnocení citlivosti měření při teplotě 20°C	39
5.1.2 Délka trvání události a doba náběhu při teplotě 20°C	42
5.1.3 Tvar události AE	44
5.1.4 Hodnocení citlivosti měření při teplotě 80°C	45
5.1.5 Délka trvání události a doba náběhu při teplotě 80°C	46

5.1.6 Srovnání citlivosti měření při teplotě 20°C a 80°C	47
5.2 Měření vlivu struktury povrchu na signál AE	49
5.2.1 Vývoj frekvenčního spektra signálu v zadaném čase	50
5.2.2 Časový průběh signálu na daných frekvenčních hladinách	52
6 ZÁVĚR	54
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	55
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	57
8.1 Seznam použitých zkratk	57
8.2 Seznam použitých symbolů a veličin	57
9 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	58
9.1 Seznam obrázků	58
9.2 Seznam grafů	59
10 SEZNAM TABULEK	60

ÚVOD

Pro dnešní vědecko-technickou společnost je charakteristický dynamický růst poznatků v oblasti techniky a jejich bezprostřední využití v praktických aplikacích. Objevují se stále nové, dokonalejší materiály, technologie, konstrukční, obráběcí a výrobní postupy. Současně s tímto trendem vzrůstají i požadavky na jakost. Často již nedochází pouze k výstupní kontrole výrobků, ale je kontrolována jak kvalita výrobních materiálů a proces výroby, tak v poslední době stále častěji dochází ke sledování daných výrobků a zařízení i po dobu jejich životnosti.

K tomu, aby byla u finálních produktů zabezpečena co nejvyšší kvalita, spolehlivost a bezpečnost, jde ruku v ruce s vývojem nových technologií kupředu také obor zvaný technická diagnostika. Jedná se o obor, který se zabývá metodami, prostředky a postupy bezdemontážního a nedestruktivního zjišťování technického stavu objektu, jehož základním úkolem je detekce vady a její následná lokalizace. Rozlišujeme dva druhy diagnostických systémů. První, označované jako ON-LINE systémy, nepřetržitě sledují a vyhodnocují diagnostikovaný objekt za jeho provozu. V určitých případech je dostatečné a ekonomicky příznivější využít tzv. OFF-LINE systém, kdy k měření dochází ve zvolených časových intervalech pomocí přenosného přístroje a vyhodnocení se provádí zpětně po ukončení měření. Přibližně od druhé poloviny 20. století se postupem času rozvinuly a dále se progresivně rozvíjejí nejrůznější metody diagnostikování, jako například rentgenové nebo ultrazvukové prozařování, holografické metody, termografie, vibrační diagnostika, tomografie, magnetická rezonance a v neposlední řadě také metoda akustické emise.

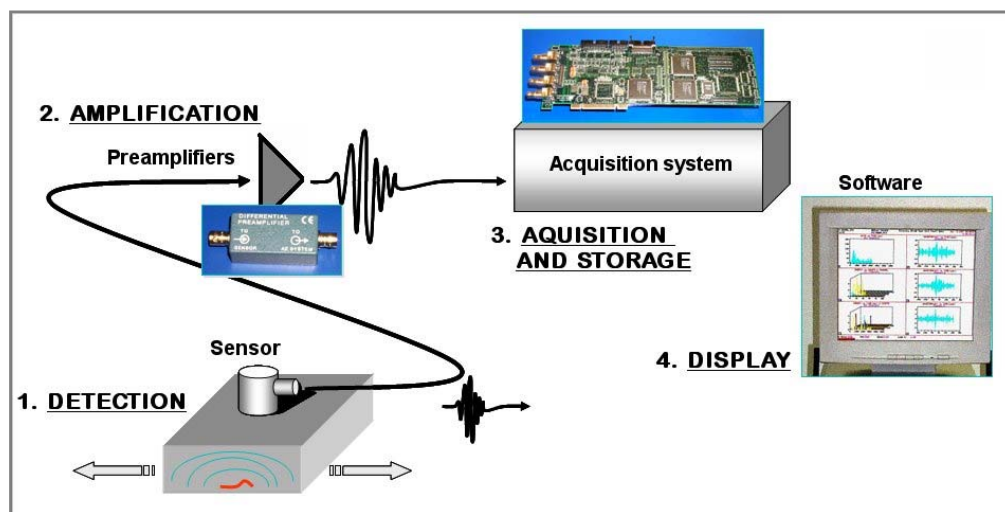
Na rozdíl od většiny metod, dokáže AE detekovat poruchy aktivně se šířící, tedy ty, které mohou způsobit havárii. Je velice citlivá, umožňuje odhalit již ranná stádia poškození, lokalizovat ho, zjistit jeho rozsah a sledovat vývoj. Nejčastěji se využívá v jaderném průmyslu, při sledování opotřebených pohyblivých součástí, při monitorování únavových procesů, ke kontrole tlakových nádob nebo při zjišťování tribologie povrchů.

Abychom měření získali relevantní výsledky, je nutné snímače AE dobře akusticky navázat na povrch testovaného dílce. K tomu slouží různé druhy vazebných prostředí, jejichž výběr závisí na několika faktorech. Těmito faktory mohou být: teplotní stabilita v závislosti na délce měření, zajištění polohy snímačů a možnost jejich výměny, tvar a teplota kontaktního povrchu a další. Tato diplomová práce se ve své první části věnuje analýze experimentálních měření vlivu různých vazebných médií mezi povrchem sledovaného dílce a snímačem AE na kvalitu signálu akustické emise vyvolaného Hsu-Nielsenovým zdrojem. Druhá část práce se věnuje vlivu drsnosti kontaktních povrchů na intenzitu signálu.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1.1 Teorie akustické emise

Akustickou emisí označujeme fyzikální jev, kdy vlivem dynamických změn v materiálu vyvolaných zatěžováním vnějšími či vnitřními silovými účinky dochází k náhlému uvolnění energie nahromaděné v jeho struktuře. Uvolněná energie se dále šíří materiálem v podobě vnitřních a povrchových (Rayleighovy) napěťových vln. Jednotlivé vlny se šíří různou rychlostí a nesou v sobě informaci o dějích probíhajících ve struktuře materiálu. Proces detekce AE, následného elektronického zpracování signálu AE a také vyhodnocení jeho parametrů označujeme jako metodu akustické emise. Princip a přístrojové vybavení metody AE popisuje obr. 1.1. [1]



Obr. 1.1: Princip a přístrojové vybavení metody AE [2]

Počátky vzniku metody akustické emise se datují do padesátých a šedesátých let 20. století, kdy dochází k intenzivnímu studiu jevu akustické emise. Za průkopníka je považován Joseph Kaiser se svou disertační prací popisující projevy akustické emise při tahových zkouškách [3]. V současné době se již nejedná pouze o detekci AE vyvolané plastickou deformací kovů, ale o monitorování celé řady procesů, které iniciují vznik AE šířící se různými materiály.

Na rozdíl od ultrazvukové defektoskopie se jedná o metodu pasivní, tedy takovou, která neovlivňuje měřený objekt, ale pouze sleduje odezvu materiálu, resp. konstrukci na vnější zatížení. Oproti klasickým nedestruktivním metodám (NDT) má akustická emise několik předností. Umožňuje kontinuální měření, detekuje pouze aktivní vady, tedy ty potenciálně nebezpečné a to v celém objemu sledovaného dílce. S využitím sítě snímačů na sledovaném objektu umožňuje lokalizaci emisních zdrojů, přičemž snímače nemusí být v jejich bezprostřední blízkosti. Výhodou a současně i nevýhodou akustické emise je její vysoká citlivost. Na jednu stranu umožňuje zachytit pohyby dislokací v řádech až 10^{-14} m, avšak na stranu druhou, citlivost k vnějšímu rušení způsobuje nutnost nalezení požadované informace obvykle ve značném šumu okolních provozních podmínek. Zřejmě největším problémem je jistá unikátnost metody. Ta ztěžuje a mnohdy až znemožňuje nastavení stejných podmínek měření při opakovaných měřeních s velkou periodou. [1, 4, 5]

Základní aplikační oblasti metody akustické emise ve strojním inženýrství:

- Detekce materiálových vad
- Hodnocení fyzikálních procesů probíhajících v materiálu
- Monitorování únavových a destrukčních procesů
- Monitorování úniků médií pod tlakem
- Monitorování technologických procesů jako: svařování, kvality obrábění, chladnutí odlitků apod.
- Materiálové zkoušky (vyhodnocování procesů porušení, šíření a vzniku únavových trhlin)

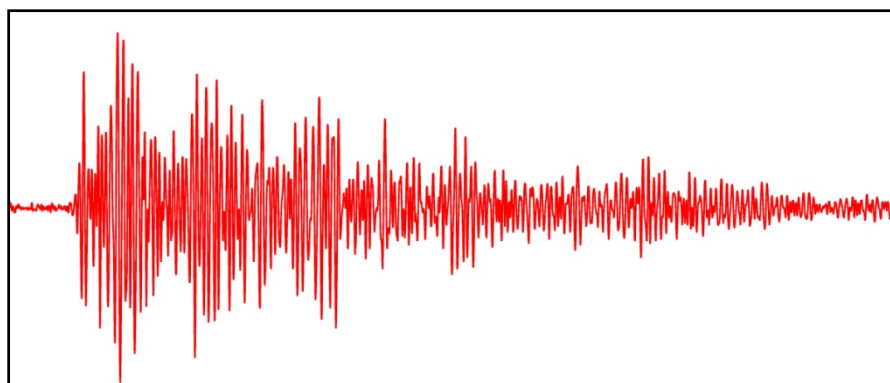
1.2 Událost akustické emise

Dle EN 1330-9 je jako událost akustické emise označován fyzikální jev, který způsobuje vznik akustické emise. Jedná se o dynamický ráz, jakým je například poskok dislokace nebo vznik mikrotrhliny. Na základě četnosti a časových odstupů jednotlivých událostí AE v daném časovém úseku rozlišujeme dva typy akustické emise - nespojitou a spojitou. [6]

1.2

1.2.1 Nespojitá AE

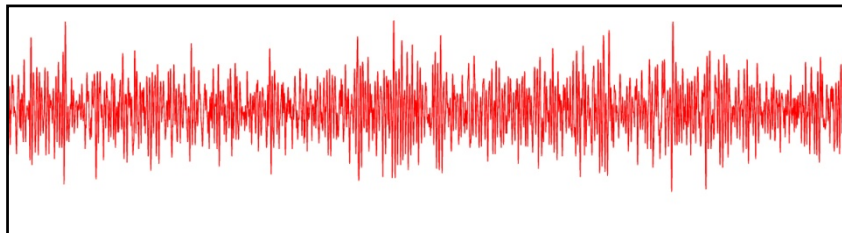
Jestliže jsou jednotlivé události časově jasně rozlišitelné, hovoříme o nespojitě neboli praskavé akustické emisi. Nespojitá AE je způsobena ději probíhajícími velmi rychle (v řádu nanosekund), jejím typickým zdrojem je rozvíjející se trhlina. Pro snímaný signál je charakteristický útlum kmitání, poměrně velká amplituda a široké frekvenční spektrum. Při analýze naměřených dat tyto části signálu (obr. 1.2) ze záznamu vybíráme a vyhodnocujeme je samostatně. Při zpracovávání praskavé AE se vyhodnocuje např.: počet událostí AE za určitý časový interval, počet překmitů přes zvolenou prahovou úroveň, maximální hodnotu signálu, dobu trvání události nebo doba náběhu definovaná jako doba od překročení prahové úrovně do dosažení maximální amplitudy signálu (viz kapitola 1.6.2). [1]

1.2.1

Obr. 1.2: Nespojitá událost AE [7]

1.2.2 Spojitá AE

Spojité signály akustické emise je vyvolán událostmi, které nejsou časově oddělené. Akustické vlny jednotlivých událostí se časově překrývají, sčítají, superpozicují a vzniká tak akustický šum. Tento druh signálu mívá většinou poměrně malou amplitudu a nejčastěji bývá generován únikem média trhlinou v potrubí nebo netěsností tlakové láhve. U spojitěho signálu AE vyhodnocujeme střední, efektivní a maximální hodnotu, standardní odchylku, rozptyl, četnost překmitů přes prahovou úroveň, energii emisních událostí, histogram amplitud a amplitudovou distribuční funkci. [1, 6]



Obr. 1.3: Spojitý signál AE [7]

1.3 Zdroj akustické emise

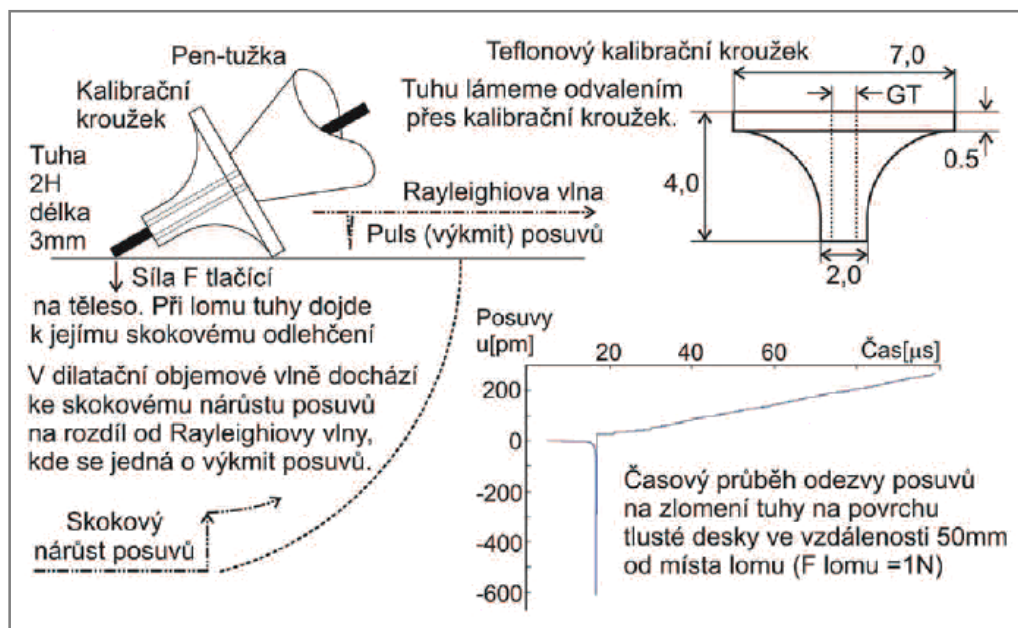
Za zdroj akustické emise je považován původce jedné či více událostí AE. Jinými slovy jde o fyzikální proces, který generuje akustickou emisi. Rozlišujeme zdroje ve třech úrovních: nano-, mikro- a makroskopických. U kovových materiálů se v nano- a mikroskopickém měřítku na vzniku AE nejčastěji podílejí pohyby dislokací, fázové transformace a pochody při vnitřním tření. V polymerních materiálech se ještě přidávají tzv. disklinace, tj. poruchy v rotační symetrii řetězce. Mezi makroskopické zdroje AE pak patří především plastické deformace, vznik a šíření trhlin, vnější tření, makroskopické nestejnomyernosti, uniky médií a jiné mechanismy.

Výše uvedené zdroje akustické emise se objevují převážně v praktických měřeních a jejich původ se nachází uvnitř materiálu. Zdroje působící na povrch tělesa jsou většinou uměle vyvolané. Slouží k vyvolání události AE v laboratorních podmínkách nebo ke kalibraci snímačů. Nejčastěji se používá tzv. Pen-Test, lom kapiláry nebo klepnutí tyče do povrchu materiálu. [6, 8]

1.3.1 Pen-Test

Pen-Test neboli Hsu-Nielsenův zdroj AE (obr. 1.4) je základním, normovaným, běžně používaným zdrojem akustické emise. Reprezentuje náhlé skokové odlehčení síly kolmo tlačící na povrch desky. Velikost této síly se pohybuje v rozmezí cca (0,8 až 1,0) N pro Pen-Test tuhy 2H tloušťky 0,3 mm a (2,0 až 2,5) N pro tuhu 2H tloušťky 0,5 mm. Při odlomení tuhy dochází k uvolnění relativně velkého množství energie ve formě AE, které se jeví jako ostrý puls se všemi frekvencemi zastoupenými rovnoměrně do cca 10 MHz, trvající řádově setiny μ s.

Princip Pen-Testu spočívá ve zlomení tuhy mikrotužky délky 3 mm o povrch testovaného tělesa. Odlomení se děje přes speciální teflonový opěrný kroužek, který slouží k přesně definovanému zlomení tuhy. Tento postup je vhodný ke kalibraci snímačů. [6]



Obr. 1.4: Pen-Test [7]

1.3.2 Klepnutí tyče do povrchu materiálu

1.3.2

Oproti Pen-Testu je tato metoda nevhodná pro kalibraci snímačů, nicméně lze s ní velice rychle a jednoduše budit signál AE. Realizuje se klepnutím delší tyčkou o průměru 5 mm se zakulaceným čelem do kovu. Tím dojde k působení kolmé síly na povrch tělesa. Doba trvání nárůstu síly se pohybuje v jednotkách milisekund, což je o šest řádů více, než je tomu v případě Pen-Testu. Právě délka trvání nárůstu síly způsobí, že rázy jsou velmi tupé a nízkofrekvenční. Hlavní část energie bude soustředěna ve frekvencích do 1 kHz. [6]

1.4 Detekce akustické emise a měřicí trasa

1.4

Měřicí soustava pro detekci akustické emise se skládá z těchto základních členů: snímač AE, předzesilovač, kabely, filtr, zesilovač, zařízení pro zpracování signálu (osciloskop, spektrální analyzátor) a zařízení pro zobrazení, vyhodnocení a ukládání získaných dat, nejčastěji osobní počítač s patřičným softwarovým vybavením.

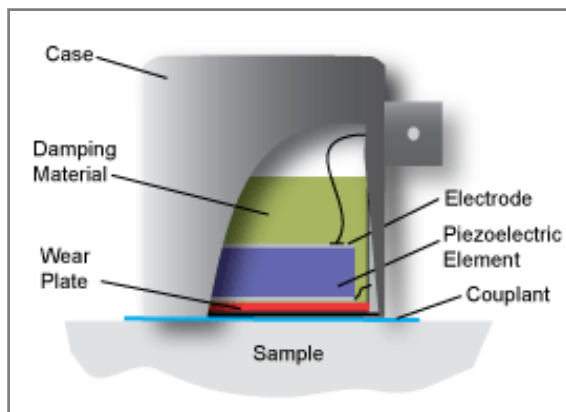
1.4.1 Snímače AE

1.4.1

Snímač akustické emise představuje základní prvek měřicí trasy a s povrchem testovaného tělesa tvoří elektromechanickou soustavu. Funkcí snímače je zachytit na povrchu materiálu elastické napěťové vlnění a převádět ho na nízkonapěťový elektrický signál. Jednotlivé typy snímačů jsou založeny na různých fyzikálních podstatách: piezoelektrický, piezorezistivní, magnetostrikční, elektromagnetický, kapacitní, fotoakustický nebo elektroakustický. Většina snímačů pracuje v rozsahu frekvencí 30 kHz až 1 MHz, avšak obecné charakteristiky a citlivost jednotlivých snímačů se samozřejmě liší. Volba vhodného snímače se odvíjí od několika kritérií jako je cenová dostupnost, frekvenční charakteristika, citlivost, vlastnosti pracovního prostředí (teplota) nebo velikost snímače. [6, 9]

Piezelektrické snímače

Piezelektrické snímače jsou nejčastěji používaným typem snímačů AE. Pracují na principu piezelektrického jevu, kdy při deformaci piezokrystalu vlivem dopadajících vln dochází ke vzniku elektrického napětí. Piezoelement se běžně vyrábí ze speciálních materiálů jako např.: bariem-titanátová, zirkonátová nebo niobátová piezokeramika. [9]



Obr. 1.5: Schéma piezelektrického snímače [10]

Na obr. 1.5 je schematicky zobrazeno typické uspořádání piezelektrického snímače AE. Pro dobré akustické navázání snímače na povrch testovaného tělesa slouží tenká vrstva vazebného prostředí (viz kapitola 1.5). Srdce snímače tvoří aktivní piezokeramický krystal, na který je po obou stranách připojena elektroda. Piezoelektrický element je obklopen tlumícím materiálem (epoxidová pryskyřice s wolframovými částicemi nebo mosaz), ten rozšiřuje šířku pásma snímače, avšak snižuje jeho citlivost. Požadován bývá velký útlum a konstrukce tlumiče je nejproblematictější částí piezelektrických snímačů akustické emise. [9]

Kapacitní snímače

Pro snímání signálů přicházejících z materiálu je možné využít také kapacitní snímače. Základní prvek takového snímače tvoří deskový kondenzátor, jehož dielektrikem je sledovaný materiál. Při generaci trhliny na jejich stěnách vznikají elektrické náboje, které společně s náboji indukovanými na deskách kondenzátoru tvoří elektrické pole. Pohybem náboje v elektrickém poli se vytváří napětí, které je sledovanou veličinou. Citlivost kapacitních snímačů se pohybuje v řádech 10^{-11} m, je tedy nižší než u piezelektrických snímačů a to až o tři řády. Použití v průmyslových podmínkách je poměrně problematické. [9, 11]

1.4.2 Instalace snímačů

Je zřejmé, že způsob instalace snímače má zásadní vliv na kvalitu snímaných dat. Nemalou roli hraje rovinnost a drsnost povrchu zkoušeného tělesa. Povrch čela snímače AE dosahuje drsnosti nepřesahující jednotky μm . Optimálně by měl mít protilehlý povrch podobné parametry, to je ale ve valné většině aplikací nereálné. Přenos výrazně zvyšuje také vazebné prostředí mezi snímačem a povrchem.

Pro dosažení dobrého měření je třeba dodržovat základní pravidla instalace snímačů. Střed čela snímače umísťujeme na vrcholek případné nerovnosti povrchu. Tím zajistíme minimální tloušťku vazebného média pod středem snímače a dobrou akustickou vazbu. Před instalací je nutno čelo snímače a plošku pro měření řádně očistit. Vazebné médium nepoužívat opakovaně. Snímač by měl být umístěn kolmo k povrchu, přitlačen a dále už by se s ním nemělo manipulovat. Síla musí být přiměřená, tak aby nedošlo k vytlačení vazebného média z prostoru pod snímačem. Zároveň musí být dostatečně velká na to, aby se snímač během měření nepohyboval. Doporučuje se přitlačná síla řádově desítky N. [6]

Přímá instalace na povrch

Před instalací snímače AE na povrch testované konstrukce je nutné místo pro přiložení řádně připravit. V místě dotyku je potřeba broušením odstranit nátěr, popř. korozní vrstvy tak, aby byl zajištěn přímý kontakt snímače s materiálem a nedošlo k výraznému snížení citlivosti měření. Na takto připravené stykové plošce je vhodné ještě snížit drsnost zabroušením jemným brusným papírem. [6]

Upevnění snímačů bývá realizováno pomocí různých držáků nebo konstrukčních přípravků. Ty jsou však často vázány na daný typ konstrukce či snímače a postrádají jistou univerzálnost. Pro kontinuální nebo dlouhodobou diagnostiku je výhodné použít speciální lepidlo, které zároveň plní funkci vazebného prostředí. Velice komfortní je použití snímače s permanentním magnetem nebo magnetického upínacího držáku, ovšem problémem zde nastává ve chvíli, kdy potřebujeme aplikovat měření na hliníkové či jiné nemagnetické konstrukce.

Instalace přes vlnovod

V praxi nastávají situace, kdy přímá instalace snímače na povrch není možná, tj. např. jedná-li se o nepřístupné místo na konstrukci nebo dosahuje-li snímaný povrch velmi vysokých teplot (nejčastější důvod k použití vlnovodu). Teplotní odolnost snímačů AE je dána stabilitou použitého piezoelementu, běžně mohou pracovat do teplot cca (150 až 180) °C. Na trhu se vyskytují také vysokoteplotní snímače (pro teploty až 550°C), není-li však konkrétní důvod k jejich využití, je vlnovod méně nákladným řešením při zachování srovnatelné citlivosti (ta je 5-10krát nižší než u klasického snímače). Existují však i případy, kdy lze využitím vlnovodu citlivost detekce zvýšit - typicky ve stavebním inženýrství, a to pevným zaražením vlnovodu do předem připraveného otvoru ve dřevě nebo betonu. [6]



Obr. 1.6: Vlnovod [12]

1.4.3 Kalibrace snímačů

Jak již bylo zmíněno, snímač AE převádí elastické vlnění přicházející z materiálu na elektrický signál. Poměr těchto dvou charakteristik definuje vlastnosti snímače.

Kalibrační snímače tedy rozumíme určení parametrů výstupního elektrického signálu vůči definovanému mechanickému buzení.

Relativní kalibrace porovnává odezvy snímačů v různých časech. Porovnávají se buďto rozdíly citlivosti v podobě amplitudy, nebo v případě komplexního srovnání rozdíly frekvenční odezvy na budící zdroj, nejčastěji Pen-Test. Při relativní kalibraci není potřeba znát velikost a průběh budícího signálu, musí být zajištěna pouze jeho neměnnost. Používá se k porovnání citlivosti jednotlivých snímačů před měřením.

Absolutní kalibrace vyjadřuje poměr odezvy elektrického napětí ve Voltech na buzení v metrech nebo Pascálech (Akustický tlak). Buzení ani odezva nejsou reprezentovány konstantní hodnotou, nýbrž časovým průběhem. Při kalibraci se tedy vychází ze záznamu elektrického signálu jako odezvy na δ puls budící mechanické veličiny. [6]

1.4.4 Předzesilovače a kabelová trasa

Signál přicházející z materiálu do piezoelektrického snímače je velmi slabý. K dalším ztrátám dochází na trase mezi snímačem a analyzátozem signálu, která může čítat až stovky metrů. Proto se v blízkosti snímače, pokud již v něm není integrován, instaluje předzesilovač. Ten napěťový signál zesiluje, filtruje frekvence a impedančně přizpůsobuje přenosovému kabelu. Nejčastěji se používají koaxiální kabely, které vykazují nejmenší ztráty a dobrou odolnost proti elektromagnetickému rušení od ostatních elektrických tras. Přesto je dobré vést kabelové trasy AE odděleně od ostatních kabelových svazků. [5]

1.5 Vazebné prostředí

Chceme-li měřením získat kvalitní výsledky, je nutné snímače AE dobře akusticky navázat na povrch testovaného dílce. Kontakt čela snímače s povrchem je realizován prostřednictvím pouze minimálních plošek na špičkách mikroskopických nerovností povrchu. Většina prostoru pod čelem snímače je vyplněna vzduchem, který má o pět řádů nižší akustickou impedanci oproti přímému styku povrchů a přenos vln AE tak markantně snižuje. Primární funkcí vazebného média je vytlačit vzduch přítomný mezi kontaktními povrchy a zvýšit tak přenos signálu. U kvalitních vazebných médií lze dosáhnout zlepšení až o čtyři řády. Sekundárně může vazebné prostředí sloužit k připevnění snímače na konstrukci (viz vazebné prostředí na bázi lepidel).

Existují různé druhy vazebných prostředí, typicky tekuté, gelové, pasty nebo vazebné prostředí založené na bázi tuku. Obecně platí, že pro detekci podélných vln není rozhodující viskozita daného prostředí. Jedná-li se však o měření na velkých plochých profilech, kde se významně objevuje příčná složka vlnění, zaručuje vyšší viskozita lepší přenos vln. Výběr vhodného vazebného prostředí závisí na několika faktorech. Těmito faktory mohou být teplotní stabilita v závislosti na délce měření, zajištění polohy snímačů a možnost jejich výměny, tvar a teplota kontaktního povrchu, vliv okolního prostředí (vlhkost) a další. [13]

1.5.1 Tekuté vazebné prostředí

Tekuté vazebné prostředí snadno a velice účinně vytlačuje vzduch z prostoru pod snímačem, má však nejnižší akustickou impedanci (tedy vlnění vede nejhůře). Je

vhodné pro hladké povrchy, kde dosahuje přenosu podélných vln srovnatelným s gely nebo prostředím typu lepidel. Tekuté vazebné prostředí má nízkou viskozitu, tendenci odkapávat z kontaktu a časem vysychat. Nejsou tedy vhodné pro svislou montáž a delší měření v řádu hodin, vyžadující stabilitu prostředí. Pokud nemáme magnetické snímače, vyžadují k upevnění montážní přípravek. Používá se např. propylenglykol, který nezpůsobuje korozi a jako většina tekutých prostředí lze z povrchu snadno odstranit. [13]

1.5.2 Vazebné prostředí na bázi gelu

1.5.2

Vazebná prostředí na bázi gelu mají vyšší akustickou impedanci i viskozitu než tekutá prostředí a jsou obecně vhodnější pro povrchy s hrubší strukturou. Platí vztah čím vyšší viskozita, tím vhodnější médium pro hrubší povrchy. Gely jsou snadno použitelné, vhodné pro svislou montáž, poměrně dobře vytlačují vzduchové bubliny z kontaktu a jejich odstranění po skončení měření také není problematické. Podobně jako tekuté prostředí mají tendenci vysychat, zejména kolem okraje snímače, což je omezuje na měření nepřekračující délku několika hodin. Zástupci gelových médií jsou např. Ultrasonic gel a glycerin. [13]

1.5.3 Vazebné prostředí na bázi tuku

1.5.3

Vazebná prostředí na bázi tuku jsou nejpoužívanější pro aplikace spojené s měřením akustické emise. Je tomu tak hlavně díky jejich všestrannosti a stabilitě při celé řadě povrchových podmínek. Mají mnohem vyšší viskozitu než gelová a tekutá prostředí, z toho plyne potřeba větší přitlačné síly k vytlačení vzduchu z kontaktu. V některých případech (hlavně při měření na hrubých površích) je dobré se snímačem po aplikaci média lehce šoupat po povrchu tak, aby došlo k úplnému zaplnění prostoru mezi nerovnostmi. Pokud je snímač dobře navázán, nabízí dobrý přenos příčných vln a dlouhodobou stabilitu, přičemž nedochází k poškození povrchu. [13]

1.5.4 Suché vazebné prostředí

1.5.4

Suché vazebné prostředí, nejčastěji elastomerové prášky, se sice častěji používají při ultrazvukové defektoskopii, nicméně mají své výhody a využití i u metody AE. Svými akustickými vlastnostmi jsou nejbližší tekutým vazebným prostředím, jsou však časově stálější a nezpůsobují korozi. [13]

1.5.5 Vazebné prostředí na bázi lepidel

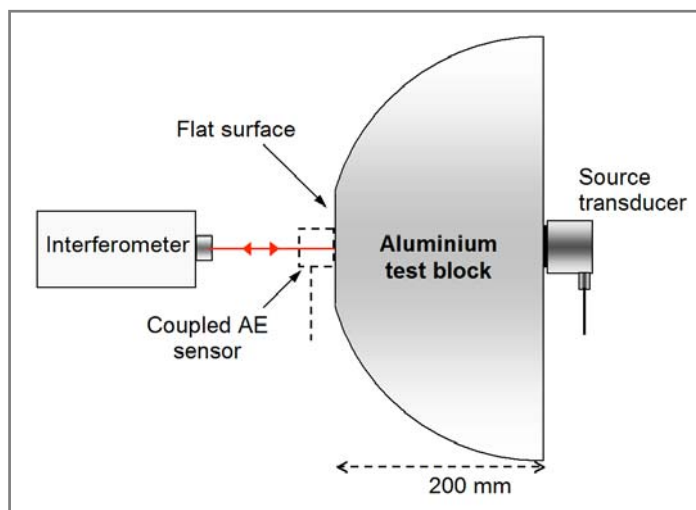
1.5.5

Lepidla se používají v aplikacích, kdy nedochází k výměně snímačů, a kdy je požadována absolutní stabilita snímače. Jedná se nejčastěji o směs silikonové pryže v tekutém stavu, po jejíž aplikaci dochází k postupnému vytvrzení směsi a vytvoření tenké vrstvy vazebného prostředí bez vzduchových bublin. Ta zaručuje dobrý přenos vln srovnatelný s tekutým prostředím a dostatečně pevnou fixaci snímače. Po vytvrzení je potřeba zkontrolovat akustické vlastnosti vazby, jelikož ty se mohou během procesu vytvrzování měnit. U silných lepidel je k odstranění snímače z povrchu potřeba velké smykové síly a hrozí vysoké riziko jeho poškození. Očištění gumových zbytků z čela snímače a povrchu tělesa bývá značně komplikované. [13]

1.5.6 Speciální vazebná prostředí

Většina standardních vazebných prostředí není vhodná pro měření při zvýšených teplotách, kdy dochází ke změnám fyzikálních a akustických vlastností. Pro měření při středních teplotách (kolem 300°C) je na trhu k dispozici široká škála převážně gelových vazebných prostředí. Objevují se také speciální vazebná prostředí pro měření v teplotách přesahujících 500°C. Jsou založena na bázi polotuhé pasty, která při vysoké teplotě zkapalňuje a pro správnou funkci potřebuje teplotu nad 250°C. Při těchto extrémních teplotách dochází k vysychání média, měření je tedy časově omezené. Je třeba dbát také na snímače, poněvadž by mohlo dojít k jejich depólování a trvalé ztrátě citlivosti. [13]

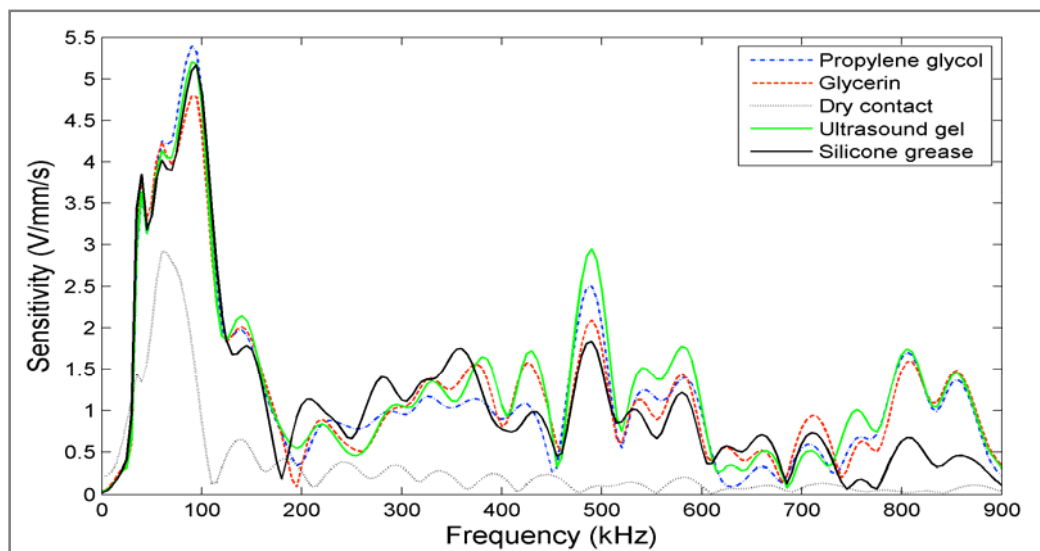
Problematické vazebných prostředí nebyl poměrně dlouhou dobu věnován dostatek pozornosti. V posledních letech však dochází k neustálému vývoji v této oblasti, zejména pak k vývoji ultrazvukových gelů a kyanidových hmot. S tím je samozřejmě spojen i větší zájem z řad vědeckých pracovníků, kdy se jich vazebnými prostředími začíná zabývat stále větší počet. Poznatky ze svého výzkumu publikuje například P. Theobald v článku [14], kde se zabývá srovnáním citlivostní odezvy snímačů AE na příčné a podélné vlnění při použití různých vazebných médií. Experimentální soustava, na níž bylo měření prováděno (obr. 1.7), se skládá z hliníkového polokulového bloku ($D=410$ mm), na kterém je pro umístění snímače AE připravená leštěná plocha o poloměru $R=50$ mm. Do středu této plochy je zaměřen laserový interferometr, který snímá podélné vlny vycházející z povrchu (resp. jejich rychlost). Tyto vlny jsou buzeny zdrojem podélného vlnění s časovou periodou nastavenou na 1 μ s, upevněným kyanoakrylátem na protější straně bloku. Jakmile dojde k ustálení rychlostní historie vln, je na leštěnou plošku postupně upevňován snímač s různými vazebnými médii a probíhá měření. [14, 15]



Obr. 1.7: Experimentální měřicí soustava [14]

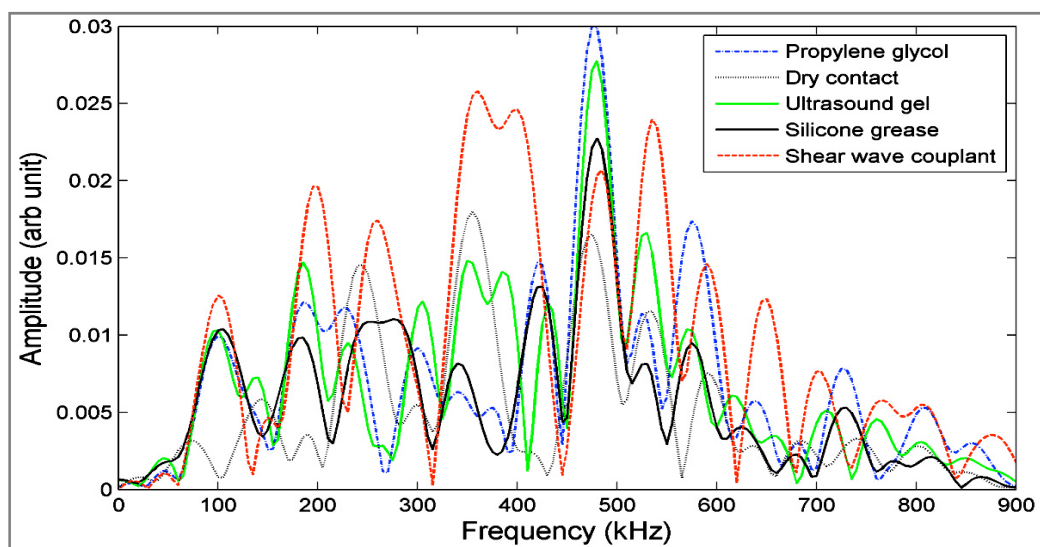
Výsledky Theobaldova měření demonstrují následující obrázky. Na obr. 1.8 jsou zobrazeny citlivostní výsledky snímače PAC S9208 pro podélné vlny. Jednotlivá vazebná prostředí, v tomto případě se jedná o *Glycerin*, *Propylenglycol*, *Ultrasound gel* a *Silicone grease*, jsou porovnávána na základě citlivosti odvozené od podílu

spektra senzoru a signálu interferometru. Můžeme si všimnout, že při hodnotách pod 400 kHz se citlivosti u jednotlivých médií liší jen nepatrně, samozřejmě vyjma suchého kontaktu, kde je citlivost ztelně nižší. V oblasti nad 400 kHz už k určitým odlišnostem mezi médii dochází. Nejvýhodněji se jeví *Ultrasound gel* následovaný *Propylenglykolem* a *glycerínem*, nejhůře dopadá *Silikon grease*.



Obr. 1.8: Citlivost snímače PAC S9280 pro podélné vlnění [14]

Citlivostní výsledky snímače PAC S9208 pro příčné vlny ukazuje obr. 1.9. Tentokrát byly použity opět *Propylenglykol*, *Ultrasound gel* a *Silicone grease*. Navíc byl testován přípravek s názvem *Shear wave couplant*, jež byl speciálně navržen tak, aby dosahoval vysoké citlivosti detekce příčných vln. Jednotlivá vazebná prostředí jsou zde porovnávána pouze na základě amplitud signálu detekovaných snímačem. Z frekvenčního spektra je patrné, že přípravek *Shear wave couplant* dosahuje nejlepších přenosů příčných vln. Zajímavý je však také fakt, že suchý kontakt již není zanedbatelný a ve vyšších frekvencích je dokonce srovnatelný s *Silicone grease*.



Obr. 1.9: Citlivost snímače PAC S9280 pro příčné vlnění [14]

1.6 Vyhodnocení akustické emise

Vyhodnocení signálu akustické emise je realizováno prostřednictvím speciálních měřicích zařízení a softwaru. Existují různé úrovně vyhodnocení signálu AE. Se zvyšující se úrovní a počtem měřicích kanálů roste cena měřicí techniky a jsou kladeny větší požadavky na specifické podmínky pro měření. [6]

Informativní úroveň

V řadě aplikací je dostačující provádět pouze informativní úroveň vyhodnocování, kdy nás zajímá především samotná přítomnost AE, popř. její začátek a konec, aktivita (růst či pokles) a intenzita. [6]

Standardní úroveň

Při této úrovni vyhodnocení se zaměřujeme na základní a obvykle vyhodnocované parametry popisující výsledný elektronický signál AE. Hodnotí se parametry v časové reprezentaci nebo energie RMS signálu. [6]

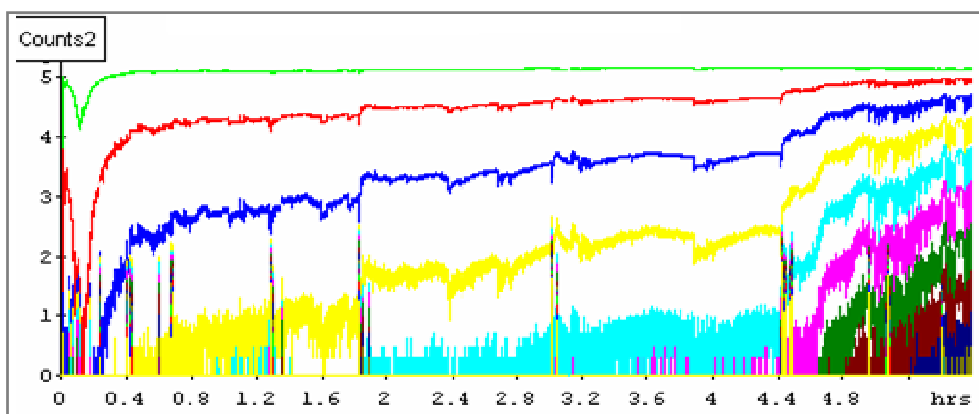
Pokročilá úroveň

Bavíme-li se o pokročilé úrovni vyhodnocení, tzv. *Advanced Signal Processing*, je třeba si uvědomit, že jde o špičkové vyhodnocení frekvenčně širokopásmového, plně digitalizovaného signálu AE. S tím jsou spojeny nároky jak na výpočetní techniku (při analýze probíhají matematicky velmi složité výpočty), tak na vysoce kvalifikované specialisty provádějící měření i vyhodnocování. [6]

1.6.1 Hodnocené parametry spojitého signálu AE

U spojitého signálu akustické emise vyhodnocujeme základní charakteristiky vždy ve zvoleném časovém intervalu. Dle [16] se jedná nejčastěji o:

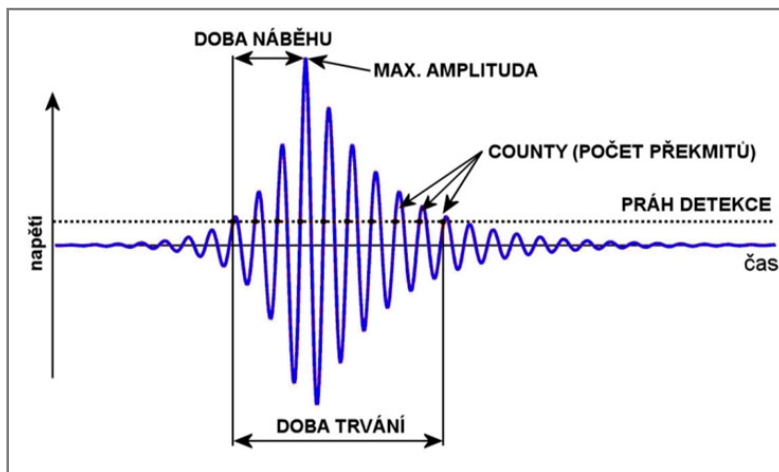
- *RMS (Root Mean Square)* – efektivní hodnota charakterizující energii nebo výkon signálu měřená v mV
- *Počet překmitů nad danou prahovou úroveň (Counts)* – udává počet překmitů přes nastavenou prahovou úroveň za daný časový úsek
- *Frekvenční spektrum signálu* – jedná se o velmi významnou charakteristiku, vypočtenou z plně digitalizovaného časového záznamu signálu spojitě AE



Obr. 1.10: Ukázka vyhodnocení počtu překmitů přes několik prahů [17]

1.6.2 Popis nespojitého signálu pomocí základních parametrů AE

Základní parametry nespojitě události AE (obr. 1.11) jsou odvozeny z časového průběhu signálu akustické emise a slouží převážně k jeho popisu. Pro vyhodnocení se často používají korelace jednotlivých základních parametrů či parametry z nich odvozené. Časový záznam obsahuje obvykle několik kontinuálních i překrývajících se událostí, při analýze vybíráme a vyhodnocujeme jednotlivé události samostatně.



Obr. 1.11: Základní parametry události AE [7]

Parametry používané pro popis emisní události [18]:

- Práh detekce akustické emise (AE detection threshold)- úroveň napětí, která musí být překročena pro detekci nespojitého signálu
- Práh pro vyhodnocení akustické emise (AE evaluation threshold) - nastavená hodnota napětí používaná pro analýzu dat (definuje počátek a konec emisní události)
- Hit - detekce jednoho nespojitého signálu na jednom kanálu AE
- Počet překmitů (Counts) - udává počet kmitů, které překročí nastavenou prahovou hodnotu za dobu trvání hitu
- Délka trvání události (Duration) - doba mezi prvním a posledním překmitem přes prahovou hodnotu
- Amplituda emisní události (Peak amplitude) - je hodnota maximální výchylky emisní události uváděná v mV nebo dB
- Doba náběhu (Rise time) - časový, rozdíl mezi prvním překročením prahu a maximální amplitudou nespojitého signálu
- Čas příchodu (Arrival time) - čas zaznamenaný při prvním překročení prahové hodnoty
- Čas konce hitu - okamžik, kdy se po dobu mrtvého času neobjevil žádný překmit přes prahovou úroveň
- Časový rozdíl - jedná se o časovou diferenci různých snímačů při detekci téže události (využívá se pro lokalizaci zdroje AE)
- Energie události - reprezentuje ji plocha pod obálkou události integrovaná přes čas trvání, měřená v J
- Průměrná frekvence - poměr počtu překmitů k době trvání emisní události
- Mrtvý čas - tento parametr určuje konec události akustické emise

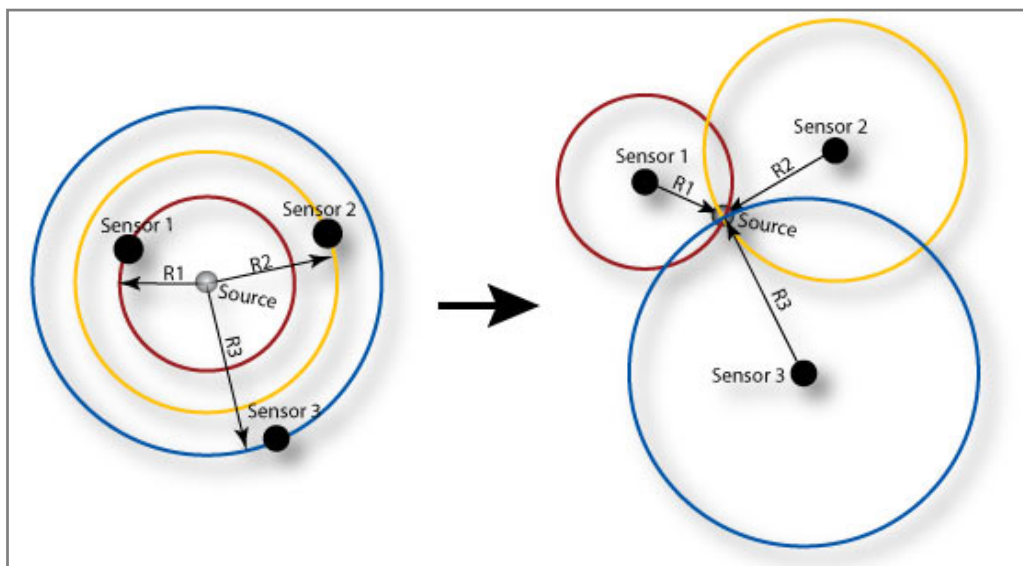
1.6.3 Vícekanálové měření a lokalizace události AE

V praxi se častěji setkáváme s vícekanálovým měřením AE, tedy s takovým, kdy ke sledování jednoho emisního děje používáme současně větší počet snímačů (resp. měřících kanálů), rozmístěných na různých místech testovaného objektu. Dostáváme tak mnohem komplexnější informace o signálu, umožňující lepší vyhodnocení a možnost lokalizovat jeho zdroj. Měřící trasy (snímače, vlnovody, předzesilovače, frekvenční pásma měření) by měly být pokud možno stejné, aby nedošlo k ovlivnění parametrů signálu. [5, 6]

Základem tedy je srovnání signálu stejného původu detekovaného v odlišných místech. To vede k rozdílům v časech příchodů, dobách náběhů a trvání, k rozdílným amplitudám na jednotlivých snímačích a dalším změnám časově frekvenčního průběhu signálu AE. Tyto rozdíly přinášejí informace o lokalitě zdroje. Nejprve je však nutné provést tzv. kompletaci hitů, kdy dochází ke sjednocování hitů do skupin, u nichž existuje předpoklad, že jsou odezvou od stejného zdroje. Při lokalizaci emisní události se vychází z úvahy, že napěťové vlny se šíří tělesem všemi směry konstantní rychlostí. Ve skutečnosti je třeba brát v úvahu rušivé vlivy jako např. odrazy vln. [5, 6]

Bodová lokalizace

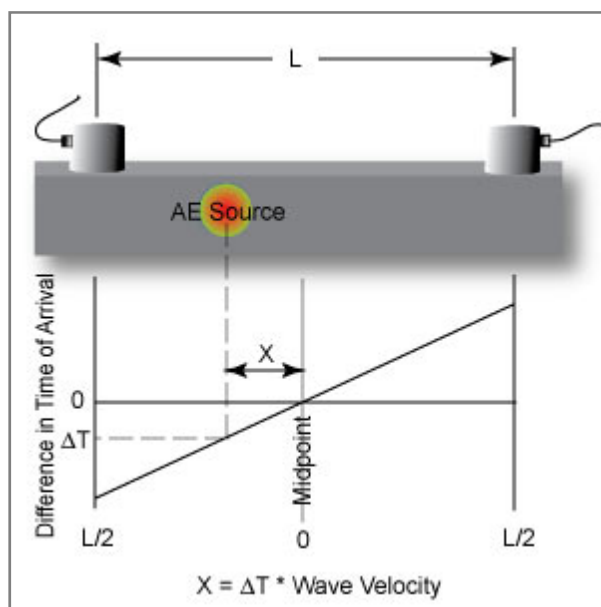
Minimální počet snímačů AE pro bodovou lokalizaci je: dva snímače pro lineární, tři pro plošnou a čtyři pro objemovou lokalizaci. Primárně je potřeba znát rychlost šíření vln v testovaném materiálu. Dále se k vyhodnocování používají časy příchodu (tj. prvního překročení signálu přes prahovou úroveň) nebo časy dosažení maximální amplitudy. Jedná-li se o jednoduchou lineární geometrii, používá se lineární lokalizace. [10]



Obr. 1.12: Princip bodové lokalizace [10]

Lineální lokalizace

Tento typ lokalizace se používá např. pro nosníky, tyče, potrubí nebo příhradové konstrukce. K měření postačí dva snímače AE, je však nutné znát rychlost šíření vln v testovaném materiálu. Pokud detekujeme jedinou událost, určíme lineální polohu zdroje na základě časové prodlevy ΔT , se kterou dorazí vlna ke vzdálenějšímu snímači (viz obr. 1.13). Zaznamenáme-li větší počet událostí, je možné vynést jejich polohu v závislosti na amplitudě hitů do grafu. Pak se v místě, kde dochází ke shlukování bodů, nachází zdroj AE. [6, 10]



Obr. 1.13: Princip lineální lokalizace [10]

Zonální lokalizace

Zonální lokalizace slouží ke sledování konkrétních oblastí v okolí snímače. Zóny mohou být lineární, plošné nebo objemové v závislosti na rozměrech testované konstrukce. Používá se pro anizotropní materiály nebo také v případech, kdy jsou snímače umístěny daleko od sebe a dochází k velkým útlumům. [10]

2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA

Na Ústavu konstruování FSI VUT v Brně patří mezi nejrozvinutější a historicky nejvýznamnější oblasti výzkumu sledování kontaktních vlastností progresivních materiálů a hodnocení stupně jejich poškození, sledování únavových vlastností a životnosti ložisek. Zkoušky kontaktní únavy jsou zde realizovány na dvou základních typech zkušebních zařízení, speciálně vyvinutých a vyrobených na tomto pracovišti. Jsou to stanice Axmat (vzorkem je disk, po jehož povrchu se odvalují kuličky) a stanice R-mat (vzorkem je váleček, po jehož povrchu se odvalují dva kotouče). Pro hodnocení únavových vlastností je k dispozici moderní, počítačem řízený, elektrorezonanční pulzátor RUMUL Cracktronic. V laboratořích Ústavu konstruování se nachází také zkušebna ložisek, jejíž součástí je 20 experimentálních zařízení SA67 pro zkoušky trvanlivosti ložisek (obr. 2.1). [19]



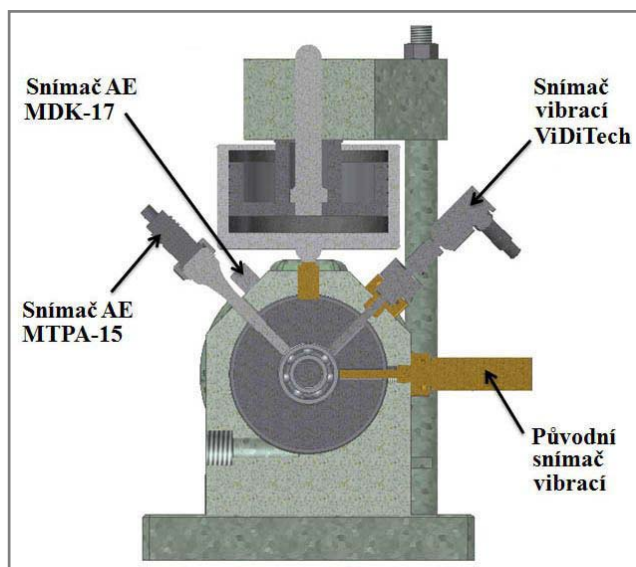
Obr. 2.1: Zkušební stanice SA67 [20]

Pro identifikaci okamžiku vzniku poškození se až donedávna na většině zařízení používala převážně vibrační diagnostika, kdy byly sledovány vibrace celé soustavy. Tento postup je však poměrně nepřesný a umožňuje detekovat až pokročilá stadia poškození. Proto se v současné době primárně využívá metoda akustické emise, s jejíž pomocí se podařilo rozlišit charakteristická stadia procesu poškození materiálu při kontaktním zatěžování a výrazně tak tyto zkoušky zkvalitnit. [19]

K tomu, abychom měření získali kvalitní výsledky, je nutné snímače AE dobře akusticky navázat na povrch testovaného dílce. Fakt, že vazebné prostředí výrazně zlepšuje přenos vlnění z materiálu do snímače, je v odborné společnosti zabývající se touto problematikou všeobecně dobře znám. Nicméně hlubšímu bádání v oblasti problematiky vazebných prostředí nebyla poměrně dlouhou dobu věnována dostatečná pozornost. Až v posledních letech, kdy dochází k vývoji nových vazebných médií, zájem o tuto oblast roste a formulují se jakási doporučení pro výběr vhodného vazebného prostředí. Tato doporučení jsou založena na několika faktorech, kterými mohou být: teplotní stabilita v závislosti na délce měření, zajištění

polohy snímačů a možnost jejich výměny, struktura testovaného povrchu, vliv okolního prostředí (vlhkost) a další. V mé práci jsem se zaměřil na posouzení vlivu různých vazebných médií na citlivost přenosu signálu, a také na to, jak dané prostředí ovlivní základní parametry události akustické emise popisující její tvar, tedy na vyhodnocení délky trvání události a doby náběhu. Měření byla prováděna při normální pokojové teplotě (20°C).

Již zmiňovanou inovací, kdy bylo sledování vibrací doplněno nebo nahrazeno metodou akustické emise, prošla i zkušební stanice SA67 pro testování životnosti ložisek. Tento úkon byl námětem diplomové práce D. Suchánka s názvem Úprava zkušebního zařízení ložisek pro aplikaci metody akustické emise [21]. Výsledné rozmístění snímačů po inovaci znázorňuje obr. 2.2, kdy se jednak zachovaly snímače vibrací a navíc došlo k přidání dvou snímačů AE. Jeden je umístěn na povrchu skříně blízko testovaného ložiska, druhý je připojen pomocí vlnovodu přímo na vnější kroužek testovaného ložiska. V průběhu testů se ložisko zahřívá, teplo se šíří ke snímačům a může tak dojít k zásadnímu ovlivnění měření, zvláště u snímače připojeného přímo na ložisku. Proto se v práci zabývám také popisem chování, citlivosti a stability vazebného prostředí při měření za vyšší teploty (v mém případě 80°C) tak, aby mohlo vzniknout doporučení, jaké vazebné médium je pro tuto danou aplikaci nejvhodnější.



Obr. 2.2: Rozmístění snímačů na stanici SA67 [21]

V průběhu řešení základního cíle diplomové práce přišel od firmy Dakel, se kterou Ústav konstruování dlouhodobě úspěšně spolupracuje, námět na realizaci měření, na jejichž základě by bylo možné provést posouzení vlivu struktury povrchu na snímání signálu AE. Součástí měření má být pístní kroužek, používaný ke snížení zadírávání v lineárních motorech, které slouží k ovládání klapky přivádějících vodu na turbíny přečerpávací vodní elektrárny Dalešice. Jelikož problematika struktury povrchu s problematikou vazebných prostředí spolu úzce souvisí, byl tento úkol zahrnut do diplomové práce.

3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Cílem diplomové práce je analýza experimentálních měření vlivu různých vazebných médií a struktury povrchu na vybrané základní charakteristiky signálu akustické emise. Diplomová práce je rozdělena do dvou částí. První část se zabývá měřením vlivu vazebného prostředí na signál AE, kde bylo hlavním cílem srovnání citlivosti několika vazebných médií. Dílčím cílem bylo posouzení změny tvaru události AE při použití různých vazebných médií. Druhá část práce byla věnována měření vlivu struktury povrchu na signál akustické emise. Zde bylo cílem navrhnout jednoduchý přípravek k měření vlivu struktury povrchu na signál AE a ověřit jeho funkčnost realizací prvotního experimentálního měření. Přípravek musí být přizpůsoben pro měření s pístním kroužkem dodaným firmou Dakel.

4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

4

4.1 Vliv vazebného média na snímaný signál AE

4.1

K hodnocení vlivu vazebného média na snímaný signál akustické emise byla zvolena dvě základní hodnotící kritéria. Prvním z nich je citlivost měření při použití pěti různých vazebných médií, zastoupená hodnotami maximálních amplitud signálu naměřených při použití daných médií. Druhým hodnotícím kritériem je tvar události akustické emise, resp. posouzení změny tvaru události AE při použití různých vazebných médií. K jeho určení byly vybrány dva základní parametry používané k popisu události AE, a sice délka trvání události a doba náběhu.

4.1.1 Používaná vazebná média

4.1.1

Pro měření bylo použito pět různých vazebných médií. Jednalo se o tři profesionálně používané přípravky (Multi Range Coupling Paste ZGT, Ultrasonic Couplant ZG-F, vazelína DUFR02) a dvě média, vybraná na základě doporučení odborníků v oboru měření AE, resp. normy (motorový olej, v mém případě olej M6AD a běžný hydratační krém na ruce). Jednotlivá média se liší svým určením, viskozitou a cenou. Zatímco cena oleje se pohybuje kolem 9Kč/100 ml a cena hydratačního krému okolo 30Kč/100ml, tak cena profesionálních přípravků je o poznání vyšší. V případě přípravku Ultrasonic couplant je to přibližně 350Kč/100g, u přípravku Multi Range Coupling Paste, se cena pohybuje okolo 1200Kč/100g. Podrobnější specifikace vazebných médií se nachází v tab. 4.1.



Obr. 4.1: Testovaná vazebná média

Tab. 4.1 Přehled používaných vazebných médií

	Výrobce	Aplikace	Specifikace
Multi Range Coupling Paste ZGT	GE Inspection Technologies	Pro zvýšené teploty	Profesionální pasta střední viskozity, odolná proti vodě, nescapávající, nekorozivní, teplotní rozsah (-30 až 250)°C
Ultrasonic Couplant ZG-F	GE Inspection Technologies	Univerzální	Profesionální přípravek, tixotropní pasta, omyvatelná, nescapávající, nekorozivní, teplotní rozsah (-20 až 100)°C
vazelína DUFR 02	Ing. František Dušek CSc.	Univerzální	Speciální přípravek používaný na ÚK FSI VUT v Brně, dodán společně s měřicím zařízením Ing. Duškem
olej M6AD	MOGUL	Pro AE nspecifikováno	Jednostupňový motorový olej střední výkonnosti, SAE 40, dle doporučení normy jej lze využít pro měření AE
krém ISOLDA	CORMEN	Pro AE nspecifikováno	Hydratační krém na ruce, dle doporučení odborníků jej lze v krajním případě využít pro měření AE

4.1.2 Průběh měření

Na jednom okraji ocelové zkušební tyče o rozměrech (7x32x1100) mm byl umístěn snímač AE s označením MDK-13 dodávaný firmou Dakel. Dotyková plocha tohoto snímače je obklopena permanentním magnetem, což zásadně usnadňuje manipulaci se snímačem. Odpadá únavné lepení nebo fixování snímače různými držáky. Mezi čelo snímače a povrch zkušební tyče bylo postupně aplikováno pět různých vazebných prostředků, které byly následně porovnávány. Pro srovnání bylo provedeno také měření tzv. na sucho, tedy bez použití vazebného média.

Jako zdroj akustické emise byl používán tzv. Hsu-Nielsenův zdroj neboli Pen-Test. Jedná se o normalizovaný, běžně používaný zdroj AE, který je založený na definovaném odlomení tuhy přes podpěrný teflonový kroužek. Pro každé vazebné médium byla postupně provedena série dvanácti Pen-Testů ve třech vzdálenostech od snímače (5 cm, 10 cm a 100 cm). Počet dvanácti Pen-Testů byl zvolen z důvodu zpřesnění výsledků při statistickém zpracování dat, kdy maximální a minimální naměřené hodnoty byly z výpočtu vyloučeny. Ze zbylých deseti hodnot byl spočítán aritmetický průměr, a pro posouzení přesnosti měření byla spočítána také směrodatná odchylka a variační koeficient. Všechna měření byla realizována nejprve při teplotě 20°C, poté byla zkušební tyč zahřívána horkovzdušnou pistolí a celé měření se opakovalo při teplotě 80°C. V průběhu měření byly jednotlivé události AE ukládány do paměti PC, vyhodnocení bylo realizováno až po skončení měření.

4.1.3 Osciloskop Cleverscope CS320A

Měření bylo realizováno pomocí zařízení Cleverscope CS320A, které se připojuje k hostitelskému PC pomocí rozhraní USB. Jedná se o digitální osciloskop, který poskytuje dva analogové kanály se vzorkováním 100 MS/s (100 milionů vzorků za sekundu) a rozlišením 10-bit. Ve standardním provedení obsahuje paměť pro ukládání měřených vzorků o velikosti 4 MS (4 miliony vzorků), tzn. 2 miliony vzorků pro každý kanál. Snímače s interním předzesilovačem je nutné k osciloskopu připojit přes napájecí výhybku. Společně se zařízením je dodáván stejnojmenný, vysoce flexibilní software s intuitivním ovládáním a širokými možnostmi nastavení měření a zobrazení výsledků měření. Aplikace umožňuje rychlé zjištění základních charakteristik měřených signálů, např. hodnoty RMS, amplitudy, šířky pulzu, periody nebo frekvence. Kromě zobrazování signálů, měřených na analogových vstupech osciloskopu, rovněž umožňuje provést spektrální analýzu, či matematické zpracování měřených signálů. [22]



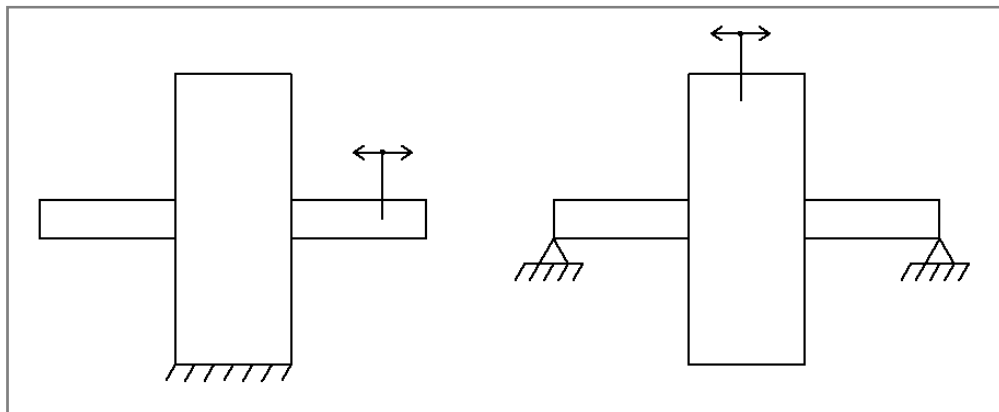
Obr. 4.2: Osciloskop Cleverscope CS320A s napájecí výhybkou

4.2 Vliv struktury povrchu na snímaný signál AE

Jak již bylo zmíněno, podnět ke vzniku tohoto měření přišel z firmy Dakel. Firma dodala pístní kroužek používaný v energetickém průmyslu a vznesla požadavek na realizaci a ověření přípravku pro uskutečnění experimentálního měření, kdy bude tento kroužek v kontaktu s různě opracovanými plochami. Účelem měření je možnost zkoumání, popisu a posouzení vlivu struktury povrchu na snímaný signál akustické emise.

4.2.1 Návrh přípravku k měření

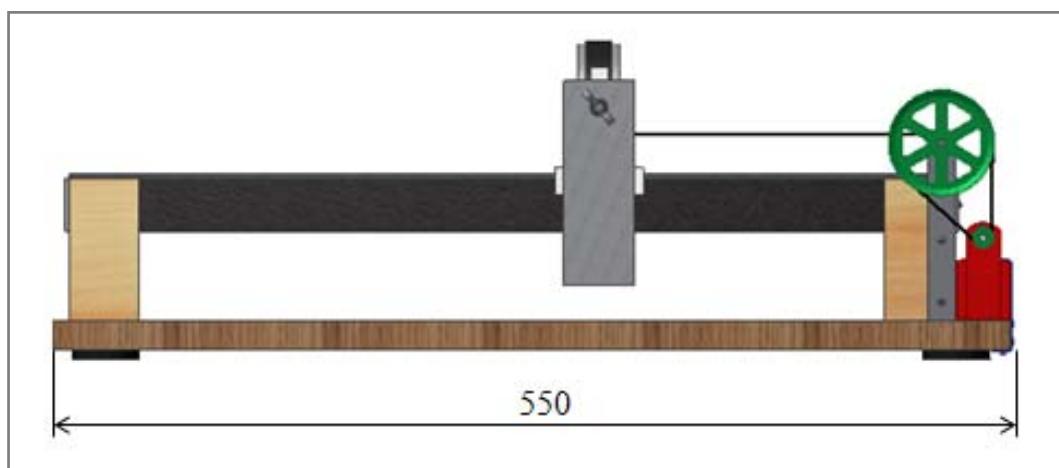
Ke splnění zadaného úkolu bylo potřeba navrhnout speciální přípravek, na kterém bude měření realizováno. Na začátku procesu konstruování vznikly dvě ideové varianty řešení. První je založena na principu, kdy je pístní kroužek pevně upnut ve statickém stojanu a zkušební tyč je tažena po jeho povrchu. Druhá varianta počítá opačným řešením, tedy takovým, kdy je zkušební tyč uložena staticky a pístní kroužek je tažen po jejím povrchu (viz obr. 4.3). Nakonec byla vybrána a dále rozvíjena varianta, která počítá s pohyblivým pístním kroužkem. Bylo tak učiněno z důvodu nižšího zanášení ruchu od pohybu do snímaného signálu.



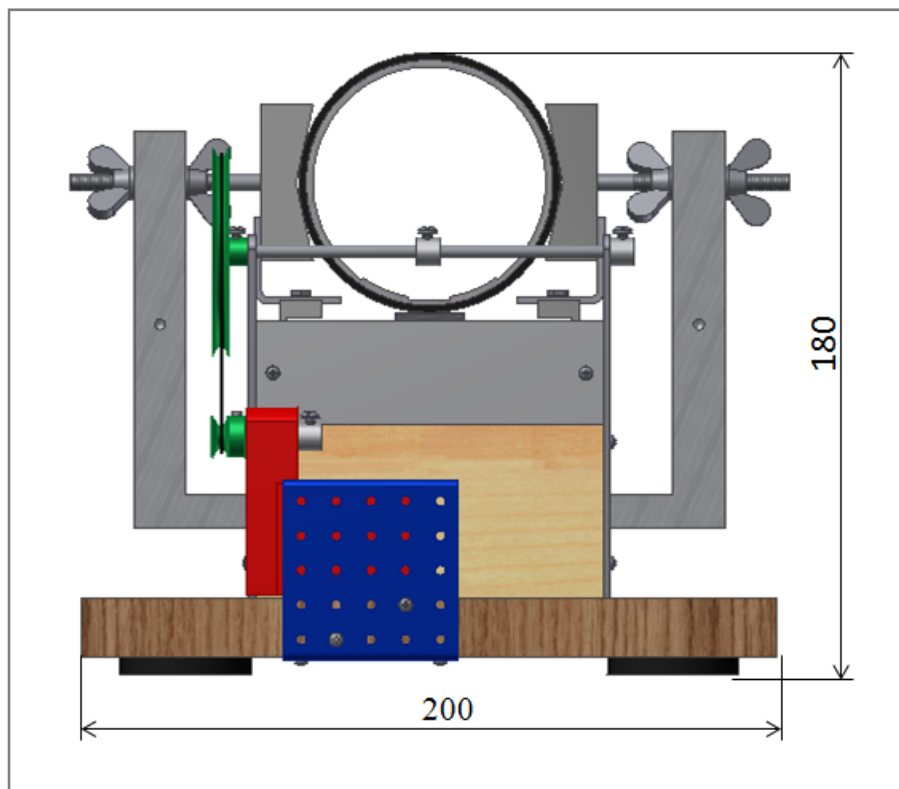
Obr. 4.3: Schematické znázornění variant řešení

4.2.2 Konstrukce přípravku k měření

Přípravek k měření vlivu struktury povrchu na signál akustické emise byl konstruován pro pístní kroužek o vnějším průměru 75 mm. Pro větší variabilitu měření a možnost porovnání rozměrově blízkých kroužků umožňuje přípravek použití pístního kroužku, jehož vnější průměr se liší až o ± 10 mm. Přípravek, jehož základní rozměry jsou (550x200x180) mm, se skládá ze tří základních konstrukčních uzlů. Prvním uzlem je upínací mechanismus, který slouží k uchycení pístního kroužku a k zajištění jeho polohy vůči zkušební tyči. Skládá se z misky, prstence, zobáčku a jezdcce. Druhý konstrukční uzel tvoří motorek s řemenovým pohonem, který slouží k řízení rychlosti posuvu upínacího mechanismu. Motorek a řemeničky byly použity ze stavebnice MERKUR, jako řemen slouží O-kroužek s rozměrem (75x3) mm. Větší řemenové kolo je nasazeno na osičku. V jejím středu, přesně v ose zkušební tyče, se nachází objímka zajištěna šroubkem M3. Za tento šroubek se volně zahákne střed silonového vlasce, připojeného svými konci k upínacímu mechanismu. Tím je zajištěno samovolné vystředění vlasce, který se při pohybu navíjí na osičku a táhne kroužek po zkušební dráze. Za třetí konstrukční uzel považují lóže pro zkušební tyč, uložené v podpěrách pevně přišroubovaných k základové desce. Tento uzel umožňuje vyzvednutím zkušební tyče do výšky 82,5 mm nad základovou desku realizaci řemenového pohonu, a také samotný pohyb kroužku upnutého v upínacím mechanismu po zkušební tyči.



Obr. 4.4: Přípravek k měření - pohled zepředu



Obr. 4.5: Přípravek k měření – pohled zprava

Přípravek k měření vlivu struktury povrchu na snímaný signál AE se skládá z těchto hlavních částí (obr. 4.6):

Základová deska

Základová deska o rozměrech (18x200x550) mm je vyrobena ze dřeva. Zajišťuje konzistentnost a celkovou stabilitu přípravku. Na základovou desku jsou pomocí vrtů uchyceny podpěry nesoucí lóže a také motorek, který pomocí jednoduchého řemenového převodu pohání kroužek společně s celým upínacím mechanismem.

Podpěry

Dvě podpěry vyrobené z dřevěného bloku o rozměrech (40x80x100) mm, nesou lóže ve výšce dostatečné na to, aby mohl být realizován potřebný řemenový pohon.

Lóže

Lóže je vyrobeno z kartitu neboli pertinaxu. V jeho podélné ose je vyfrézovaná drážka, ve které je staticky uložena zkušební tyč. Lóže slouží také jako vedení, po kterém se pohybují jezdcí a zajišťují tak přímočarý pohyb upínacího mechanismu s pístním kroužkem.

Zkušební tyč

Zkušební tyč je vyrobena z ocelového čtyřhranu (20x20x500) mm, jehož jednotlivé strany jsou různě opracovány a dosahují drsností Ra0,8; Ra3,2 a Ra6,3. To umožňuje velice snadnou a rychlou změnu měření na povrchu s jinou strukturou pouhým otočením zkušební tyče.

Jezdec

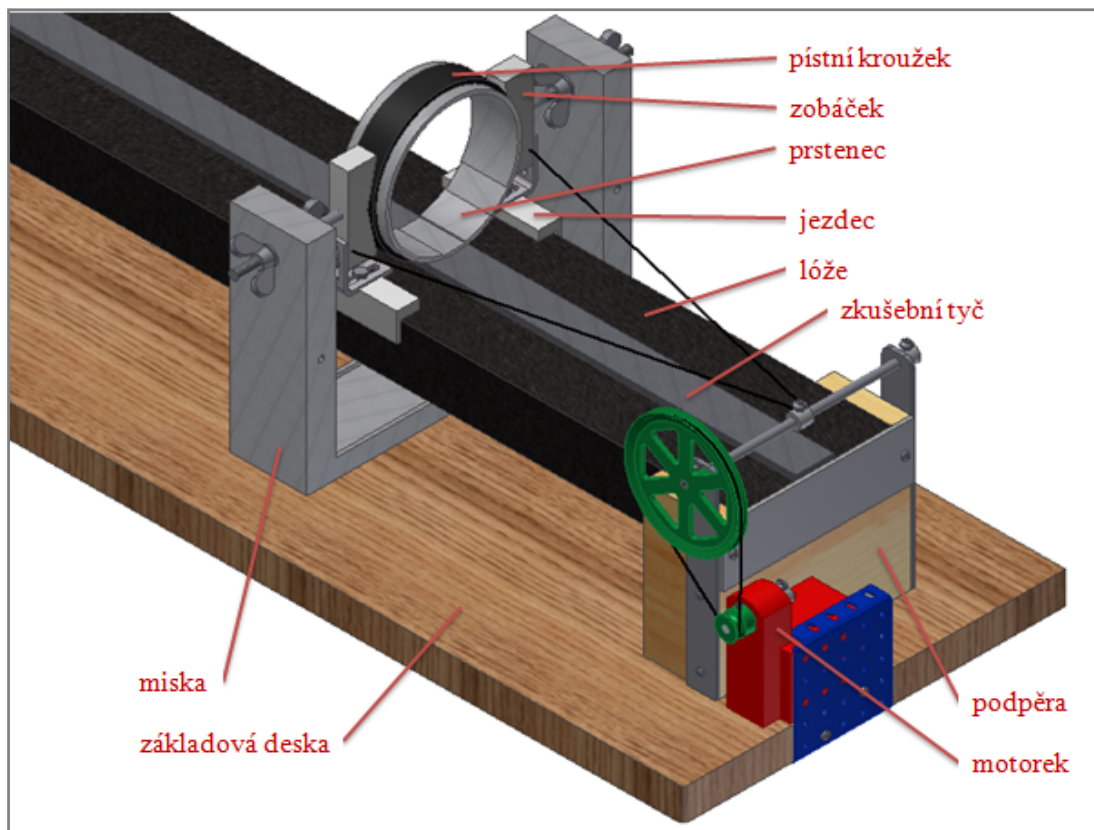
Jezdec má tvar písmene L, zabraňuje tak natáčení kroužku či jeho vybočení z přímého směru pohybu, případně naklánění kroužku vpřed a vzad. Je vyrobený ze silikonu, aby nedocházelo k velkému ovlivnění měření vnášením šumu do snímaného signálu.

Prstenec

Hliníkový prstenec tvoří jakousi oporu pístnímu kroužku, jenž je na něm nasazen. Vnější strana prstence je opatřena osazením o velikosti 0,5 mm, které zabraňuje posunutí pístního kroužku způsobené jeho pohybem po zkušební tyči. Kroužek je ve své poloze držen upínacími zobáčky. Ty jsou zhotoveny ze silonu, aby došlo k minimalizaci zanášení šumu do signálu. Na vnitřní straně kroužku jsou zhotoveny tři plošky pro umístění snímačů AE.

Miska

Miska tvoří kostru upínacího mechanismu pístního kroužku. Skládá se ze tří částí, a to ze spodní vany, ke které jsou přišroubovány dvě bočnice. V každé z bočnic je vyvrtán otvor pro tyč o průměru 5 mm, na jejímž konci je našroubován upínací zobáček. Jejich poloha je zajištěna pomocí dvou křídlových matic umístěných proti sobě po obou stranách bočnice. Spodní vana poskytuje prostor pro umístění přídavného závaží, tedy pro zvětšení zátěžné síly.

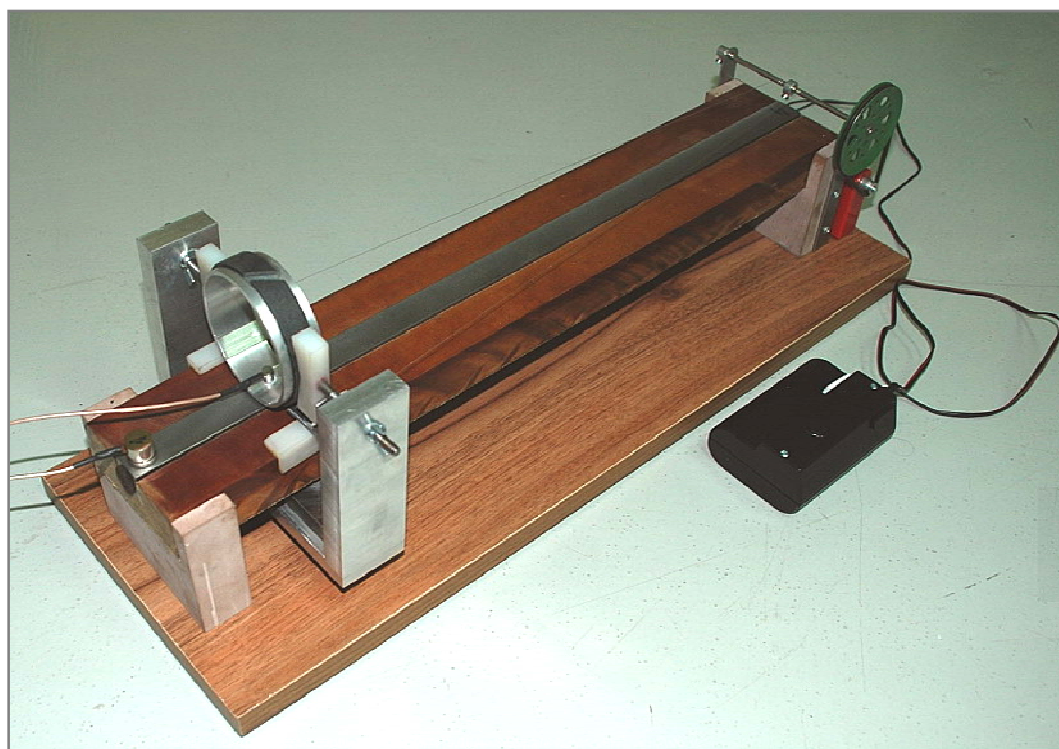


Obr. 4.6: Přípravek k měření – popis hlavních částí

4.2.3 Průběh měření

Experimentální měření bylo dvoukanálové, což znamená kontinuální sběr dat prostřednictvím dvou snímačů současně. První snímač (typ MIDI) byl umístěn na ploše speciálně připravené k tomuto účelu přímo na prstenci. Jako vazebný prostředek bylo použito akrylátové vteřinové lepidlo. Druhý snímač (typ MDK-13 s permanentním magnetem) byl umístěn na okraji zkušební tyče, akustická vazba byla realizována prostřednictvím vazelíny DUFRO2. Rozmístění snímačů demonstruje obr. 4.7. Vazebné médium, tentokrát Ultrasonic couplant, bylo pro zlepšení přenosu signálu aplikováno také mezi pístitní kroužek a prsteneček.

Délka zkušební dráhy, po které se kroužek pohybuje, je 400 mm. Upínací mechanismus, společně s kroužkem, se pohybuje rychlostí $0,02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. To znamená délku měření 20 s. V případě potřeby je možné rychlost pohybu, a tím i délku měření, snadno korigovat změnou konfigurace řemenového pohonu. K eliminaci náhodných dějů ovlivňujících snímání signál AE, byla pro každou testovanou plochu provedena série pěti měření. Pro jednotlivá měření byla v závislosti na snímači a testované ploše nastavována hodnota zesílení signálu v rozmezí (0-50) dB. V ověřovací sérii měření byl použit tzv. suchý kontakt, tedy měření bez vazebného média mezi kroužkem a zkušební tyčí.



Obr. 4.7: Vyrobený přípravek k měření - rozmístění snímačů

4.2.4 Sledované parametry

Jelikož je sběr dat kontinuální a vyhodnocení probíhá až po skončení měření, je možné z naměřených dat provést libovolnou analýzu, jež umožňuje software Dakel UI. V mém případě jsem k základní demonstraci vlivu struktury povrchu na signál AE zvolil vykreslení časového průběhu signálu na daných frekvenčních hladinách a graf vývoje frekvenčního spektra signálu v zadaných časech.

4.2.5 Analyzátor Dakel IPL

K záznamu měřených dat byl použit nově vyvinutý systém Dakel IPL, umožňující 12-bitové synchronní kontinuální měření až ze 4 kanálů vzorkovací frekvencí 2 MS/s (2 miliony vzorků za sekundu) a nepřetržité ukládání dat do paměti PC. Délka měření je v podstatě omezena pouze kapacitou diskového prostoru (hodinové měření představuje zhruba 56 GB dat). Komunikace a přenos dat je realizován přes USB rozhraní. Zpracování získaných dat se provádí po ukončení měření pomocí programu Dakel UI, který pracuje pod operačním systémem Linux. Program umožňuje on-line sledování obálky maximálních amplitud všech kanálů s nastavitelnou úrovní časové komprese. Dále poskytuje tyto možnosti zpracování dat: výpis jednotlivých emisních událostí dle požadovaných detekčních prahů, vykreslení průběhu parametru Count (až pro 256 prahů), výpočet grafického znázornění vývoje frekvenčních spekter pro jednotlivé kanály s průběhem signálu pomocné veličiny, graf vývoje frekvenčního spektra v zadaných časech, vývoj energie signálu na vybraných frekvencích v čase, v neposlední řadě také export naměřených dat do programu Matlab, či DaeShow, používaném pro lokalizaci emisních událostí a další zpracování signálu. [23]



Obr. 4.8: Analyzátor Dakel IPL

5 ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH POZNATKŮ**5****5.1 Vliv vazebného média na signál AE**

5.1

Jako primárně hodnocený parametr byla vybrána amplituda signálu reprezentující citlivost měření, sekundárně byla hodnocena délka trvání události. Jako doplňkový parametr byla zvolena doba náběhu.

5.1.1 Hodnocení citlivosti měření při teplotě 20°C

5.1.1

Následující tři tabulky (tab. 5.1, tab. 5.2 a tab. 5.3) demonstrují postup měření a statistického zpracování naměřených dat. Jsou v nich zaznamenány amplitudy dosažené při všech jednotlivých Pen-Testech. Přeskrtnutá čísla jsou maximální a minimální hodnoty dosažené pro každé médium, které do výpočtu průměrné hodnoty amplitudy nebyly zahrnuty. Jde o snahu eliminovat náhodné jevy vstupující do měření a zpřesnit statistické zpracování dat.

Dále se kromě průměrných hodnot amplitudy signálu v tabulce nachází také hodnoty směrodatných odchylek a variačních koeficientů, vyjadřujících přesnost měření pro daná vazebná média. Variační koeficient ve valné většině případů nepřesahuje hodnotu 10%, což u měření akustické emise, kde je poměrně obtížné zajistit stejné podmínky pro opakovaná měření, lze považovat za měření s vysokou spolehlivostí.

Tab. 5.1 Amplituda události AE ve vzdálenosti 5 cm

Hodnoty v mV

č. měření	sucho	krém ISOLDA	vazelína DUFR02	MRC Paste	Ultrasonic couplant	olej M6AD
1	517	1790	2160	1820	2640	1460
2	608	1860	2240	1850	2500	1730
3	762	1630	2440	1560	2180	1640
4	634	1860	2000	1760	2290	2210
5	665	1940	2220	1440	2250	1820
6	762	2040	2590	1970	2120	2060
7	625	2000	2580	2130	2360	2820
8	754	2070	2750	1960	2120	2130
9	665	2080	2800	1690	2370	2400
10	674	2040	2520	2050	2460	1960
11	645	2040	2690	1620	2680	2250
12	771	1910	3230	1780	2840	2180
průměr	679	1955	2499	1806	2385	2038
směrodatná odchylka	56	92	216	177	176	233
variační koeficient	8,2%	4,7%	8,7%	9,8%	7,4%	11,4%

Tab. 5.2 Amplituda události AE ve vzdálenosti 10 cm

Hodnoty v mV

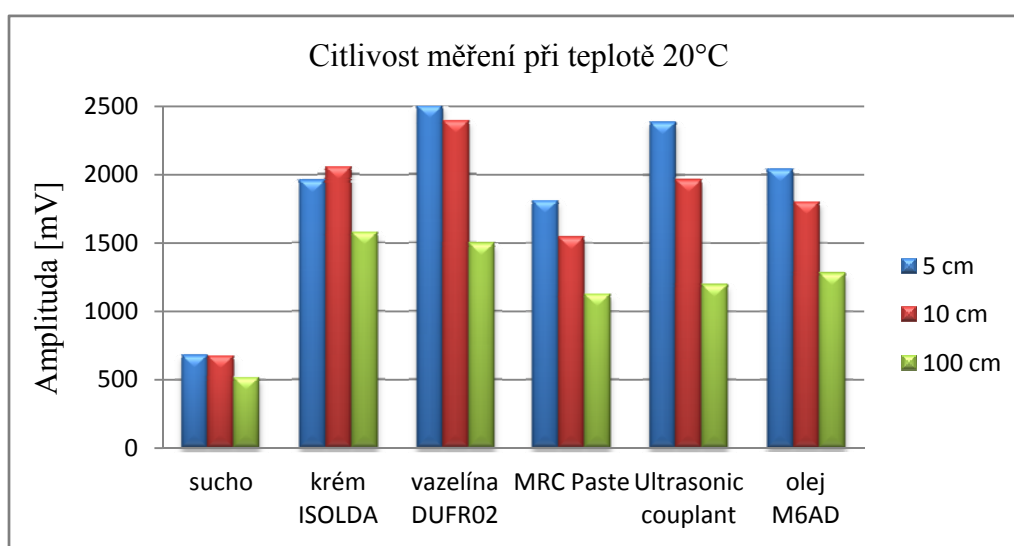
č. měření	sucho	krém ISOLDA	vazelína DUFR02	MRC Paste	Ultrasonic couplant	olej M6AD
1	585	2150	2450	1610	2380	1850
2	505	1960	2330	1560	1620	1420
3	639	1940	2360	1480	2500	1720
4	677	2150	2390	1450	1930	1480
5	659	2440	2880	1500	1860	1660
6	665	1920	2250	1840	1830	1820
7	748	2240	2570	1550	1890	1960
8	665	1900	2100	1460	2100	1800
9	745	1970	2520	1590	1940	2470
10	725	2060	2330	1480	1589	1950
11	697	1910	2210	1650	2060	1640
12	688	2210	2480	1530	2000	2090
průměr	675	2051	2389	1541	1961	1797
směrodatná odchylka	42	120	110	59	189	182
variační koeficient	6,3%	5,9%	4,6%	3,9%	9,6%	10,1%

Tab. 5.3 Amplituda události AE ve vzdálenosti 100 cm

Hodnoty v mV

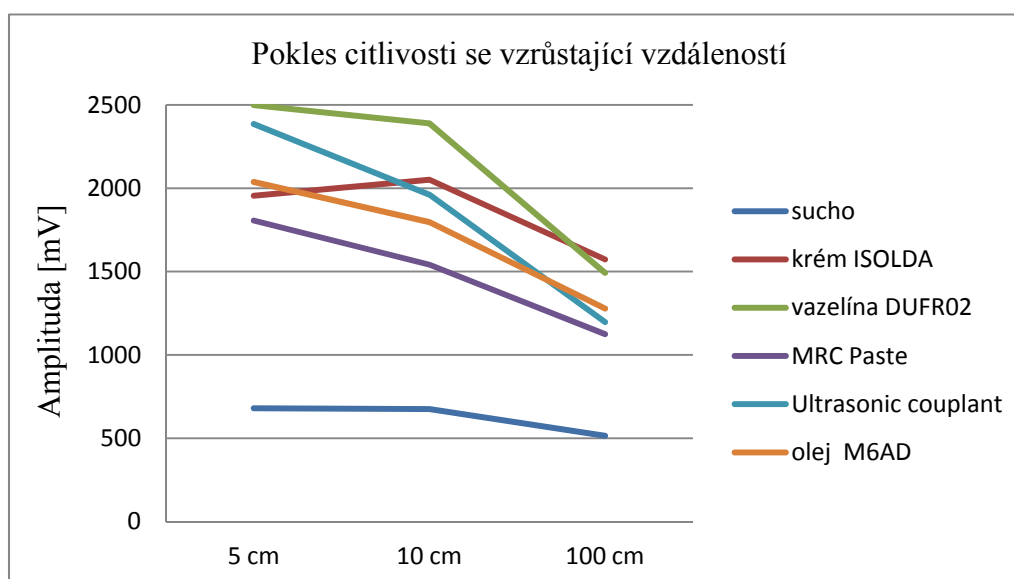
č. měření	sucho	krém ISOLDA	vazelína DUFR02	MRC Paste	Ultrasonic couplant	olej M6AD
1	599	1440	1290	1150	1260	1230
2	422	1730	1510	1320	1040	1270
3	542	1620	1560	1110	1150	1210
4	548	1480	1300	1030	1160	1410
5	614	1560	1510	1160	1120	1460
6	519	1550	1880	1040	1270	1280
7	477	1400	1330	1050	1310	1260
8	522	1750	1300	1040	1090	1380
9	414	1640	1350	1150	1060	1220
10	451	1500	1770	1260	1240	1250
11	548	1770	1520	1160	1300	1120
12	519	1460	1770	1120	1350	1270
průměr	515	1573	1492	1124	1196	1278
směrodatná odchylka	49	104	168	79	86	63
variační koeficient	9,6%	6,6%	11,2%	7,0%	7,2%	4,9%

V grafu 5.1 jsou zachyceny souhrnné výsledky zprůměrovaných amplitud naměřených při použití různých vazebných médií ve vzdálenostech (5, 10 a 100) cm. Mezi jednotlivými médii byly zaznamenány poměrně velké rozdíly v citlivosti měření. Z výsledků je na první pohled patrné, že při použití vazebného prostředí dochází k výraznému zvýšení citlivosti měření. Nárůst citlivosti pro vazelínu DUFR02, která vykazuje nejlepší výsledky, oproti suchému kontaktu činil dokonce až 350%. Vazelínu následují Ultrasonic couplant a olej M6AD. Překvapivě velmi dobrých výsledků dosahoval také hydratační krém ISOLDA. Naopak poměrně za očekávání zůstal profesionální přípravek MRC Paste, u kterého bych i přes určení pro vyšší teploty předpokládal dosažení lepší citlivosti.



Graf 5.1: Srovnání citlivosti měření při teplotě 20°C

Graf 5.2 demonstruje pokles citlivosti měření se zvyšující se vzdáleností.



Graf 5.2: Pokles citlivosti měření se vzrůstající vzdáleností (20°C)

5.1.2 Délka trvání události a doba náběhu při teplotě 20°C

Na rozdíl od hodnot amplitudy signálu, které software Cleverscope zobrazuje společně s některými dalšími parametry automaticky, je nutné hodnoty délky trvání události a doby náběhu odečíst z okna pro trasování signálu. K tomu je potřeba vhodně zvolit prahovou úroveň napětí. V mém případě jsem pro každé médium volil práh na úrovni 15% z dosažené průměrné amplitudy signálu.

V následujících tabulkách již nenalezneme detailní záznam hodnot ze všech měření, nýbrž pouze průměrné hodnoty daných parametrů. Nechybí směrodatné odchylky a variační koeficienty.

Délka trvání události při teplotě 20°C

Tento parametr zásadně ovlivňuje volba prahové úrovně, dle které je vyhodnocován. Ze získaných výsledků lze obecně říci, že délka trvání události se s rostoucí vzdáleností zdroje akustické emise od snímače prodlužuje. Je to způsobeno odrazy, skládáním a sčítáním vlnění, což se projevuje ve snímaném signálu. Pro mnou zvolenou konfiguraci a prahovou úroveň se délka trvání události se pohybuje v řádech jednotek milisekund s odchylkou měření okolo 15%.

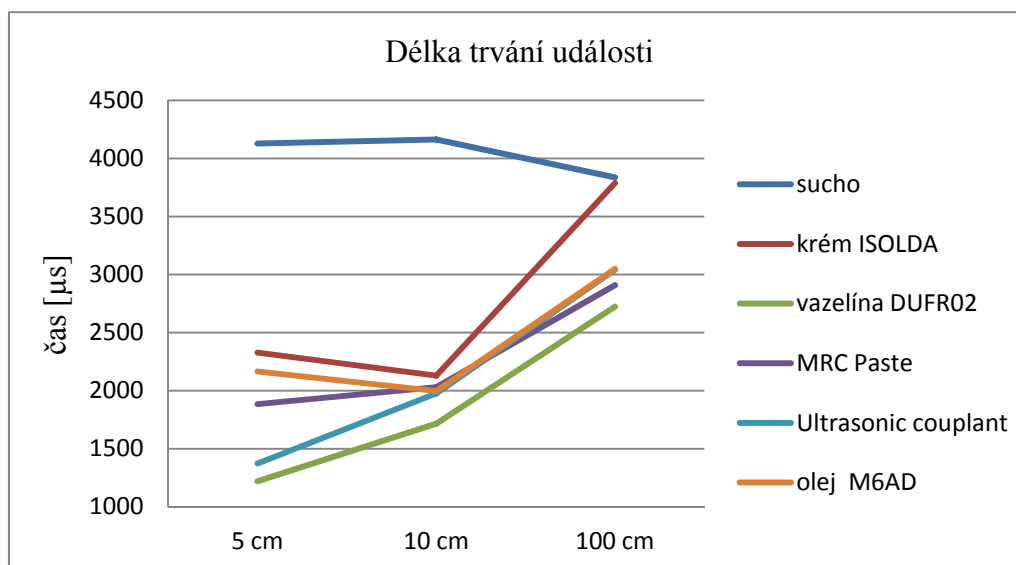
Tab. 5.4 Délka trvání události AE při teplotě 20°C

Hodnoty v μs

		sucho	krém ISOLDA	vazelína DUFR02	MRC Paste	Ultrasonic couplant	olej M6AD
5 cm	délka trvání	4128	2327	1220	1885	1372	2166
	směrodatná odchylka	371	388	313	324	160	127
	variační koeficient	9%	17%	26%	17%	12%	6%
10 cm	délka trvání	4163	2129	1715	2030	1976	1997
	směrodatná odchylka	177	148	195	125	275	128
	variační koeficient	4%	7%	11%	6%	14%	6%
100cm	délka trvání	3837	3788	2724	2909	3043	3049
	směrodatná odchylka	344	578	417	269	503	440
	variační koeficient	9%	15%	15%	9%	17%	14%

Graf 5.3 znázorňuje změnu délky trvání události s rostoucí vzdáleností zdroje AE od snímače. Délka trvání události se s rostoucí vzdáleností u většiny médií prodlužuje. Je to zapříčiněno (mimo výše zmíněné) zvoleným způsobem vyhodnocování tohoto parametru, kdy je hodnota prahu přímo závislá na amplitudě signálu. Platí tedy vztah, kdy nízká amplituda znamená nízkou hodnotu prahu, čímž se prodlužuje délka trvání události. Proto se měření nasucho tak výrazně odlišuje od ostatních prostředí

a dosahuje nejdelší doby trvání události. U všech ostatních přípravků, hlavně těch profesionálních, byl zaznamenán velmi podobný vývoj nárůstu délky trvání události.



Graf 5.3: Délka trvání události (20°C)

Doba náběhu při teplotě 20°C

Přesnost měření u doby náběhu se dá posuzovat jen velmi těžko. Je třeba si uvědomit, že u tohoto parametru se jedná nejčastěji o desítky mikrosekund, což je velmi krátký časový okamžik, a již sebemenší odchylka měření se v něm rapidně promítne. Může nastat také případ, kdy je rozdíl tak malý, že jej přístroj nezaznamená. Pak naměříme vždy stejné hodnoty a variační koeficient je roven nule.

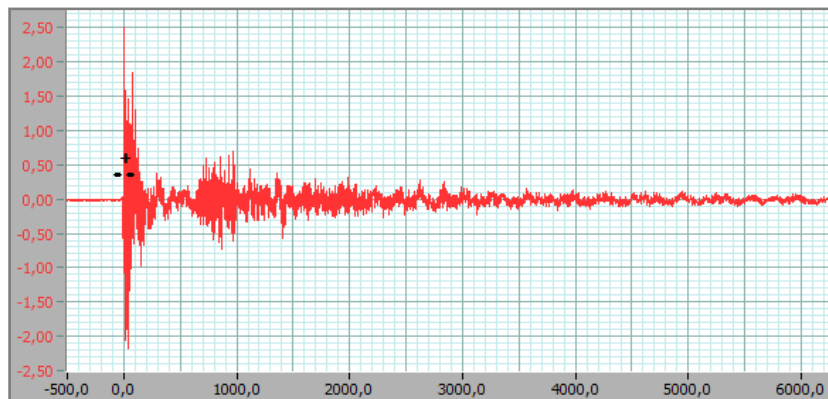
Tab. 5.5 Doba náběhu při teplotě 20°C

Hodnoty v μs

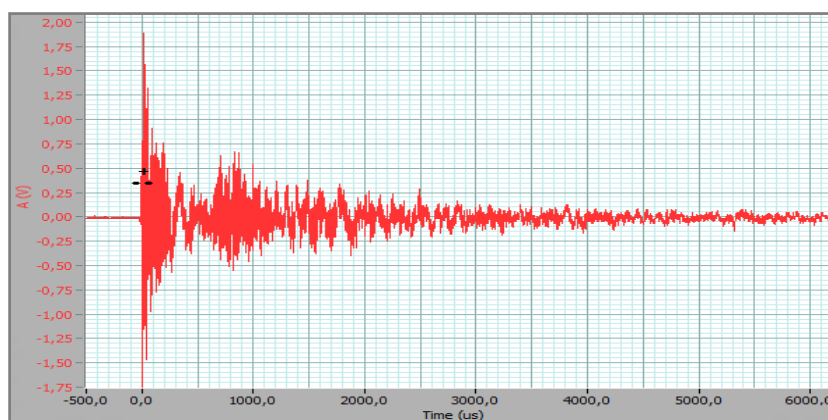
		sucho	krém ISOLDA	vazelína DUFR02	MRC Paste	Ultrasonic couplant	olej M6AD
5 cm	doba náběhu	114	32	6	6	6	12
	směrodatná odchylka	20	30	0	0	0	1
	variační koeficient	17%	93%	0%	0%	0%	7%
10 cm	doba náběhu	101	19	11	13	13	73
	směrodatná odchylka	86	10	0	1	0	1
	variační koeficient	85%	53%	0%	5%	0%	1%
100cm	doba náběhu	513	81	57	26	42	22
	směrodatná odchylka	3	0,5	0,3	7	25	0
	variační koeficient	0,6%	0,6%	0,5%	28%	60%	0%

5.1.3 Tvar události AE

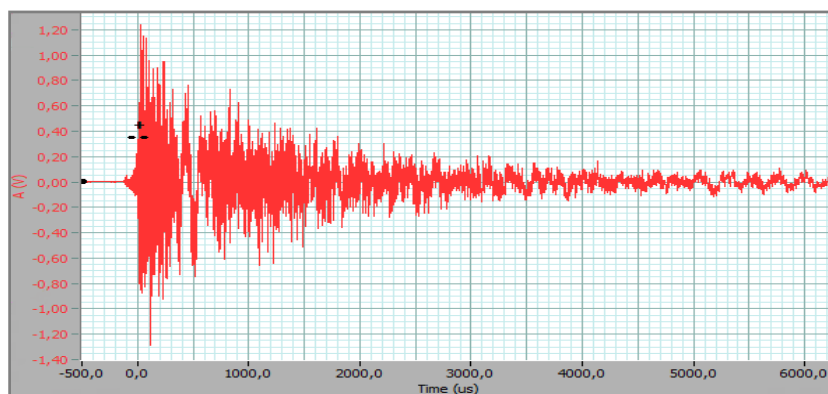
Na obrázcích 5.1, 5.2 a 5.3 jsou zachyceny záznamy událostí naměřených postupně ve vzdálenostech (5, 10 a 100) cm. Na svislé ose je zobrazena amplituda signálu [mV], na vodorovné ose je čas [μs]. Na první pohled je patrné, že se jednotlivé události liší amplitudou. Dále je na obr. 5.1 a obr. 5.2 vidět výrazně časově izolovaný hit vyvolaný Pen-Testem (oblast 0-400 μs) od hitu způsobeného odrazem signálu od okraje zkušební tyče (oblast 600-1000 μs). Událost přichází ze vzdálenosti 100 cm je již značně ovlivněna odrazy a superpozicemi vln, a je tak velmi obtížné jednotlivé hity rozlišit. U všech událostí je pak vidět postupný útlum signálu v čase.



Obr. 5.1: Záznam události AE ve vzdálenosti 5 cm od zdroje



Obr. 5.2: Záznam události AE ve vzdálenosti 10 cm od zdroje



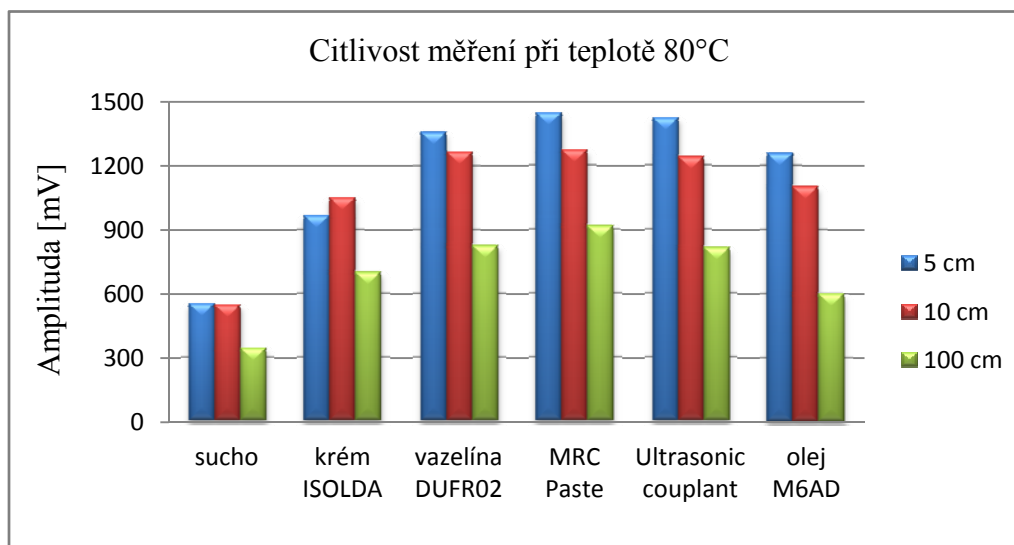
Obr. 5.3: Záznam události AE ve vzdálenosti 100 cm od zdroje

5.1.4 Hodnocení citlivosti měření při teplotě 80°C

Tab. 5.6 Amplituda události AE při teplotě 80°C Hodnoty v μs

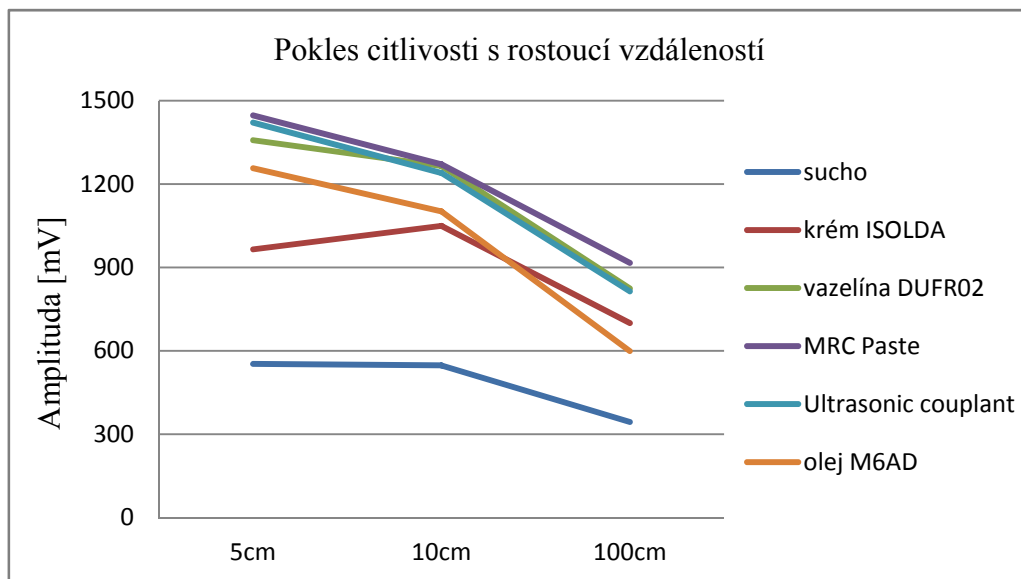
		sucho	krém ISOLDA	vazelína DUFR02	MRC Paste	Ultrasonic couplant	olej M6AD
5 cm	amplituda události	553	965	1358	1447	1421	1257
	směrodatná odchylka	52	92	70	71	87	120
	variační koeficient	9,5%	9,5%	5,1%	4,9%	6,1%	9,5%
10 cm	amplituda události	547	1050	1265	1271	1240	1102
	směrodatná odchylka	42	72	106	119	65	98
	variační koeficient	7,7%	6,9%	8,3%	9,4%	5,2%	8,9%
100cm	amplituda události	344	700	824	916	814	599
	směrodatná odchylka	42	52	46	32	76	29
	variační koeficient	12,2%	7,5%	5,6%	3,4%	9,3%	4,9%

Výsledky měření při teplotě 80°C jsou zachyceny v grafu 5.4. Všimněme si, že došlo k celkovému poklesu citlivosti oproti měření při teplotě 20°C a ke smazání rozdílů mezi jednotlivými médii, tedy k relativnímu srovnání citlivosti měření. Přípravek MRC Paste, který při 20°C vykazoval nejhorší výsledky, zde již dostává své specifikace a zaznamenává nejlepší citlivost měření. Jen o krok hůře je na tom Ultrasonic couplant a vazelína DURF02. Nadále platí trend snižování amplitudy signálu se vzdáleností, citlivostní zisk oproti suchému kontaktu zůstává stále více než dvojnásobný, výjimku tvoří pouze krém Isolda.



Graf 5.4: Srovnání citlivosti měření při teplotě 80°C

Trend vývoje citlivosti měření s rostoucí vzdáleností je pro teplotu 80°C stejný jako byl pro teplotu 20°C, vykazuje tedy pokles amplitudy signálu. (viz graf 5.5)



Graf 5.5: Pokles citlivosti měření se vzrůstající vzdáleností (80°C)

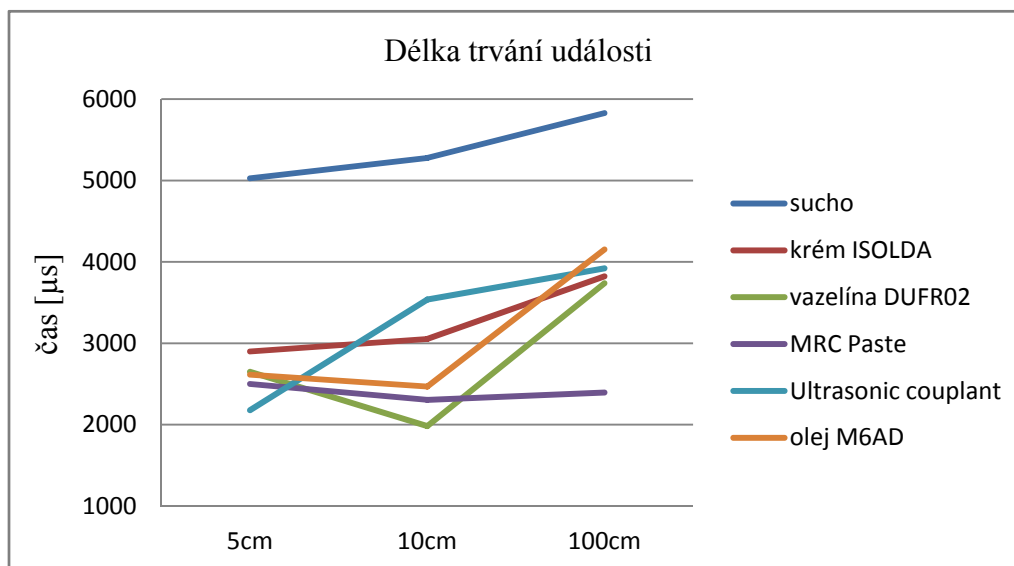
5.1.5 Délka trvání události a doba náběhu při teplotě 80°C

V tab. 5.7 a 5.8 jsou uvedeny hodnoty délky trvání události a doby náběhu dosažené měřením při teplotě 80°C. Oba parametry vykazují vzrůstající tendenci se zvyšující se vzdáleností zdroje AE od snímače.

Tab. 5.7 Délka trvání události AE při teplotě 80°C

Hodnoty v μs

		sucho	krém ISOLDA	vazelína DUFR02	MRC Paste	Ultrasonic couplant	olej M6AD
5 cm	délka trvání	5027	2899	2650	2500	2178	2613
	směrodatná odchylka	214	155	34	255	289	333
	variační koeficient	4%	5%	1%	10%	13%	13%
10 cm	délka trvání	5277	3053	1983	2305	3536	2469
	směrodatná odchylka	35	434	261	328	452	211
	variační koeficient	1%	14%	13%	14%	13%	9%
100cm	délka trvání	5829	3822	3737	2394	3931	4153
	směrodatná odchylka	377	212	0	163	172	255
	variační koeficient	6%	6%	0%	7%	4%	6%



Graf 5.6: Délka trvání události (80°C)

Tab. 5.8 Doba náběhu při teplotě 80°C

Hodnoty v µs

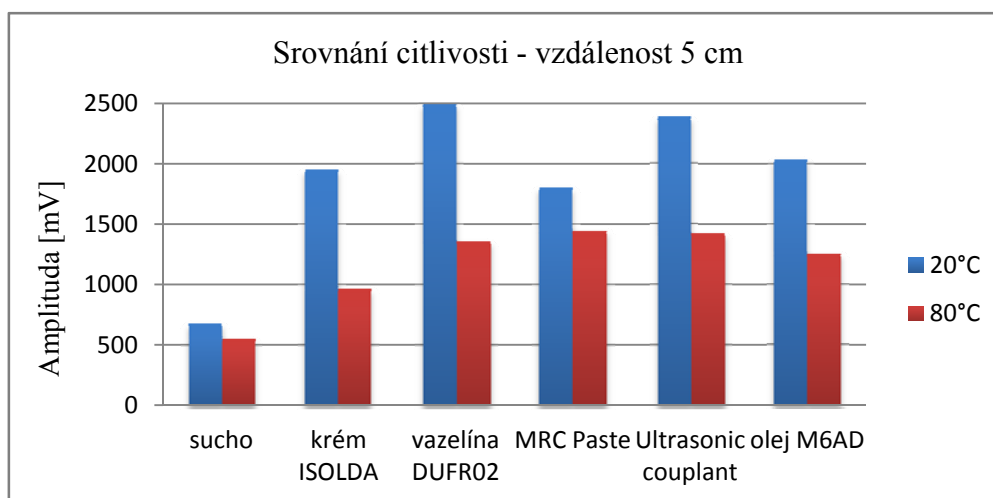
		sucho	krém ISOLDA	vazelína DUFR02	MRC Paste	Ultrasonic couplant	olej M6AD
5 cm	doba náběhu	22	6	14	21	6	76
	směrodatná odchylka	8	0	3	7	0	0
	variační koeficient	38%	0%	40%	32%	0%	0%
10 cm	doba náběhu	107	21	32	6	19	33
	směrodatná odchylka	1	7	15	0	7	8
	variační koeficient	1%	32%	46%	0%	39%	25%
100cm	doba náběhu	486	98	54	22	52	97
	směrodatná odchylka	63	49	28	0	21	37
	variační koeficient	13%	50%	51%	0%	41%	38%

5.1.6 Srovnání citlivosti měření při teplotě 20°C a 80°C

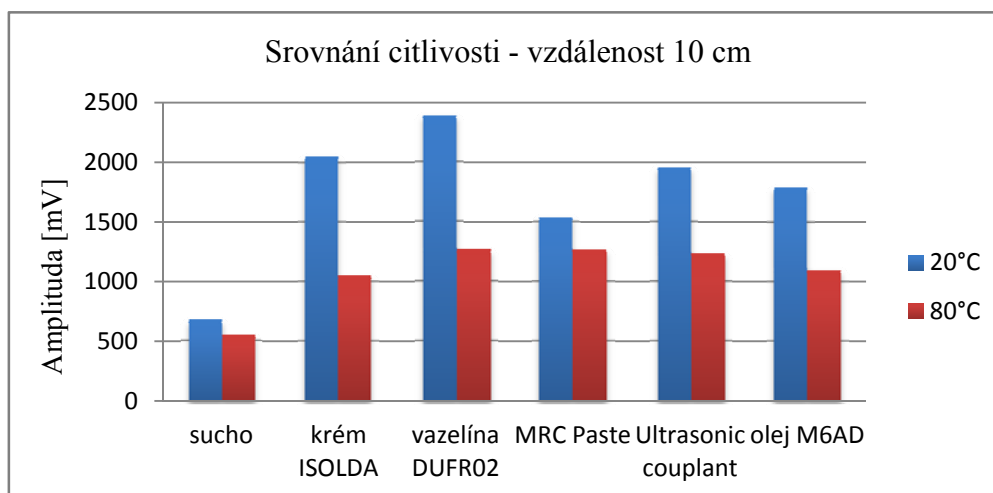
Následující tři grafy (5.7, 5.8, 5.9) popisují pokles citlivosti měření při teplotě 80°C vůči měření při teplotě 20°C. Při měření na sucho byl zaznamenán pokles citlivosti přibližně 20%, což je s největší pravděpodobností způsobeno tepelným ovlivněním piezokrystalu ve snímači. Srovnatelný pokles zaznamenala pouze speciální pasta určená pro aplikaci při zvýšených teplotách (MRC Paste). Společně s prostředkem Ultrasonic Couplant (pokles citlivost cca 35%) vykazovaly obě média po celou dobu

5.1.6

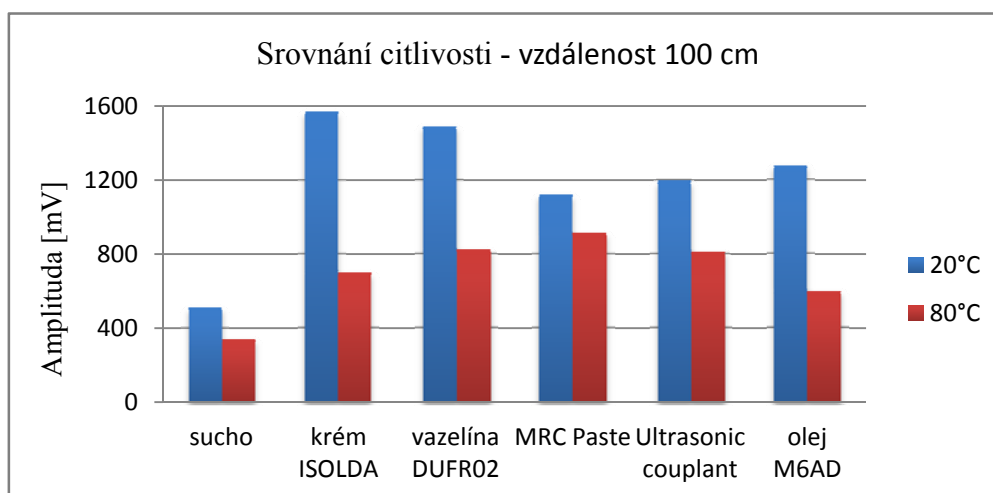
měření dobrou stabilitu. Proto je vyšší pokles u Ultrasonic couplant způsoben pravděpodobně tím, že se již blížíme k okraji jeho doporučené použitelnosti (100°C).



Graf 5.7: Srovnání citlivosti měření ve vzdálenosti 5 cm při různých teplotách

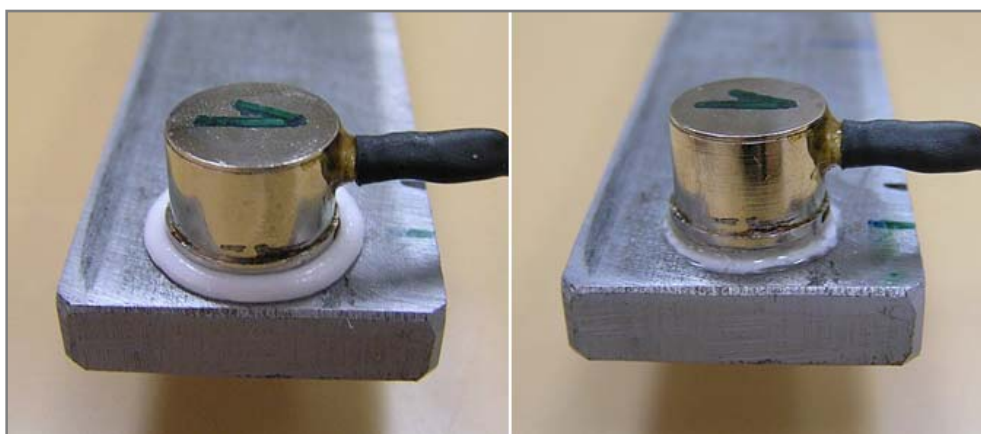


Graf 5.8: Srovnání citlivosti měření ve vzdálenosti 10 cm při různých teplotách



Graf 5.9: Srovnání citlivosti měření ve vzdálenosti 100 cm při různých teplotách

U třech zbylých médií byla na první pohled patrná výrazná nestabilita. Již po krátké době (délka měření pro jednotlivá média se pohybovala okolo 15 minut) bylo možné pozorovat změnu viskozity projevující se roztápním média. To mělo za následek propad citlivosti téměř o polovinu. U hydratačního krému Isolda došlo dokonce k jeho totální degradaci (viz obr. 5.4) a při delším měření by zcela jistě došlo k jeho úplnému vypaření z kontaktu. Pokles citlivosti překračoval hodnotu 50% a s rostoucí délkou měření se dá předpokládat další pokles.



Obr. 5.4: Ukázka nestability vazebného média při zvýšení teploty

5.2 Měření vlivu struktury povrchu na signál AE

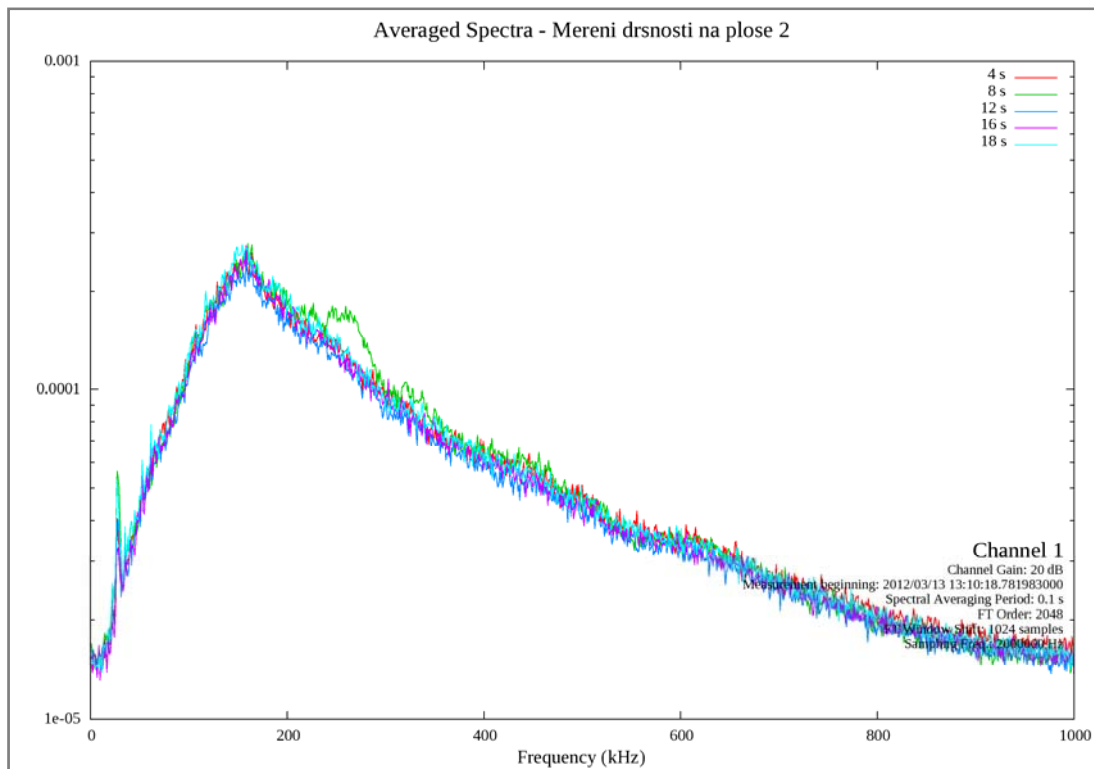
5.2

Demonstované záznamy jsou prvotními výsledky z měření na zkonstruovaném přípravku a jsou získány ze snímače umístěného na prstenci (viz obr. 4.7). Přímé srovnání všech tří ploch bohužel není možné z důvodu nutnosti nastavení různých hodnot zesílení signálu pro jednotlivá měření (zesílení se v závislosti na drsnosti a snímači pohybovalo v rozmezí 0-50 dB). Porovnávají jsou tedy vždy dvojice ploch, u kterých byla při měření nastavena stejná hodnota zesílení. Jsou to plocha s drsností Ra 0,8 vůči ploše s drsností Ra 3,2 (měření probíhalo při zesílení 20 dB) a plocha s drsností Ra 3,2 vůči ploše s drsností Ra 6,3, kdy byla nastavena hodnota zesílení 0 dB (tedy měření probíhalo bez zesílení).

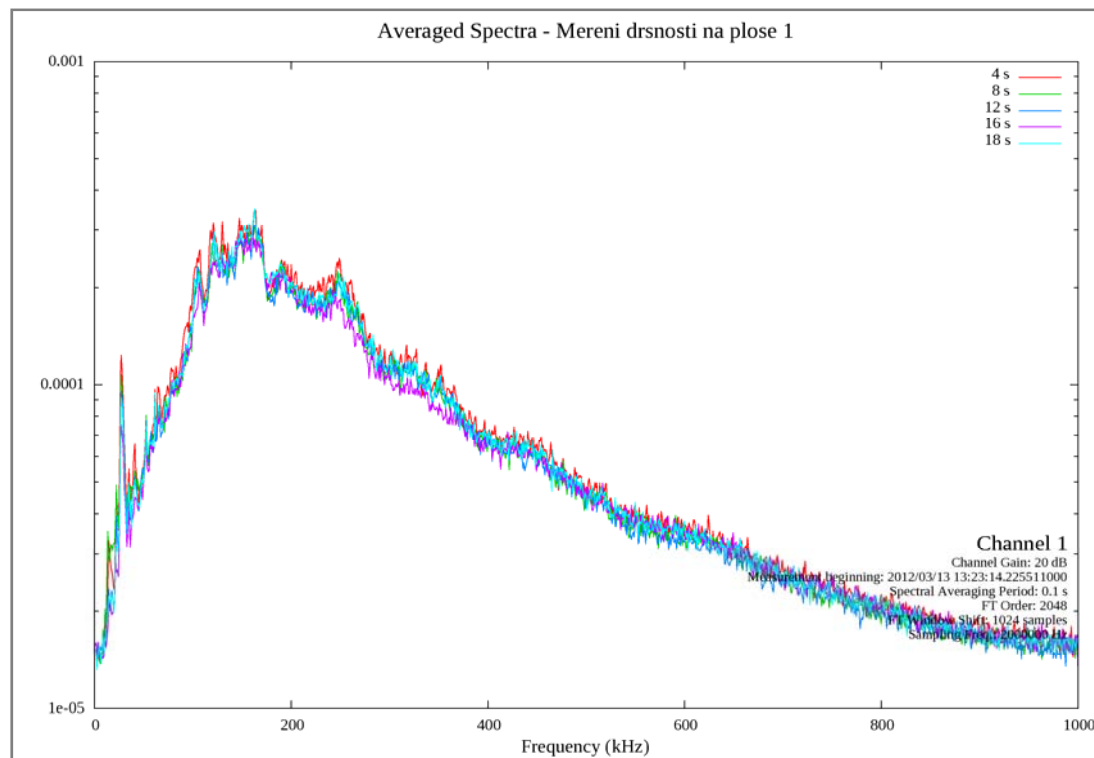
Trend celkového průběhu frekvenčního spektra v čase je u všech ploch totožný. V oblasti 0-180 kHz dochází k rapidnímu nárůstu intenzity frekvencí, kdy frekvence 180 kHz reprezentuje maximální intenzitu. Dále nastává pozvolný pokles intenzity jednotlivých frekvencí. Srovnáme-li plochu s drsností Ra 0,8 a plochu s drsností Ra 3,2 (obr. 5.5 resp. obr. 5.6), je u plochy s hrubší strukturou povrchu dosaženo vyššího maxima intenzity. Je patrný také větší rozkmit intenzity frekvencí, a to převážně v oblasti nejvyšší intenzity (100-300 kHz). Stejně poznatky plynou i ze vzájemného srovnání ploch s drsností Ra 3,2 a Ra 6,3 (obr. 5.7 resp. obr. 5.8).

Změny v časovém průběhu signálu na daných frekvenčních hladinách mezi plochami s drsnostmi Ra 0,8 a Ra 3,2 jsou poměrně nevýrazné (obr. 5.9 a obr. 5.10) na rozdíl od ploch s drsnostmi Ra 3,2 a Ra 6,3. Záznam z měření na ploše o drsnosti Ra 3,2 (obr. 5.11) vykazuje velké rozdíly intenzity mezi jednotlivými frekvencemi, nejvyšší intenzity dosahuje frekvence 180 kHz. U plochy s drsností Ra 6,3 (obr. 5.12) byly zaznamenány velké výkyvy intenzity na jednotlivých frekvenčních hladinách, přičemž intenzitní rozdíly mezi nimi nejsou tak markantní. Platí, že plocha s vyšší drsností vykazuje vyšší intenzitu frekvencí.

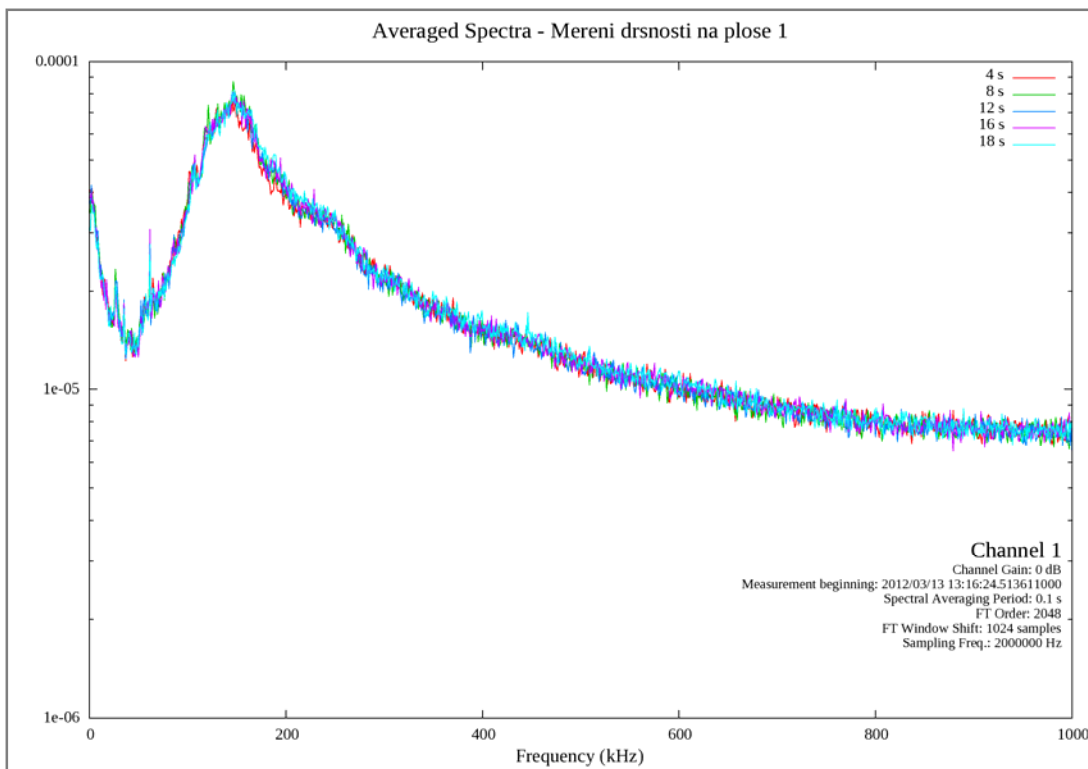
5.2.1 Vývoj frekvenčního spektra signálu v zadaném čase



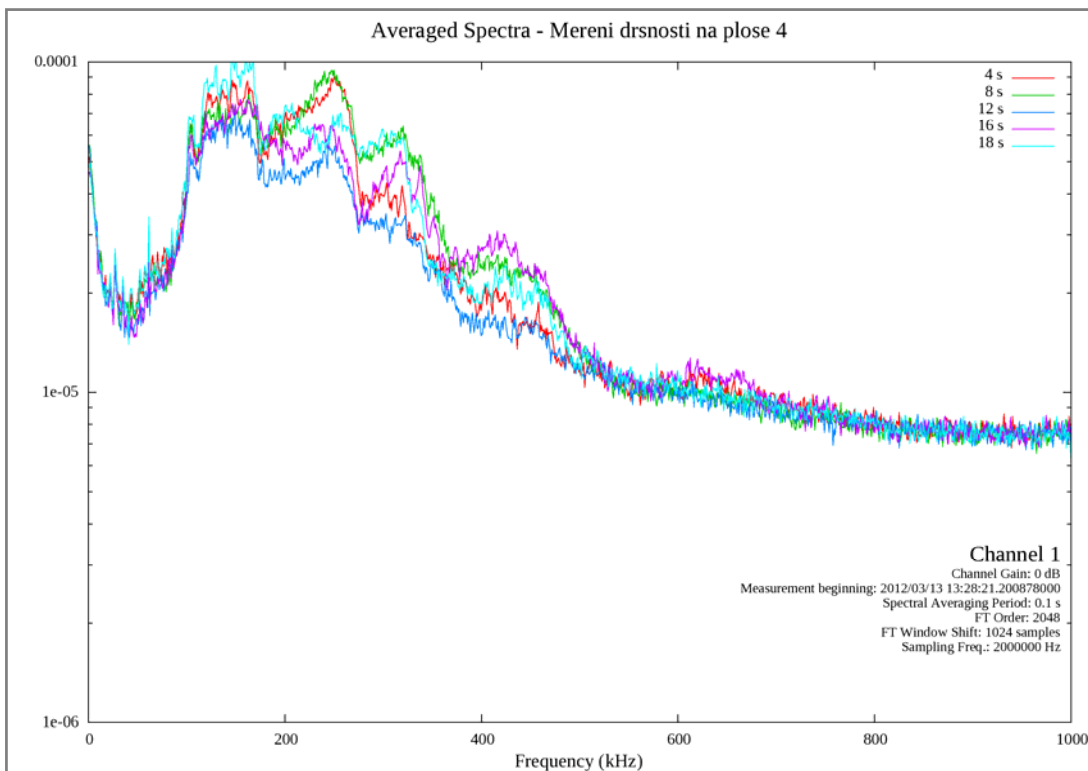
Obr. 5.5: Vývoj frekvenčního spektra signálu v zadaném čase (Ra 0,8; 20dB)



Obr. 5.6: Vývoj frekvenčního spektra signálu v zadaném čase (Ra 3,2; 20dB)

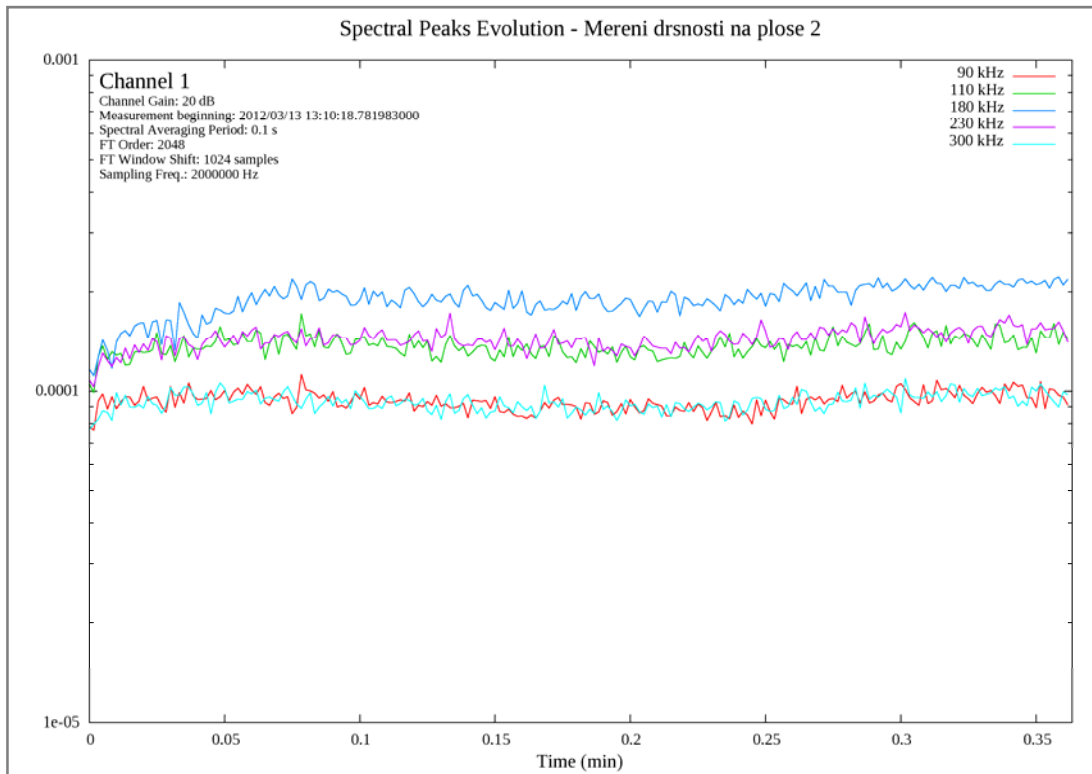


Obr. 5.7: Vývoj frekvenčního spektra signálu v zadaném čase (Ra 3,2; 0dB)

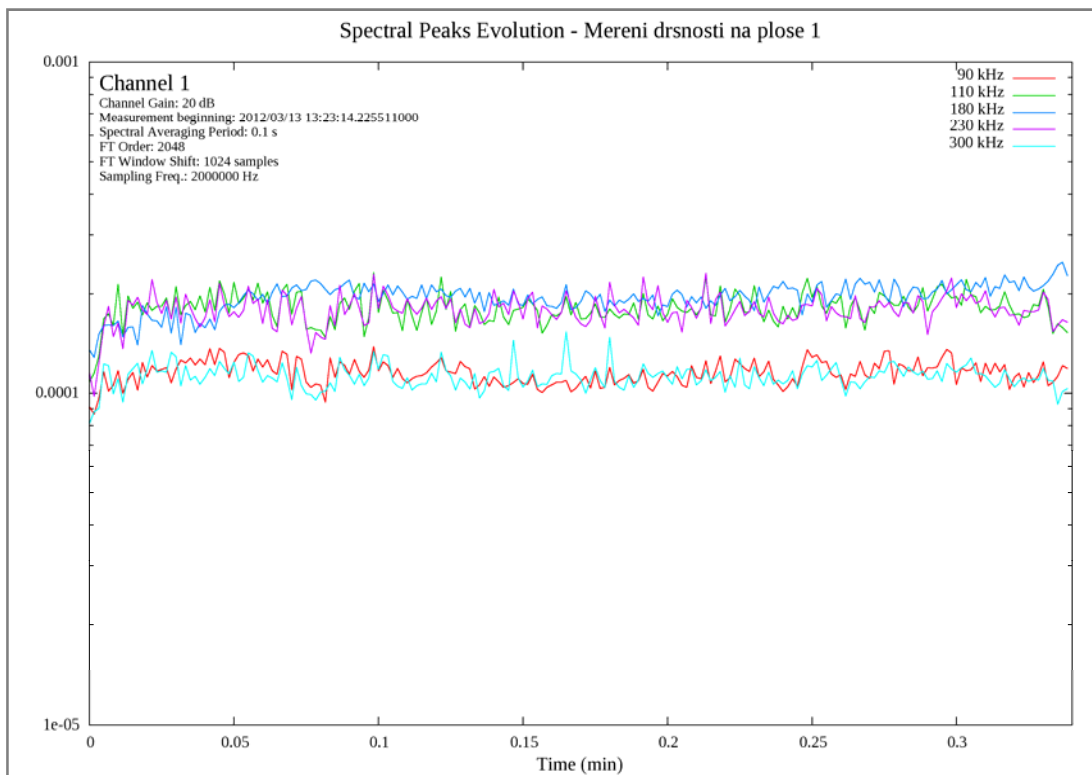


Obr. 5.8: Vývoj frekvenčního spektra signálu v zadaném čase (Ra 6,3; 0dB)

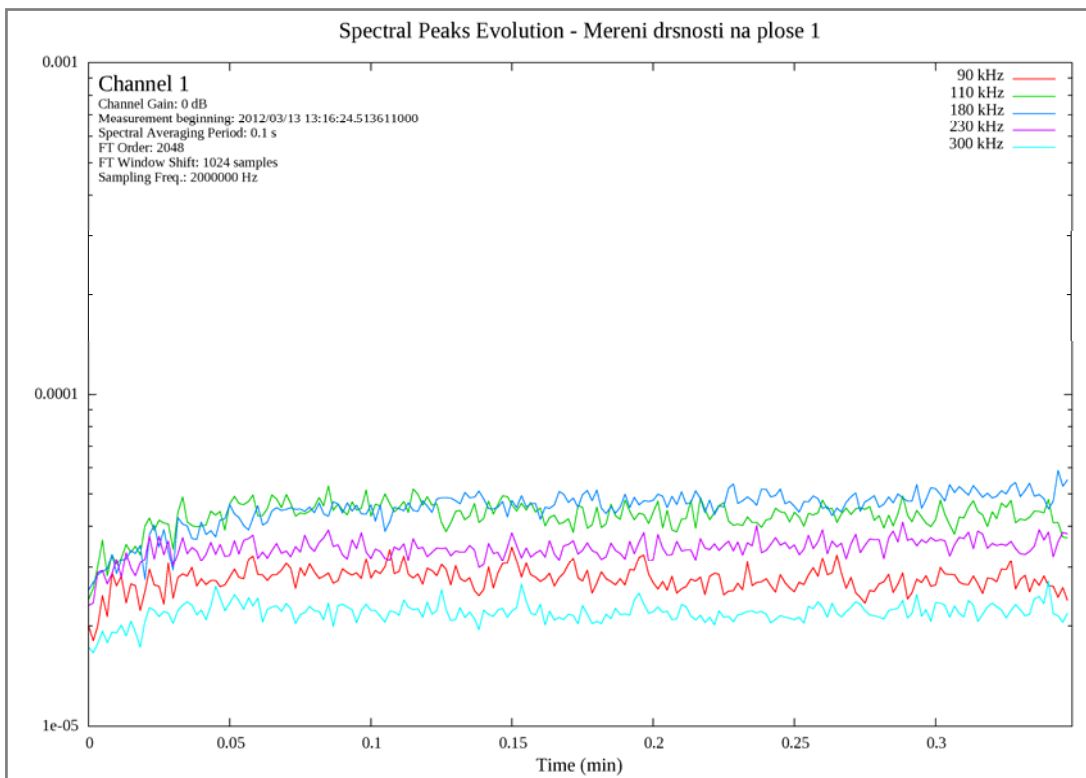
5.2.2 Časový průběh signálu na daných frekvenčních hladinách



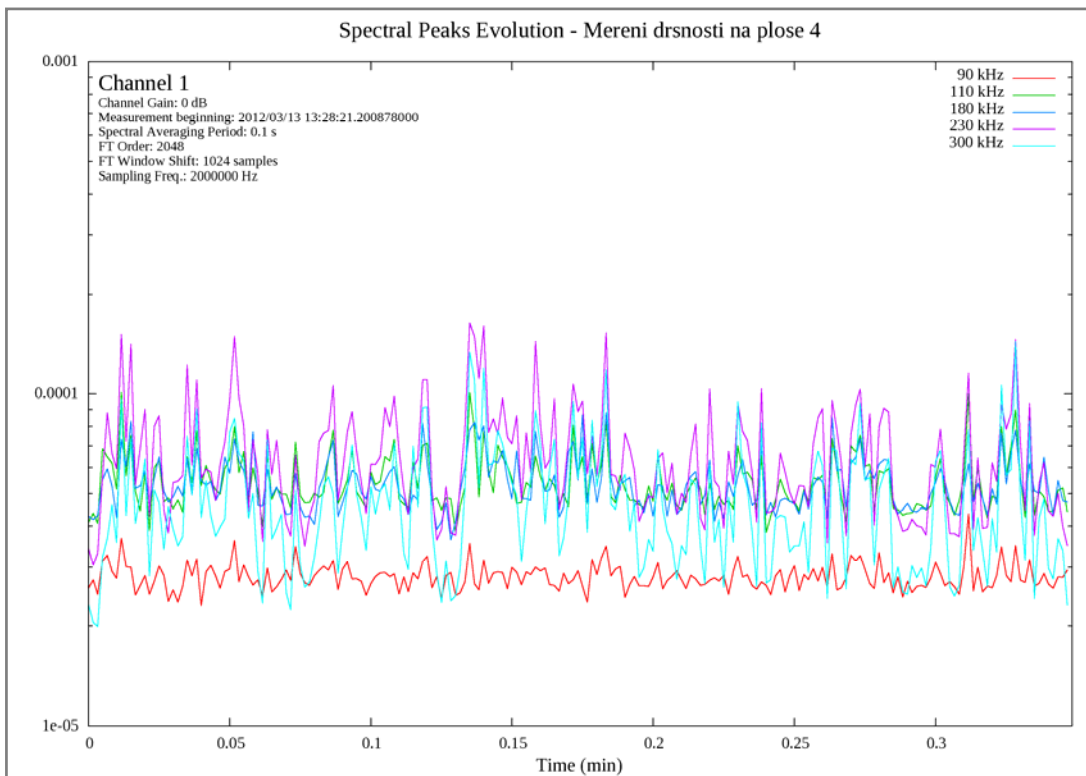
Obr. 5.9: Časový průběh signálu na daných frekvenčních hladinách (Ra 0,8, 20dB)



Obr. 5.10: Časový průběh signálu na daných frekvenčních hladinách (Ra 3,2, 20dB)



Obr. 5.11: Časový průběh signálu na daných frekvenčních hladinách (Ra 3,2, 0dB)



Obr. 5.12: Časový průběh signálu na daných frekvenčních hladinách (Ra 6,3, 0dB)

6 ZÁVĚR

V rešeršní části diplomové práce bylo provedeno seznámení s metodou akustické emise, s jejími aplikacemi, možnostmi a limity, s měřicí soustavou potřebnou k její detekci a následnému vyhodnocování signálu AE. Pozornost byla věnována také rozboru současně používaných vazebných médií, doplněnému o jejich specifikace a doporučené aplikace.

Praktická část diplomové práce je rozdělena do dvou částí. První část se zabývá vlivem vazebného prostředí na snímaný signál akustické emise, druhá část je věnována zkoumání vlivu struktury povrchu na signál AE. Cílem první části bylo provést srovnání citlivosti několika vazebných médií, tento cíl byl splněn. Hlavním poznatkem získaným v této části je fakt, že vazebné prostředí zlepšuje přenos vlnění z povrchu testovaného materiálu do snímače, a tím výrazně zvyšuje citlivost měření. Nejvyšších hodnot amplitudy za normálních podmínek dosahovala vazelína DUFR02, jejíž několikaleté užívání na Ústavu konstruování je tedy oprávněné. Dobrých výsledků dosahovala také při měření za zvýšené teploty. Přesto bych na základě výsledků a průběhu experimentálních měření pro diagnostikování za vyšších teplot (např. při testování životnosti ložisek na jedné ze stanic SA67 nebo Axmat) doporučil některý z přípravků MRC Paste či Ultrasound couplant. Důvodem je jejich dobrá stabilita a časová stálost. Měření dále potvrdilo tvrzení odborníků, že v případech, kdy z nějakého důvodu nemáme k dispozici žádný profesionální přípravek, je možné použít běžný hydratační krém, či jiný, jemu podobný přípravek. To ovšem platí pouze při běžných pokojových teplotách. Výsledky poslouží také jako vodítko při výběru vhodného vazebného prostředku pro danou aplikaci, a to nejen pro potřeby pracovníků Ústavu konstruování, ale i pro firmy, které se zabývají problematikou diagnostikování metodou akustické emise.

Rovněž cíle stanovené v druhé části práce byly úspěšně splněny. Byl navrhnut a vyroben přípravek k měření vlivu struktury povrchu na signál AE. Realizována byla také série základních experimentálních měření, jejímž primárním účelem bylo ověření funkčnosti zkonstruovaného přípravku k měření. Dále jednotlivá měření sloužila k nalezení vhodných parametrů pro budoucí experimenty, a k vypracování základní metodiky měření vlivu struktury povrchu na signál AE. Hlubší analýza dat naměřených v této oblasti již překračuje rámec zadání mé diplomové práce, nicméně již na prvních provedených testech je patrný jistý rozdíl v signálu získaném z měření na površích s různými drsnostmi. K základní demonstraci těchto rozdílů byly zvoleny dvě charakteristiky, jejichž zpracování umožňuje software Dakel UI. Jsou jimi vykreslení časového průběhu signálu na daných frekvenčních hladinách a graf vývoje frekvenčního spektra signálu v zadaných časech. Z výsledků vyplývá, že nejvyšší intenzity dosahují frekvence v okolí 180 kHz, intenzita se zvyšuje s rostoucí hodnotou drsnosti povrchu. Na poznatky získané v této etapě budou navazovat další podrobnější studie, jejichž snahou bude přiblížit se k reálnému stavu např. použitím vazebného prostředí mezi zkušební tyčí a kroužkem (simulování olejové lázně) a volbou jiných materiálů (např. litiny). V případě, že by se ve snímaném signálu podařilo nalézt vhodný parametr související s případným zadíráním při pohybu kroužku, by bylo možné metodu AE aplikovat přímo v reálných podmínkách na přečerpávací elektrárně v Dalešicích.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KREIDL, Marcel a ŠMÍD, Radislav. *Technická diagnostika*. 1. vyd. Praha: BEN-technická literatura, 2006. 408s. ISBN 80-7300-158-6
- [2] Acoustic emission products. Euro physical acoustics [online]. c2004 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: http://www.epandt.com/us/produits_ea_us.html
- [3] DROUILLARD, T. F. Acoustic emission - the first half century. In: *12th Inter. Acoustic Emission Symposium "Progress in Acoustic Emission"*, pages 27-38, October 1994.
- [4] Diagnostická metoda akustické emise a její perspektivy. *TECHMAGAZÍN* [online]. 2011 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/85>
- [5] KOPEC, Bernard; a kol. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. 1. vyd. Brno: CERM s.r.o., 2008, 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [6] PŘIBÁN, M. *Metoda akustické emise I: Obecná část – základní principy*. Česká společnost pro NDT, Brno 2012.
- [7] Využití metody akustické emise v materiálovém inženýrství. Ústav konstruování - FSI VUT Brno [online]. [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/MAE/zterm.php>
- [8] SODOMKA, L. Teorie a praxe emise akustické emise (AE). *Politika, věda, náboženství* [online]. 2011 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://sodomkalubomir.blog.cz/1104/teorie-a-praxe-emise-akusticke-emise-ae-1>
- [9] KEPRT, J. *Primární kalibrace snímačů akustické emise*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 171 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Petr Beneš, PhD. Dostupné z WWW: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18293.
- [10] NDT: Introduction to Acoustic Emission Testing [online]. c2001-2012 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Index.htm
- [11] KOKTAVÝ, P. *Nedestruktivní diagnostika a fyzika dielektrik*, FEKT VUT v Brně. Brno, Vysoké učení technické v Brně. 2006. p. 1 - 102.
- [12] Snímače akustické emise. Dakel [online]. c2006-2012 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://www.dakel.cz/index.php?pg=prod/sens>

- [13] Guide on Acoustic Emission Sensor Couplants. *NPL* [online]. 2008 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://www.npl.co.uk/acoustics/ultrasound/research/guide-on-acoustic-emission-sensor-couplants>
- [14] THEOBALD, P, B. ZEQUIRI a J. AVISION. Couplants and their influence on AE sensor sensitivity. *Journal of Acoustic Emission*. 2008, Volume 26, s. 91-97. ISSN 0730-0050.
- [15] HORT, F. *Využití metody akustické emise pro zpřesnění diagnostiky vzniku poškození radiálních ložisek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 107 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [16] VLAŠIC, F. *Hodnocení cyklického poškození slitin na bázi hliníku a hořčíku s využitím metody akustické emise*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 143 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [17] MAZAL, P., L. PAZDERA a J. DVORACEK. Application of Acoustic Emission Method in Contact Damage Identification. In: *4th International conference on NDT* [online]. 2007 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://www.ndt.net/article/hsndt2007/files/PavelMazal.pdf>
- [18] ČSN EN 1330-9. Nedestruktivní zkoušení - Terminologie - Část 9: Termíny používané při zkoušení akustickou emisí. Praha, 2009.
- [19] Únavové vlastnosti. Ústav konstruování - FSI VUT Brno [online]. [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: http://www.uk.fme.vutbr.cz/www_uk/texty/vyzkum_unavove_vlastnosti/profil
- [20] STEIN, P. *Kategorizace signálu akustické emise při cyklickém namáhání dílců*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 63s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [21] SUCHANEK, D. *Úprava zkušebního zařízení ložisek pro aplikaci metody akustické emise*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 68 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [22] Digitální osciloskop Cleverscope CS320A. Oscilockopy.com [online]. c2008 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: http://www.oscilockopy.com/scopes/cs320/cs320main_cz.php
- [23] Analyzátor IPL. Dakel [online]. c2006-2012 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://www.dakel.cz/index.php?pg=prod/dev/ipl>

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN**8****8.1 Seznam použitých zkratek****8.1**

AE	- akustická emise
aj.	- a jiné
apod.	- a podobně
atd.	- a tak dále
cca	- cirká
MRC Paste	- Multi Range Coupling Paste
např.	- například
NDT	- nedestruktivní metody testování
popř.	- popřípadě
resp.	- respektive
RMS	- Root Mean Square (efektivní hodnota charakterizující energii signálu)
tj.	- to je
tzn.	- to znamená
tzv.	- tak zvaný
USB	- Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice)

8.2 Seznam použitých symbolů a veličin**8.2**

dB	- decibel
F [N]	- síla
hrs	- hours
J	- joule
kHz	- kilohertz
L [m]	- označení vzdálenosti dvou snímačů
MHz	- megahertz
mm	- milimetr
mV	- milivolt
N	- newton
u [m]	- posuv
X [m]	- vzdálenost zdroje AE od středového bude mezi dvěma snímači
ΔT [s]	- časová prodleva
μs	- mikrosekunda
μm	- mikrometr

9 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

9.1 Seznam obrázků

Obr. 1.1: Princip a přístrojové vybavení metody AE [2]	14
Obr. 1.2: Nespojité události AE [7]	15
Obr. 1.3: Spojitý signál AE [7]	16
Obr. 1.4: Pen-Test [7]	17
Obr. 1.5: Schéma piezoelektrického snímače [10]	18
Obr. 1.6: Vlnovod [12]	19
Obr. 1.7: Experimentální měřicí soustava [14]	22
Obr. 1.8: Citlivost snímače PAC S9280 pro podélné vlnění [14]	23
Obr. 1.9: Citlivost snímače PAC S9280 pro příčné vlnění [14]	23
Obr. 1.10: Ukázka vyhodnocení počtu překmitů přes několik prahů [17]	24
Obr. 1.11: Základní parametry události AE [7]	25
Obr. 1.12: Princip bodové lokalizace [10]	26
Obr. 1.13: Princip lineární lokalizace [10]	27
Obr. 2.1: Zkušební stanice SA67 [20]	28
Obr. 2.2: Rozmístění snímačů na stanici SA67 [21]	29
Obr. 4.1: Testovaná vazebná média	31
Obr. 4.2: Osciloskop Cleverscope CS320A s napájecí výhybkou	33
Obr. 4.3: Schematické znázornění variant řešení	34
Obr. 4.4: Přípravek k měření - pohled zepředu	34
Obr. 4.5: Přípravek k měření - pohled zprava	35
Obr. 4.6: Přípravek k měření - popis hlavních částí	36
Obr. 4.7: Vyrobený přípravek k měření - rozmístění snímačů	37
Obr. 4.8: Analyzátor Dakel IPL	38
Obr. 5.1: Záznam události AE ve vzdálenosti 5 cm od zdroje	44
Obr. 5.2: Záznam události AE ve vzdálenosti 10 cm od zdroje	44
Obr. 5.3: Záznam události AE ve vzdálenosti 100 cm od zdroje	44
Obr. 5.4: Ukázka nestability vazebného média při zvýšení teploty	49
Obr. 5.5: Vývoj frekvenčního spektra signálu v zadaném čase (Ra 0,8; 20dB)	50
Obr. 5.6: Vývoj frekvenčního spektra signálu v zadaném čase (Ra 3,2; 20dB)	50
Obr. 5.7: Vývoj frekvenčního spektra signálu v zadaném čase (Ra 3,2; 0dB)	51
Obr. 5.8: Vývoj frekvenčního spektra signálu v zadaném čase (Ra 6,3; 0dB)	51
Obr. 5.9: Časový průběh signálu na daných frekv. hladinách (Ra 0,8, 20dB)	52
Obr. 5.10: Časový průběh signálu na daných frekv. hladinách (Ra 3,2, 20dB)	52
Obr. 5.11: Časový průběh signálu na daných frekv. hladinách (Ra 3,2, 0dB)	53
Obr. 5.12: Časový průběh signálu na daných frekv. hladinách (Ra 6,3, 0dB)	53

9.2 Seznam grafů9.2

Graf 5.1: Srovnání citlivosti měření při teplotě 20°C	41
Graf 5.2: Pokles citlivosti měření se vzrůstající vzdáleností (20°C)	41
Graf 5.3: Délka trvání události (20°C)	43
Graf 5.4: Srovnání citlivosti měření při teplotě 80°C	45
Graf 5.5: Pokles citlivosti měření se vzrůstající vzdáleností (80°C)	46
Graf 5.6: Délka trvání události (80°C)	47
Graf 5.7: Srovnání citlivosti měření ve vzdálenosti 5 cm při různých teplotách	48
Graf 5.8: Srovnání citlivosti měření ve vzdálenosti 10 cm při různých teplotách	48
Graf 5.9: Srovnání citlivosti měření ve vzdálenosti 100 cm při různých teplotách	48

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1 Přehled používaných vazebných médií	32
Tab. 5.1 Amplituda události AE ve vzdálenosti 5 cm	39
Tab. 5.2 Amplituda události AE ve vzdálenosti 10 cm	40
Tab. 5.3 Amplituda události AE ve vzdálenosti 100 cm	40
Tab. 5.4 Délka trvání události AE při teplotě 20°C	42
Tab. 5.5 Doba náběhu při teplotě 20°C	43
Tab. 5.6 Amplituda události AE při teplotě 80°C	45
Tab. 5.7 Délka trvání události AE při teplotě 80°C	47
Tab. 5.8 Doba náběhu při teplotě 80°C	46