ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program:	B2301	Strojní inženýrství
Studijní zaměření:	2301R016	Materiály a strojírenská metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Projevy akustické emise
vzniklé během tepelného zpracování kovů

Autor: **Hynek GILÍK**
Vedoucí práce: **Ing. Petr BENEŠ, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: 27.7.2020 .....

podpis autora

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	**Příjmení** Gilík	**Jméno** Hynek	
STUDIJNÍ OBOR	2301R016 – Materiály a strojírenská metalurgie		
VEDOUCÍ PRÁCE	**Příjmení (včetně titulů)** Ing. Beneš, Ph.D.	**Jméno** Petr	
PRACOVIŠTĚ	ZČU – FST – KMM		
DRUH PRÁCE	~~**DIPLOMOVÁ**~~	**BAKALÁŘSKÁ**	**Nehodící se škrtněte**
NÁZEV PRÁCE	Projevy akustické emise vzniklé během tepelného zpracování kovů		

FAKULTA	strojní		**KATEDRA**	KMM	**ROK ODEVZD.**	2020

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	72		**TEXTOVÁ ČÁST**	72	**GRAFICKÁ ČÁST**	0

STRUČNÝ POPIS	Bakalářská práce se zabývá návrhem a konstrukcí zvukovodu pro měření akustické emise u ocelí během kalení. V teoretické části uvádí základní pojmy a metody měření akustické emise. V experimentální části je popis měření AE a vyhodnocení naměřených hodnot.
KLÍČOVÁ SLOVA	Akustická emise, tepelné zpracování, kalení

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	**Surname** Gilík	**Name** Hynek	
FIELD OF STUDY	2301R016 – Material science and technology		
SUPERVISOR	**Surname (Inclusive of Degrees)** Ing. Beneš, Ph.D.	**Name** Petr	
INSTITUTION	ZČU – FST – KMM		
TYPE OF WORK	~~**DIPLOMA**~~	**BACHELOR**	**Delete when not applicable**
TITLE OF THE WORK	Manifestations of acoustic emissions created during the heat treatment of metals		

FACULTY	Mechanical engeneering		**DEPARTMENT**	KMM	**SUBMITTED IN**	2020

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	72		**TEXT PART**	72	**GRAPHICAL PART**	0

BRIEF DECRIPTION	This Bachelor's thesis is concerned with the design and construction of sound duct which measure the acoustic emissions of steel during quenching. The theoretical section covers the basic concepts and methods of the measurement of acoustic emissions. The experimental section contains a description of the measurement of acoustic emissions and the evaluation of the values recorded in the experiment.
KEY WORDS	acoustic emission, heat treatment, quenching

Obsah

Seznam symbolů a zkratek ... 8
Úvod ... 9
1 Technologie akustické emise ... 10
1.1 Měření AE ... 10
1.2 Změny signálu během šíření v tělese ... 11
1.3 Základní jednotky ... 14
1.4 Parametry měření signálu ... 15
1.5 Potřebné zařízení pro AE ... 19
1.6 Interpretace signálu a její charakteristiky ... 23
1.7 Kaiserův jev ... 25
1.8 Kalibrace AE ... 26
2 Oblasti využití AE ... 28
2.1 Srovnání s jinými technikami ... 28
2.2 Výhody zkoušek akustické emise ... 28
3 Použití AE v průmyslu ... 30
3.1 Testování kompozitů ... 30
3.2 Testování produkce v průmyslové výrobě ... 30
3.3 Sledování svařovacích procesů ... 30
3.4 Testování netěsností ... 31
4 Tepelné zpracování ... 34
4.1 Mechanismy fázových transformací ... 34
4.2 Princip martenzitické transformace ... 35
4.3 Druhy kalení ... 36
5 Návrh experimentu ... 39
6 Výroba zvukovodu ... 40
6.1 Zvukovod v podobě tyče ... 40
6.2 Zvukovod v podobě samosvorných kleští ... 41
6.3 Zvukovod v podobě svěrky ... 41
6.4 Zvukovod v podobě nerezového plechu ... 42
7 Postupy měření ... 44
7.1 Experimentální aparatura ... 44
7.2 Popis legendy u grafů a kódování záznamů ... 47
7.3 Kalení do vody ... 47

7.4 Kalení na vzduchu 58
8 Diskuze výsledků 70
9 Závěr 71
Bibliografie 72

Seznam symbolů a zkratek

Zkratka	Jednotky	Název
A	-	Amplituda
AE	-	Akustická emise
C	-	Počty signálů
D	ms	Doba trvání signálu
E	mV	Množství energie
IRA	-	Izotermický rozpad austenitu
K	-	Ocel ČSN 12 050
Ms	-	Martenzit start
N	-	Ocel S235 JR
s	-	Snímač
R	-	Ocel ČSN 19 830
RMS	mV	Střední hodnota energie
Rt	ms	Čas nárustu signálu
Sv	-	Ocel Sverker 21

Úvod

Rešeršní část bakalářské práce slouží k přiblížení technologie akustické emise (AE) a následných projevů AE indukovaných při tepelném zpracování ocelí. Práce si klade za cíl seznámit se základy této technologie, s využitím technologie v praxi, seznámit se základy tepelného zpracování kovů a rozdělení kalení ocelí. V práci jsou popsány způsoby měření akustické emise, druhy zařízení používané při měření. Dále jsou vysvětleny fyzikální principy šíření zvukových vln a metodika hodnocení parametrů signálů. V práci jsou zmíněny oblasti využití AE ve strojírenství.

Praktická část této bakalářské práce popisuje postup měření akustické emise indukované u ocelí během kalení v různých chladících mediích. Dále popisuje výrobu experimentální aparatury pro měření, výběr a konstrukci zvukovodů a práci s nimi.

1 Technologie akustické emise

Akustická emise jako pojem byla objevena ve fyzikálních laboratořích při studiu plastické deformace kovů. Nazývá se tak „fyzikální jev, při kterém plastickou deformaci kovů doprovází akustické popraskání či akustický šum emitován uvnitř materiálu v průběhu plastické deformace“. (Kopec, 2008 str. 446) Akustická emise je zkoumána posledních šedesát let. (Huang, 2013 str. 12)

Důvodem pozornosti věnované těmto šumům bylo získat nové informace o přítomnosti procesů a povaze dějů, v jejichž důsledku dochází k plastické deformaci.

Příkladem akustické emise ze života je situace popraskání suché větve před zlomením. Akustickou emisí je jasně slyšitelný typický zvuk praskání. V tomto případě se přenos zvuku přenáší z větve vzduchem a následně se šíří jako tlakové vlny k uchu. Mnohem výhodnější je tento signál detekovat přímo na povrchu daného tělesa přijímačem, protože je signál šířen přímo do místa příjmu.

Dle názvosloví EN 13390 je akustickou emisí (AE) nazýváno „napěťové elastické vlny generované dynamickým uvolněním mechanického napětí uvnitř materiálu tělesa.“ Nebo vznikem elastických napěťových vln na povrchu tělesa – např. klepnutí. (Kopec, 2008 str. 446)

Akustické emisní testy jsou pasivní metodou, která monitoruje dynamické přerozdělování napětí uvnitř materiálu nebo součásti. Proto je monitorování akustických emisí účinné pouze tehdy, když je materiál nebo konstrukce vystavena působení namáhání. Příklady těchto tlaků zahrnují tlakové zkoušky nádob nebo potrubí a zatížení tahu nebo zatížení struktur konstrukčních součástí. (Miller, a další, 2005 str. 37) Lze měřit i nízkoteplotní tečení. (Kopec, 2008 str. 455)

Toto testování může být například zkušební zátěž před servisem, řízená změna zatížení během samotného provozu zařízení, testy únavy nebo komplexní program cyklického zatěžování. Tato metoda testování a inspekce se používá, protože poskytuje cenné dodatečné informace o vlastnostech konstrukce pod zatížením. Mimo jiné kontrola AE je vybírána z důvodů hospodárnosti nebo bezpečnosti. (Lamet, 1997 str. 593)

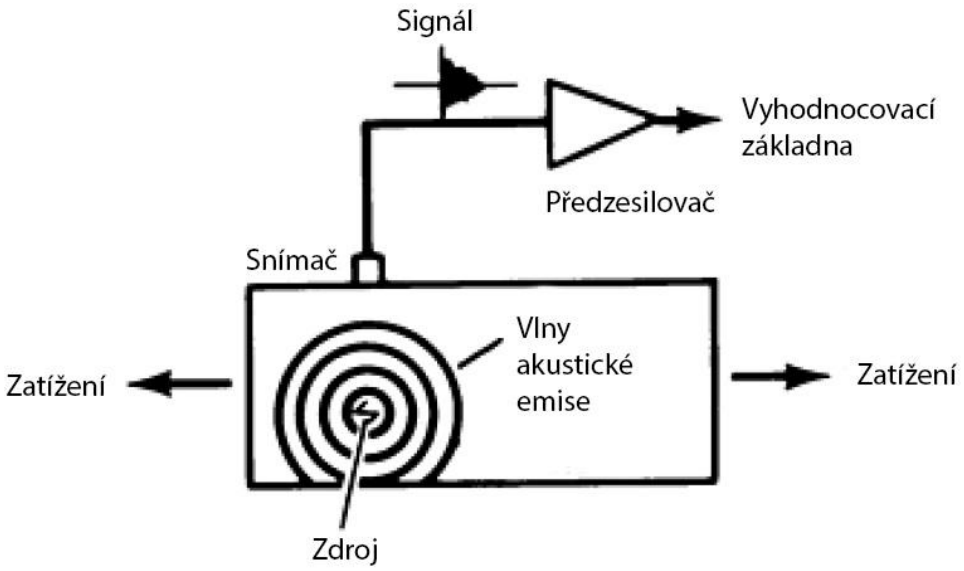
1.1 Měření AE

Metodu měření detekce AE lze vylíčit následujícími kroky:

„Událost zdroje – např. mikroprasknutí. Šíření napěťových vln. Detekce napěťových vln snímačem na povrchu tělesa. Analogové zpracování a vedení elektrického signálu na vstup vyhodnocení. Vyhodnocení výsledného elektronického signálu měřícím systémem.“ (Kopec, 2008 str. 446)

Při generování a šíření zvuku musí být signál AE detekován, upraven a zaznamenán pro pozdější analýzu. Pro tento účel je k dispozici široká škála senzorů AE a měřicích systémů. Některé z běžně používaných detekčních a záznamových přístrojů budou popsány níže. (Shull, 2002 str. 395)

Faktory zeslabující houževnatost, tvárnost a schopnosti zpevňování materiálu při zatížení zvyšují schopnost detekování AE. Naopak faktory posilující zpevňování, tvárnost
a houževnatost omezují detekovatelnost AE. (Kopec, 2008 str. 456)



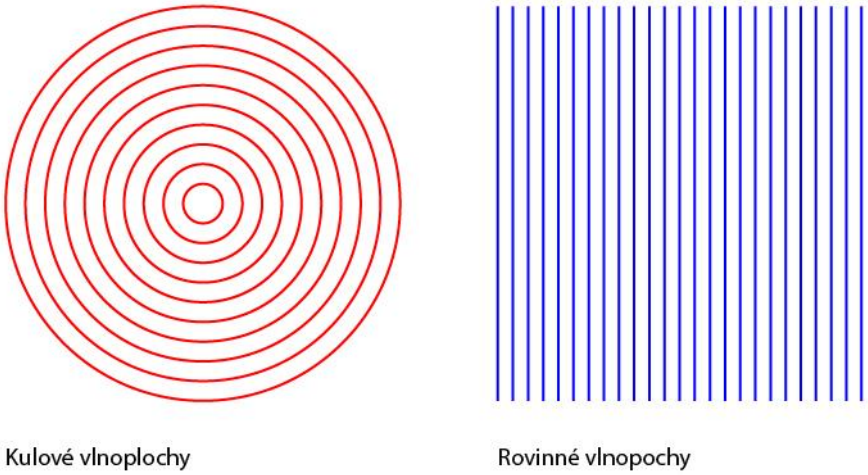
Obr. 1 – Základní princip metody akustické emise (Lamet, 1997 str. 593)

1.2 Změny signálu během šíření v tělese

Útlum: Rozptyl energie a útlum vlny v závislosti na vzdálenosti přijímače. Disperze: Časově/frekvenčně pozměněný zvuk, potlačení vyšších frekvencí v závislosti na rozdílném umístění přijímačů. Vysoké frekvence mají nižší dosah šíření. Citlivost rezonančního přijímače se obvykle uvádí 20kHz – 1MHz, nejcitlivější na změnu jsou tedy nízké frekvence, ale zároveň mají nejdelší dosah, současně na nízkých frekvencích je největší úroveň akustického rušení. (Kopec, 2008 str. 451)

Šíření zvuku

Zvukové vlny se šíří do okolního prostředí ze zdroje zvuku. V pevných látkách se zvuk šíří jako postupné podélné a příčné vlnění. V kapalinách a plynech se zvuk šíří podélně. Materiál, v němž se šíří zvukové vlny, musí být pružný. V nepružných prostředí (např. plsť, vata, vlna) se zvukové vlny šíří špatně, a proto jsou používány jako zvukové izolátory.
Ve vakuu se zvuk nemůže šířit. (Vlachová str. 27)



Obr. 2 – Kulové a rovinné vlnoplochy (zdroj: autor)

Rychlost zvuku je úměrná hustotě prostředí, termodynamické teplotě a přítomnosti dalších látek. V plynech se zvuk šíří pomaleji než v pevných a kapalných látkách.

Prostředí	**Rychlost $m \cdot s^{-1}$**
Vzduch (20°C)	343
Vodík (0°C)	1284
Voda (20°C)	1482
Ocel	5941
Žula	6000
Hliník	6420

Tab. 1– Orientační rychlosti zvuku v různých prostředích, (Walker, 2007 str. 481)

Absorbce zvuku

Zvukové vlny se při šíření odráží od stěny prostředí a část vln jimi proniká. Intenzita dopadajícího vlnění na stěnu je vždy větší než intenzita odraženého vlnění. Koeficient absorpce zvuku při odrazu a je definována jako :

$$a = \frac{I_0 - I}{I_0} \qquad (1)$$

I_0 dopadající vlnění

I je hodnota odraženého vlnění

Koeficient absorpce je závislý na materiálu stěny, ale mění se i frekvencí zvukových vln. Pro nižší frekvence je koeficient absorpce nižší, pro vyšší frekvence je naopak koeficient vyšší. Ve zjednodušení hluboké tóny se napříč prostředím šíří nejsnadněji. (Hanák, 2011)

Materiál	**Koeficient absorpce**
Beton	0,015
Sklo	0,027
Plyš	0,59

Tab. 2 – orientační koeficienty absorpce u různých materiálů. (Vlachová str. 27)

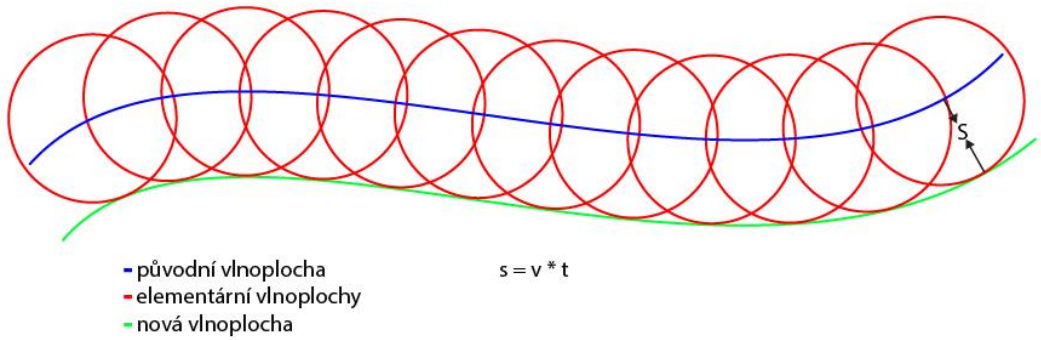
Huygensův princip

Při zkoumání šíření vln není třeba mít žádnou informaci o umístění zdroje. K předpovědi vlnoplochy stačí znát jednu z vlnoploch a charakter daného vlnění.

Tento princip se nazývá po svém objeviteli Christianu Huygensovi. Později byl zpřesněný panem Fresnelem, který tento princip formuloval takto:

Každý bod vlnoplochy, do něhož posupné vlnění dospělo v určitém okamžiku, lze pokládat za zdroj elementárního vlnění, které se z něho šíří v elementárních vlnoplochách. Celková vlnoplocha v dalším časovém okamžiku je vnější obálka všech elementárních vlnoploch a kolmice na ni jednoznačně určuje směr šíření.

Tento princip umožnuje zkoumat šíření vln v libovolných situací. (Hanák, 2011)



Obr. 3 – Huygensův princip (zdroj: autor)

Odraz zvuku

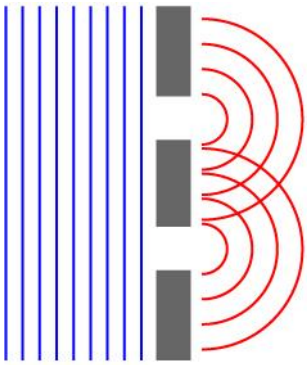
Množství odražené energie zvuku závisí na hustotách obou prostředí. Úhel odrazu vlny se rovná úhlu dopadu.

Ohyb zvuku

Ohyb zvuku vzniká za otvory nebo předměty, které jsou stejné nebo větší než vlnová délka zvukové vlny. Jestliže otvor nebo překážka má řádově větší rozměry než vlnová délka zvuku, vzniká za překážkou tzv. akustický stín. Akustický stín je prostor, kde se zvuk nešíří. (Hanák, 2011)

Skládání Vln

Skládání vln vzniká, když jedním bodem prochází více vln z různých zdrojů. Skládají-li dvě vlny v jednom bodě, říká se, že spolu interferují. Součet vln se řídí zákony superpozice. (Hanák, 2011)



Obr. 4 – Ohyb vln na dvou štěrbinách. Štěrbina se chová jako zdroj elementárního vlněn (zdroj: autor)

1.3 Základní jednotky

Jednotky pro akustiku, tlak, rychlost a příbuzné veličiny důležité pro měření.

Akustická emise se chová jako rázová vlna uvnitř zatěžovaného materiálu, kde dochází k posunutí dislokací (v jednotkách vzdálenosti), která dále prochází přes materiál
a pohybuje se jeho povrchem. Snímač na povrchu tělesa tento posun zachycuje jako změnu tlaku. Tlak je měřen jako síla na jednotku plochy v pascalech [Pa], ekvivalentní k newtonu na čtvereční metr [$N \cdot m^{-2}$]. Signál z převodníku je někdy spojen s rychlostí [$m \cdot s^{-1}$] posunutí [m] nebo zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]. Vlastnosti piezoelektrických měničů jsou dány elektrickým nábojem a tlakem na element. Tlak na element vytvoří elektrický náboj (měřeno v coulomb [C]) na koncových elektrodách snímače. Rychle měnící se tlak na snímači mění rychle elektrický náboj. Množství elektrického náboje za jednotku času je elektrický proud [A].

Jinými slovy při deformaci piezoelektrického elementu vzniká elektrické napětí. Tohoto efektu lze využít při zaznamenávání akustické emise, kde lze vzniklé napětí amplifikovat za pomocí předzesilovače. Následně tento signál může být dál zpracován, analyzován a ukládán jako hodnoty v osciloskopu nebo počítači. Po přepočtení a dosazení základních podmínek, které jsou dány charakterem měření, lze výsledné hodnoty vyčíslit a formulovat např. v jednotkách vzdálenosti v metrech [m], rychlosti v metr za sekundu [$m \cdot s^{-1}$], zrychlení metr za sekundu za sekundu [$m \cdot s^{-2}$], v síle signálu ve volt-sekundách [V·S], energii v joulech [J], signálu ve voltech [V] nebo jako výkon ve wattech [W]. (Miller, a další, 2005 str. 25)

Hertz

Jednotka frekvence obvykle odpovídá šířce měřeného pásma pro konkrétní aplikace. Frekvence se měří v hertzích [Hz], kde 1 Hz = 1 cyklus za sekundu.

Bel a Decibel

Výraz hlasitost odkazuje na amplitudu v slyšitelné frekvenci. Některé akustické vlny jsou slyšitelné, ostatní mají frekvence nad nebo pod slyšitelnými frekvencemi (ultrazvukové nebo podzvukové). Obvyklá jednotka pro měření amplitudy akustického signálu je decibel [dB], jedna desetina belu [B]. Decibel je četně používán v akustice a elektronice. Decibel není pevná měrná jednotka, ale spíše vyjadřuje logaritmický poměr mezi dvěma podmínkami stejného rozměru (například napětí nebo energie). V akustice, může být použit akustický tlak, například 20 μPa pro referenční úroveň 0 dB. V akustické emisi, referenční úroveň 0 $dB_{AE,}$ je definovaný jako signál 1 μV na převodník před jakýmkoli zesílením.

Základní definice decibelu je:

$$N_{db} = 10log_{10}\frac{P}{P_0} \quad (2)$$

P je měřený výkon a P_0 je referenční výkon ve wattech.

Jelikož výkon je mocninná funkce napětí, pak:

$$N_{db} = 10log_{10}\left(\frac{V}{V_0}\right)^2 = 20log_{10}\frac{V}{V_0} \quad (3)$$

V je naměřený potenciál a V_0 je referenční potenciál ve voltech. Vzhledem k tomu, že se jedná o referenční poměr hodnoty, bel a decibel nejsou součástí mezinárodního systému jednotek (SI). Existují často dvě definice pro decibel, takže napětí decibel je někdy také značen dB(V). (Miller, a další, 2005 str. 26)

1.4 Parametry měření signálu

Existuje mnoho možností, jak parametrizovat snímaný signál. Následující odstavce se jimi zabývají. Parametry úmyslně nejsou pepřekládány, jelikož v české i zahraniční literatuře, českých i zahraničních softwarech zabývající se měřením AE i v běžné praxi se tyto původní výrazy používají.

Amplitude

Amplituda značená „A“, je nejvyšší špičkové napětí dosažené průběhem AE. Je to velmi důležitý parametr, protože přímo určuje detekovatelnost události AE. Amplitudy akustické emise jsou přímo závislé na velikosti zdrojové události a liší se velikostně ve velmi širokém rozsahu od mikrovoltů po volty. Ze všech obvyklých měřených parametrů je amplituda nejvhodnější parametr pro interpretaci vývoje statistických informací např. v odečítání charakteru harmonické funkce. Amplitudy akustických emisí jsou obvykle vyjádřeny v decibelové (logaritmické) stupnici, ve které 1 μV v převodníku je definován jako $0dB_{ae}$, 10 μV je $20dB_{ae}$, 100 μV je $40dB_{ae}$ a tak dále. (Lamet, 1997 str. 607)

Counts

V překladu počty jsou impulzy překračující určitý definovaný práh značený „C“. Tento způsob zkoumání počtu různě silných impulzů je jeden z nejstarších a nejjednodušších způsobů kvantifikace signálu AE. Počty impulzů závisí na velikosti zdrojové události, ale také silně závisí na akustických vlastnostech, kvalitě signálu a odstupu snímače od šumu. (Lamet, 1997 str. 607)

Marse

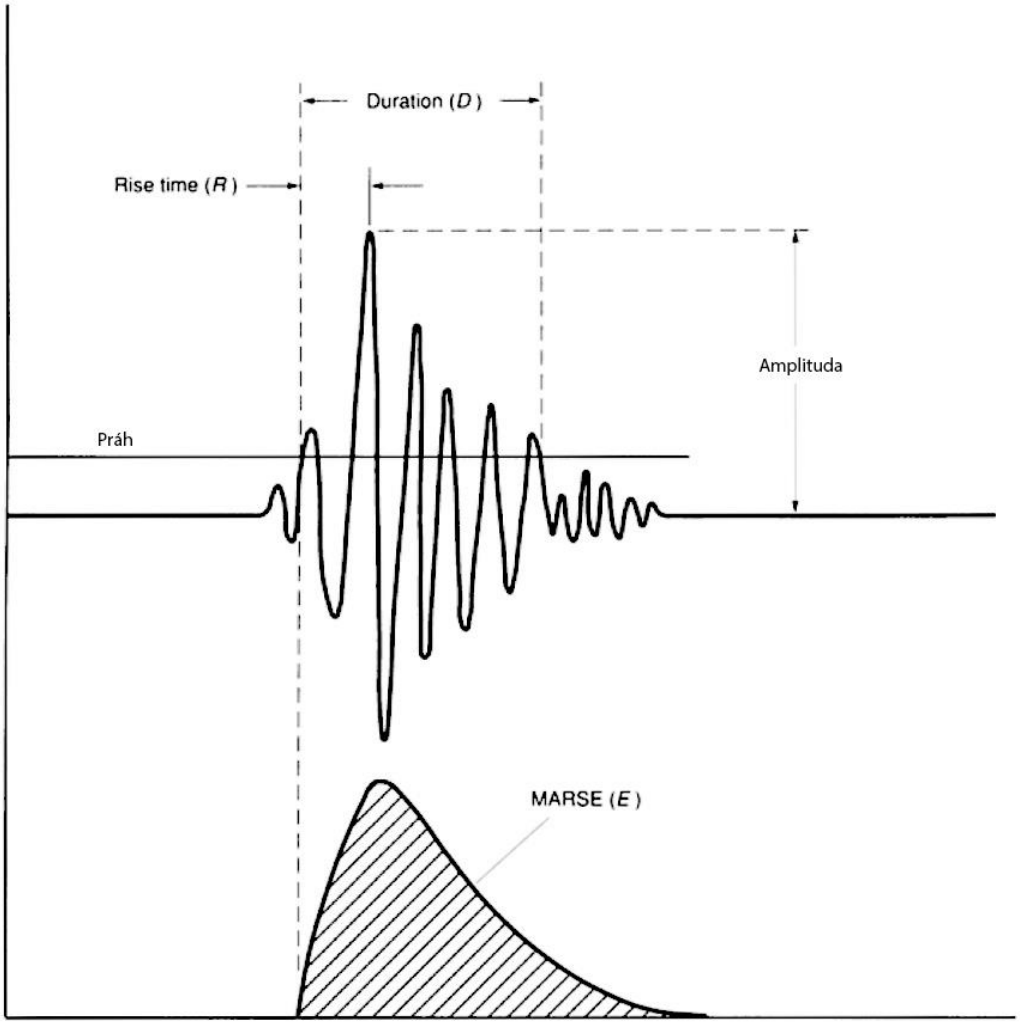
Je někdy označován jako energetická hodnota značená „E“. Je to měřená oblast pod obálkou rektifikovaných signálů. Jako míra velikosti signálu AE metoda charakteristiky signálu Marse byla přijata a v mnoha případech nahrazuje counts, i když požadované vstupní informace jsou poměrně obsáhlé. MARSE je v praxi preferován před counts, protože je citlivý na amplitudu a stejně jako duration je méně závislý na nastavení prahových hodnot a na provozní frekvenci. Na rozdíl od counts, kde se počítá s množstvím hodnot překračujících určitou mez, marse počítá s individuální velikostí jednotlivých impulzů v signálu. Ze všech naměřených parametrů je marse nejvhodnější pro tento účel měření. (Lamet, 1997 str. 607)

Duration

V překladu délka trvání signálu značená „D“ je uplynulá doba od začátku prvního prahu signálu k poslednímu. Tento způsob interpretace signálu je závislý na čase a měřen např. v mikrosekundách, tento parametr závisí na velikosti zdroje, akustice struktury měřeného vzorku a dozvuku. Je to velmi užitečné pro rozpoznání určitých dlouhodobých parametrů, jako je delaminace v kompozitních materiálech. Může být vhodný pro filtrování šumu a dalších typů signálů. (Lamet, 1997 str. 607)

Rise time

Je parametr popisující dobu nárůstu signálu značenou „R“. Je to doba, která uplynula od prvního překročení prahu až do maximální hodnoty signálu. Obecně je ovlivněn vlastnostmi šíření vln mezi zdrojem AE a snímačem, tento parametr lze použít pro několik typů kvalifikace signálu a odstranění šumu. (Lamet, 1997 str. 607)



Obr. 5 – Popis parametrů signálu (Lamet, 1997 str. 606)

Multikanálové měření

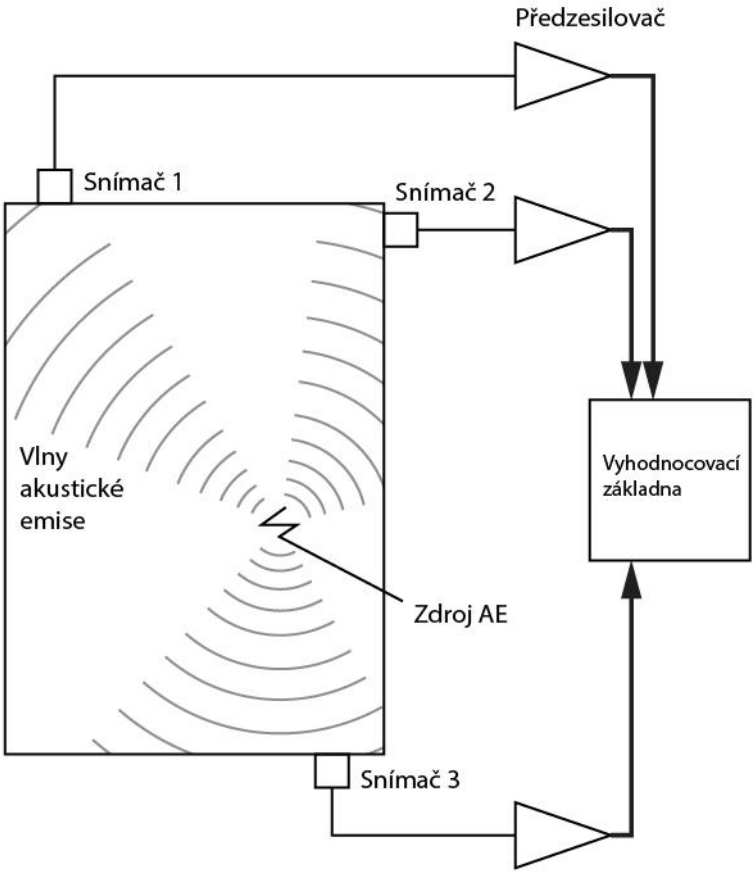
Měření signálu probíhá současně na každém kanálu, který detekuje vlny AE. Systémy akustických emisí jsou k dispozici ve velikostech od jednoho kanálu do více než sta kanálů v závislosti na velikosti a složitosti testované konstrukce. Typické laboratorní systémy mají 2 až 6 kanálů, zatímco většina strukturálních testů je prováděna s 12 až 32 kanály. Jednotlivé události AE může zachytit pouze jeden kanál nebo může být využito svázanosti napříč různými kanály. Záleží na síle události, útlumu vlny, na struktuře materiálu a vzdálenosti snímačů.

Z toho důvodu je hlavní úlohou vícekanálového systému určit, zda skupina blízkých impulzů (hitů) na různých kanálech pochází ze stejného zdroje události. V závislosti na konstrukci systému lze toto provést buď hardwarově, nebo softwarově. Druhé, třetí a pozdější hity ze zdrojové události mohou být uchovány buď pro účely umístění zdroje, nebo vyřazeny pro snazší čitelnost. Po této úpravě je proveden úkol identifikace události; systém se může zabývat popisy událostí i popisy samostatných impulzů. (Lamet, 1997 str. 607)

Popis události obvykle zahrnuje identifikaci kanálu, informace o relativním časování pro všechny zúčastněné kanály a signálové charakteristiky prvního impulsu spolu s dalšími následnými impulsy. Protokol popisu úkolu (nebo události) je předán řídícím počítačem, který koordinuje úlohy zobrazení, ukládání dat a komunikuje s operátorem. Ve větších systémech mohou být tyto úkoly rozděleny mezi několik počítačů. V mnoha systémech je celý tok charakteristiky impulsů uložen na disk, což poskytuje neomezené možnosti analýzy prováděné po testování. Úplné ukládání dat je důležitým aspektem aplikované technologie AE.

Zobrazení dat systémem AE je zejména založené na softwaru, který může vytvářet mnoho typů grafických ukazatelů. Provozovatel se neomezuje na to, co lze pozorovat během testu, protože výsledky mohou být během analýzy po průběhu testu vylepšeny, filtrovány a znovu zobrazeny.

Zobrazení může být vytvořeno několika grafickými způsoby, nejen během samotného měření v reálném čase, ale i zpětně při podrobnější analýze naměřených dat. Obecně naměřená data AE lze vyobrazit jako sled časově seřazených za sebou jdoucích grafů, které popisují průběh měření. Dále lze vyobrazit různé distribuční a statistické funkce v závislosti na samostatných měřených kanálech i celku multikanálového měření, charakteru prostředí a způsobu vzniku signálu. (Lamet, 1997 str. 607)



Obr. 6 – Schématické znázornění multikanálového měření (zdroj: autor)

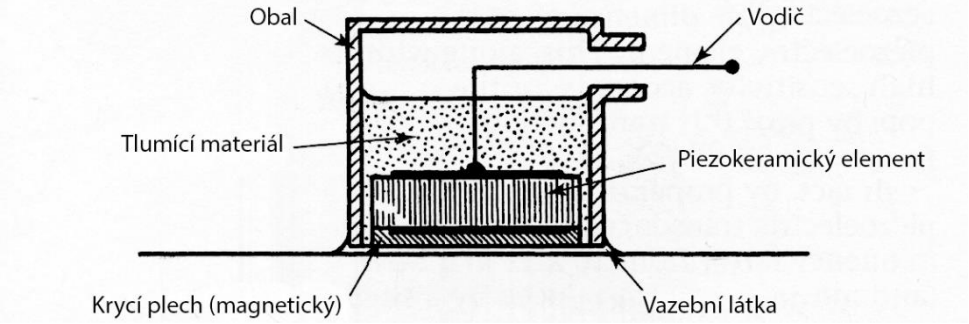
1.5 Potřebné zařízení pro AE

Zařízení pro zpracování signálu akustické emise je k dispozici v různých podobách od malých přenosných přístrojů po velké vícekanálové systémy. Součásti společné pro všechny systémy jsou: snímače, filtry a zesilovače předzesilovačů, které umožňují měření signálu. Techniky, které se používají pro měření, zobrazení a ukládání se liší v různých postupech měření. Obrázek 1 ukazuje blokové schéma obecného měření akustické emise. (Miller, a další, 2005 str. 34)

Převodníky – snímače AE

Prvním krokem v procesu měření AE je přeměna mechanické energie elastické vlny na elektrickou energii. Ideální převodník by měl poskytovat výstupní napětí, které by bylo přímo úměrné urychlení posunu dislokací, rychlosti nebo zrychlení v bodě měření. Tento ideální snímač by pracoval v celém kmitočtovém spektru, aniž by došlo ke vzniku šumu signálu a bez narušení pohybu pružné vlny. Ve skutečnosti takové zařízení neexistuje. Všechny existující snímače mají omezenou šířku pásma, ve kterém se může lišit jejich citlivost. Skutečné senzory mohou také reagovat na různé kombinace citlivostí v různých oblastech frekvenčního spektra. Kromě toho mají reálné měniče typicky malou kontaktní plochu, nad kterou je přijímaný signál integrován. Protože se obvykle dotýkají povrchu, mohou skutečné senzory samotným snímáním rušit měřený signál a zavést do něj šum. Výběr kombinace snímače AE, společného fyzického měřícího zařízení a zvukovodu mezi nimi, by měl být ovlivněn tím, aby dosáhl co nejvyšší kvality měření pro specifický charakter způsobu měření. (Shull, 2002 str. 395)

Převodníky používané pro zkoušky akustické emise se často podobají konfigurací zařízením pro ultrazvukové zkoušení materiálu a obecně používají piezoelektrický snímač jako elektromechanické zařízení pro konverzi mechanické energie na elektrickou. Převodníky mohou být rezonanční nebo širokopásmové. Hlavními hledisky výběru snímačů jsou provozní frekvence, citlivost a environmentální a fyzikální vlastnosti. Při vysokoteplotních zkouškách lze zvukovody použít k izolaci snímače od prostředí. Jedná se o vhodnou alternativu k převodníkům s vysokou teplotou. Problémy týkající se typu signálu a jeho směru se obtížně řeší. AE se přirozeně šíří napříč celou hmotou materiálu různými směry, přirozeně se vyskytující akustická emise obsahuje složitou směs vlnových režimů. (Miller, a další, 2005 str. 35)



Obr. 7 – Schéma piezoelektrického snímače akustické emise (Miller, a další, 2005 str. 52)

Obr. 8 – Snímač typu MDK-13 s dotykovou plochou z permanentního magnetu. Snímač od firmy Dakel zakončený BNC konektorem,

(zdroj: https://www.dakel.cz/prod/sens/pict/mdk13-2.jpg, [*2020. 07. 14*])

Předzesilovače

Předzesilovače slouží k zesílení signálu a k přizpůsobení vysoké impedance piezoelektrického snímače. Záznamové zařízení má poměrně nízkou vstupní impedanci. Navíc při koaxiálních vedeních delších než asi 2 m je nutné použít předzesilovač, aby nedošlo k zeslabení signálu vlivem kapacity kabelu a impedančního nepřizpůsobení.

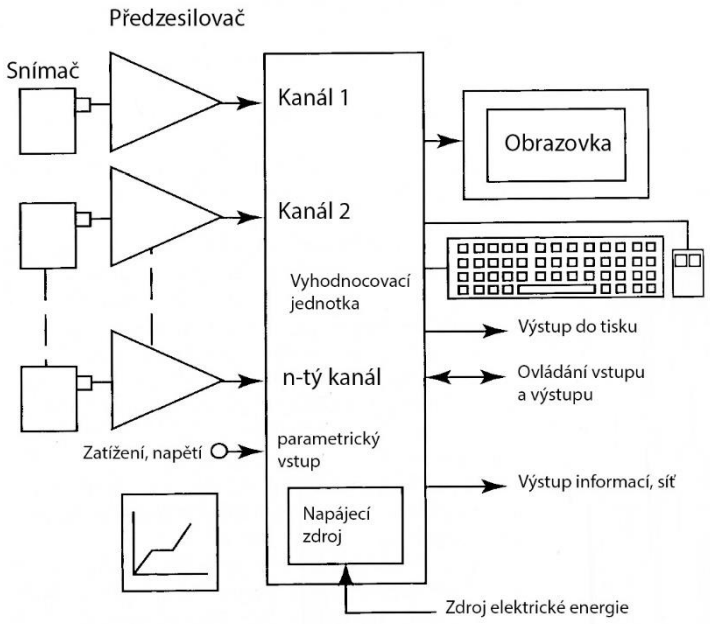
Předzesilovač musí být umístěn v blízkosti snímače. Často je ve skutečnosti zabudován do samotného obalu snímače. Předzesilovač zajišťuje filtrování snímaných frekvencí, zisk signálu je nejčastěji 40 dB, a je sériově připojený kabelem k měniči. Předzesilovač je primárním prostředkem pro selekci monitorované frekvence pro test akustické emise. Následně může být signál upraven a dále filtrován v počítači. Výběr monitorovací frekvence záleží na charakteru měření a je závislý na vhodné volbě operátora měřícího zařízení. Akustická emise je v podstatě širokopásmový zdroj mechanického vlnění. Zaznamenané frekvence se pohybují od slyšitelných frekvencí řádově desítek Herz až po 50 MHz. Sledované frekvenční pásmo signálů akustické emise je významně ovlivněno rezonanční a přenosovou charakteristikou testovaného objektu (geometrie i akustické vlastnosti) a charakteristika měniče. V praxi je limit spodní frekvence řízen šumem pozadí, nejčastěji se neměří pod 10 kHz s výjimkou mikroseismických úloh. Horní frekvenční limit je řízen útlumem vlny, omezuje užitečný rozsah detekce a většinou se neměří výše než 1 MHz. Nejběžnější frekvenční rozsah testování akustické emise je 100 až 300 kHz. (Miller, a další, 2005 str. 35)

Obr. 9 – Předzesilovače (zdroj: autor)

Registrační základna

Hlavní zesilovače, které jsou prvními prvky v počítači, a prahové hodnoty měření jsou nastaveny tak, aby určovaly citlivost testu. Hlavní zesilovače jsou nejčastěji používány v rozmezí zisku signálu od 20 do 60 dB. Výsledky měření se odvíjí od velikosti a pořizovací ceny registrační základny. V malém přenosném přístroji mohou být akustické emisní signály jednoduše zapsány, využívají se zde prahové přechody a počítání signálu je dále převedeno na analogové napětí pro vykreslení na obrazovku. Jedná se o obdobu osciloskopu. V pokročilejších hardwarových systémech může být proveden rozbor charakteristiky signálu z měření, např. množství energie, amplitudy, frekvence a prostorových lokalizací emisní události v závislosti na čase. Registrační základna dále může automaticky upozorňovat na výskyt hledaného signálu a porovnat ho se signály z interních knihoven výrobce zařízení. (Miller, a další, 2005 str. 35)

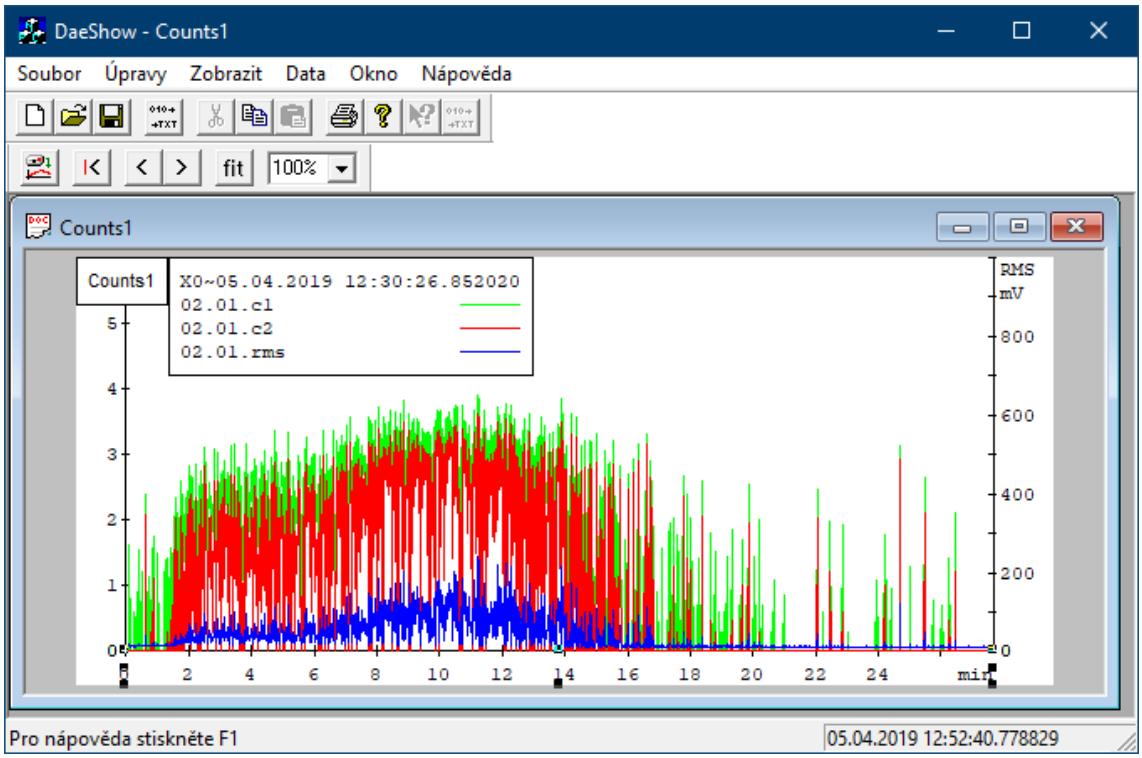
Obr. 10 – Tříkanálová jednotka pro detekci akustické emise (zdroj: autor)



Obr. 11 – Schéma zapojení všech částí pro měření AE (Miller, a další, 2005 str. 150)

Zpracování a zobrazení signálů

Téměř všechny systémy pro akustickou emisi používají počítače v různých konfiguracích, které jsou určeny velikostí systému a požadavky na výkon. V typických implementacích se každý akustický emisní signál měří pomocí hardwarových obvodů a naměřené parametry jsou předávány centrálním počítačem do diskového souboru charakteristik signálů. Obvyklá charakteristika signálu zahrnuje impulsy signálů, rychlost přenosu, amplitudu, trvání, čas náběhu a často i energii signálu spolu s jeho časem výskytu a hodnotami pomalu se měnících proměnných, jako je zatížení a hladina hluku pozadí. Během záznamu dat nebo po něm systém extrahuje data pro grafické zobrazení a zprávy o tisku. Společné zobrazování dat AE a dat z průběhu zatěžování lze sjednotit do časově seřazených grafů. Je možno využívat různé statistické a matematické funkce jako sumy energií, trendové a distribuční funkce, porovnávání signálu vůči jiným, jejich vzájemné prolnutí nebo superpozici. Systémy pracující s lokalizací emisní události mají velikost obvykle od 4 do 128 kanálů. (Miller, a další, 2005 str. 35)



Obr. 12 – Ukázka grafu v programu DeaShow (zdroj: autor)

1.6 Interpretace signálu a její charakteristiky

Účel charakterizace signálu

Cílem testu akustické emise je zjistit zdroje emisí a poskytnout o nich co nejvíce informací. Technologie detekce a lokalizace zdrojů je dobře zavedená. Signály akustických emisí mohou poskytnout mnoho informací také o zdroji akustických emisí informace o testovaném materiálu a jeho struktuře. Účelem charakterizace zdroje je použít výstupní signál na koncových svorkách snímače k identifikaci zdrojů AE a vyhodnocení jejich významu. Existuje tedy kvalitativní (zdrojová identifikace) a kvantitativní (zdrojová intenzita nebo závažnost) aspekt charakterizace. (Miller, a další, 2005 str. 45)

Interpretace dat

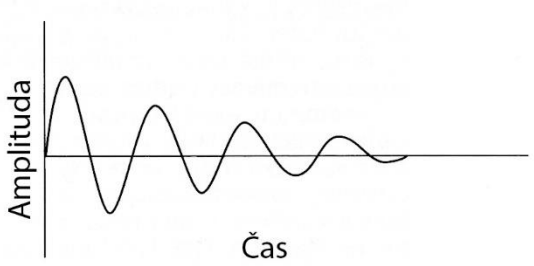
V mnoha oblastech měření výkyvu elektromagnetického nebo akustického pole v závislosti na čase. Se popisují tyto výkyvy matematicky mohou být popsány např. jako řešení určitých parciálních diferenciálních rovnic (Byrne, 2015 str. 138)

Křivka signálu a její průběh je ovlivněn: charakteristikami zdroje AE, druhem prostředí a materiálu, charakteristikami měniče a měřicím systémem. Obecně naměřené impulsy mohou být chaotické a jejich použití k charakterizaci zdroje může být obtížné. Informace jsou získávány mnoha technikami od základních měření parametrů kmitočtu k obsáhlým metodám, které jsou řešené za pomoci umělé inteligence (rozpoznávání vzoru). První z nich často postačují pro jednoduchou interpretaci např. k predikci závady mechanických částí strojů. Ty mohou být požadovány pro on-line sledování složitých systémů. Kromě charakteristik samotných průběhů jsou k dispozici informace o kumulativních charakteristikách signálů (včetně distribuce amplitudy a celkového počtu detekovaných signálů). Je možné parametrizovat rychlost příchodu signálu nebo energie

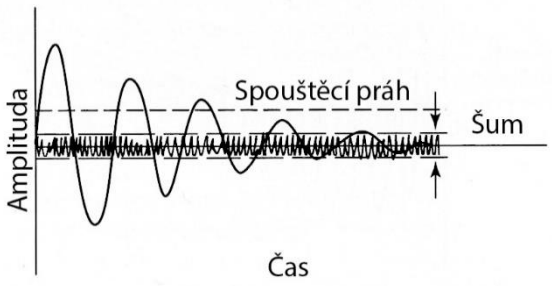
přijatou snímačem. Existuje tedy několik možností pro charakterizaci zdroje akustické emise. Pro každou aplikaci musí být stanoven vhodný přístup. (Miller, a další, 2005 str. 45)

Charakteristiky události akustické emise

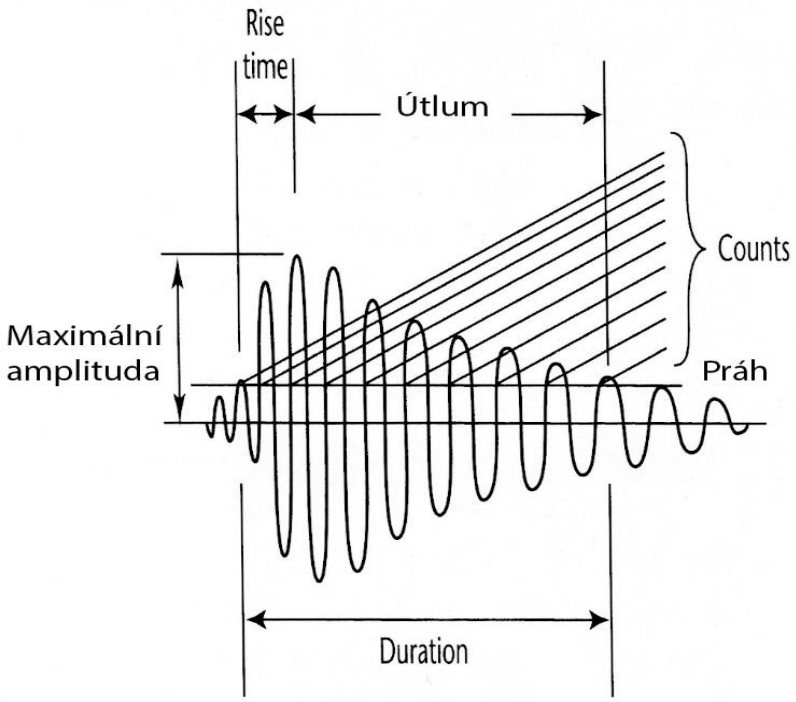
Akustické emise typu „burst“ (impulsy začínající maximální hodnotou amplitudy) lze popsat poměrně jednoduchými parametry. Amplituda signálu je krátká několik mikrosekund až několik milisekund a je mnohem vyšší než šum v pozadí. Výskyty jednotlivých impulsů jsou znatelně odděleny časovými intervaly. Tlumený sinusoid z (obr. 4A), se často používá k reprezentaci náhlého počátečního nárůstu akustické emise. Monitorování akustických emisí se obvykle provádí za přítomnosti kontinuálního hluku v pozadí. Úroveň detekce spouštěcího prahu je nad úrovní šumu v pozadí (obr. 4B) a slouží jako referenční bod od nějž již je signál čitelný. Pomocí tohoto modelu lze identifikovat parametry křivky na obr. 4C. Jednotlivé způsoby interpretace křivek byly popsány v kapitole 1.3 Parametry měření signálu. (Miller, a další, 2005 str. 46)



Obr. 13 – Idealizované znázornění akustické skupiny signálů. (Miller, a další, 2005 str. 45)



Obr. 14 – Nastavení prahové hodnoty, aby se zabránilo spouštění plynulým hlukem pozadí. (Miller, a další, 2005 str. 45)



Obr. 15 – Definice parametrů jednoduchých průběhů AE

(Miller, a další, 2005 str. 45 a 46)

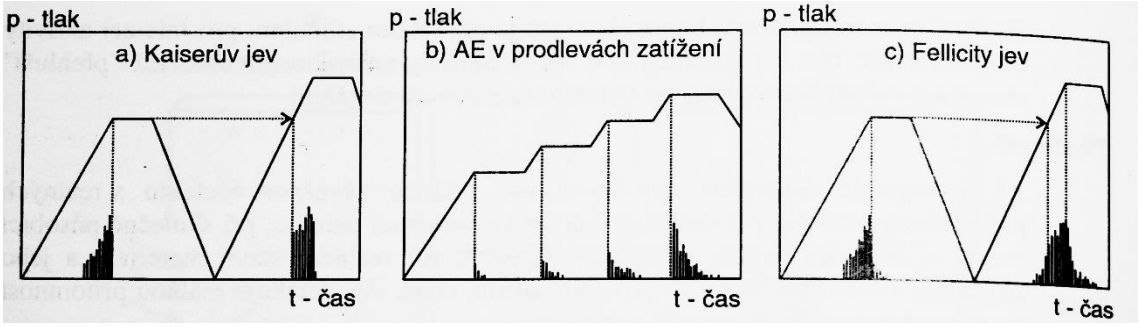
1.7 Kaiserův jev

Josef Kaiser je považován za zakladatele moderní technologie měření akustické emise a jeho průkopnická práce v Německu v padesátých letech 20. století vyvolala začátek následného vývoje této metodiky. Zabýval se dvěma hlavními objevy. První byla téměř univerzálnost fenoménu akustické emise. Pozoroval emisi ve všech materiálech, které studoval. Druhým byl účinek, který nese jeho jméno. V překladu vlastních slov: „Zkoušky na různých materiálech (kovy, dřevo nebo minerální materiály) ukázaly, že nízké úrovně emisí začínají i při nejnižších úrovních napětí (méně než 1 MPa nebo 100 $lb_f \cdot in^{-2}$) trvající až do porušení lomem, ale pouze v případě, že materiál dosud nebyl zatížen.“ Tento jev má zvláštní význam pro měření akustické emise, protože při měření emisí během zatěžování je možné vyvodit jasný závěr o velikosti maximálního zatížení, které zkušební materiál dosáhl před zkouškou. Velikost a doba trvání dřívějšího zatížení, doba mezi dřívějším zatížením a zatěžovacím testem, nemají žádný význam. Tento účinek přilákal pozornost pracovníků v oblasti akustické emise. Ve skutečnosti všechny roky dalšího výzkumu akustické emise nepřinesly žádný nový objev srovnatelného významu. V průběhu času byly identifikovány obě praktické aplikace a kontroverzní výjimky z pravidel. Důležitá vlastnost ovlivňující AE je ve většině případů nezvratnost tohoto jevu u většiny kovových materiálů. V praxi to znamená, že pokud byl materiál již jednou zatížen na určitou hodnotu zatížení a následně odlehčen, následná AE při dalším zatížením nebude znatelná, dokud zatížení nepřekročí hodnotu zatížení z předchozího zatěžování. (Miller, a další, 2005 str. 37)

Felicity jev

Tento jev narušuje obecnou platnost Kaiserova jevu, tzn. jev, kdy k AE v následném cyklu zatížení dochází již na nižších úrovních, než odpovídá zatížení maxima z předchozího cyklu zatížení (jak by k tomu dle platnosti Kaiserova jevu mělo docházet).

Další doznívání AE v prodlevě či výskyt Fellicity jevu svědčí o omezené schopnosti materiálové mřížky vlastním zpevněním stabilizovat a zastavit další rozvoj deformace či porušení. (Kopec, 2008 str. 456)



Obr. 16 – Tři základní projevy aktivity akustické emise. Různé jevy vzhledem k režimu zatížení (Kopec, 2008 str. 456)

1.8 Kalibrace AE

Širokou škálu struktur materiálů (kovy, nekovy a jejich různé kombinace) lze sledovat způsoby monitorování AE při aplikaci vnějšího zatěžování. Základní mechanismy pro měření AE se liší napříč různými materiály a měly by být kalibrovány na nový typ materiálu před počátkem měření. Přístroj musí být správně zkalibrován, aby měření AE v různých strukturách materiálů byly směrodatné. Zároveň se musí zjistit schopnost testovaného materiálu vést zvuk, podle níž je nutné nastavit adekvátní citlivost snímače. (Miller, a další, 2005 str. 33)

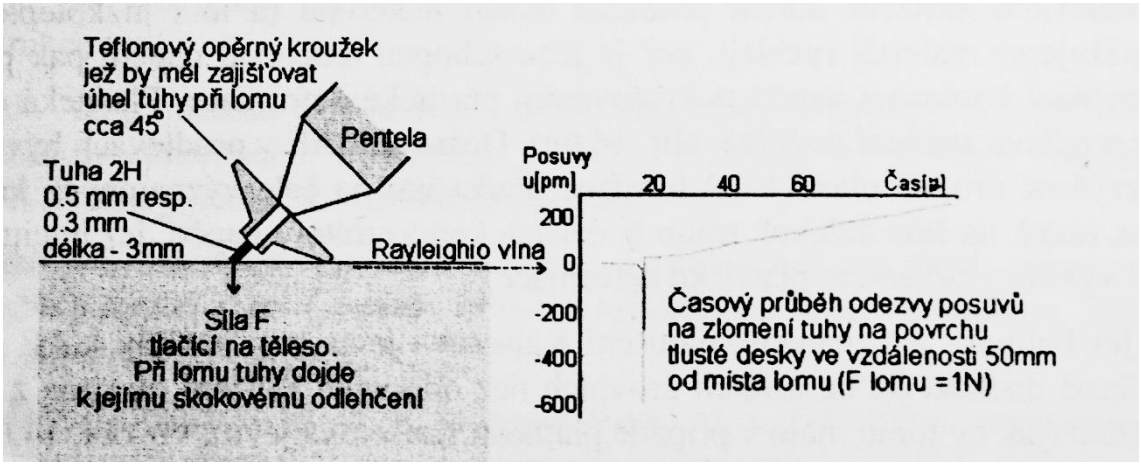
Kalibrace senzorů AE metodou reciprocity

Základním principem kalibrace za pomocí reciprocity – vzájemné kalibrace je použití tří nezkalibrovaných snímačů, které se postupně používají jako emitor a snímač. Musí být umístěné na homogenním materiálu stálé tloušťky do jedné řady a mít od sebe stejnou vzdálenost. Postupně se každý ze snímačů budí přes měřící stanici – dodá se do něj zdroj nízkého elektrického napětí a zbylé dva snímače zaznamenávají intenzitu přijatého signálu. Tento postup se opakuje u zbylých snímačů. Naměřené hodnoty se poměří a případně se individuálně pozmění citlivost jednotlivých snímačů na měřící stanici, aby každý snímač byl stejně citlivý. (Monnier, a další, 2012 str. 153)

Pen test

S tímto testem je každý v oboru AE obeznámen, neboť tento test představuje základní zdroj AE, se kterým se v oboru AE každý setkává. Pen Test představuje okamžité skokové odlehčení síly kolmo působící na povrch desky. Prvotní kladná vlastnost Pen testu je uvolnění většího množství energie ve formě AE s charakteristikou krátkého ostrého impulsu v trvání řádově méně než 10^{-2} μs. Tzn. Pen test generuje ostrý impuls AE s rovnoměrně zastoupenými frekvencemi do cca desítek MHz.

Pen Test či lom kapiláry, skokové odlehčení kolmé axiální síly k povrchu, je využíváno k prvotní kalibraci. Jak k relativní kalibraci snímačů, tak i k absolutní kalibraci vzhledem ke konstrukci a materiálu testovaného tělesa. (Kopec, 2008 str. 456)



Obr. 17 – Pen test Hsu-Nielsenův zdroj AE lom tuhy mikrotužky (Kopec, 2008 str. 456)

2 Oblasti využití AE

2.1 Srovnání s jinými technikami

Zkoušky založené na akustické emisi se liší od většiny ostatních nedestruktivních metod ve dvou významných ohledech. První ohled spočívá v tom, že na rozdíl od ostatních nedestruktivních defektoskopických metod, např. ultrazvukového testování, radiografických nebo magnetické metody, je do zkoumaného vzorku dodávána energie. Za to metoda zkoumání akustické emise zkoumá přítomnost uvolňované energie, např. z plastické deformace nebo úniků látek z daného prostředí (testování tlakových nádob).

Za druhé metoda akustické emise může detekovat dynamické procesy spojené s degradací strukturální integrity. Růst trhlin a plastická deformace jsou hlavními zdroji akustických emisí. Latentní nespojitosti, které se zvětšují pod zatížením a jsou aktivními zdroji akustické emise na základě jejich velikosti, umístění nebo orientace, jsou velmi významné z hlediska pozorování změn strukturální integrity měřeného vzorku.

Obvykle se některé naměřené signály objevují daleko dříve, než dojde k defektu zkoumaného vzorku, např. při tahových zkouškách ocelí. Tyto nalezené signály mohou pomoci lokalizovat začínající trhlinu.

Kovové materiály mohou být namáhány značně pod mez plasticity, ale v důsledku vysokých lokálních napětí může docházet k plastické deformaci. V této situaci funguje diskontinuita a působí jako zdroj napěťových vln a stává se zdrojem AE. Testování za pomocí metody AE je nepřesné. Většina signálu AE pochází z bodových zdrojů AE, které vyzařují energii ve sférických vlnových frontách. Čidla, která se nachází kdekoli v blízkosti zdrojů AE umístěné na ploše měřené součásti, mohou přes specifický software lokalizovat zdroj AE v reálném čase. Tato schopnost je v rozporu s jinými metodami nedestruktivního testování, které závisí na předchozí znalosti pravděpodobného umístění a orientace nespojitosti a směru energie dráhy. (Miller, a další, 2005 str. 34)

2.2 Výhody zkoušek akustické emise

Metoda akustické emise nabízí následující výhody oproti jiným metodám nedestruktivních zkoušek.

1. Zkouška AE je dynamická zkušební metoda v tom, že poskytuje odezvu na růst nespojitosti uložených strukturálních, napěťových a statických nespojitostí v reálném čase.

2. Akustické emisní testování může detekovat a vyhodnotit významné nespojitosti v celé struktuře během jediného testu.

3. Měření může probíhat ve ztížených podmínkách, např. v malých prostorách, a není potřeba přímý dohled operátora nad průběhem měření. Mohou být také zjištěny nespojitosti, které jsou pro jiné metody nepřístupné.

4. Snímače AE mohou být umístěny i několik metrů od zdroje AE. Jak délka vodiče od snímače k registrační základně, tak i samotné umístnění snímače na konstrukčních částech zkoumaných oblastí nemusí být v přímém kontaktu se zdrojem AE, např. u testování tlakových potrubí je možné zjistit prasklinu a lokalizovat ji i na několik metrů daleko od snímače.

5. Plavidla a jiné tlakové systémy mohou být často rekvalifikovány, např. během vykládky převáženého materiálu, nebo napouštění cisteren. Toto měření není časově náročné.

6. Metoda akustické emise může být použita k prevenci katastrofického selhání systémů s neznámými nespojitostmi. Např. při online monitorování výškových budov a mostů. (Miller, a další, 2005)(Lamet, 1997) (Shull, 2002) (Kopec, 2008)

3 Použití AE v průmyslu

3.1 Testování kompozitů

Mezi nejčastější poškození u kompozitů s vyztuženými vlákny patří prasknutí nosného materiálu. (Sause, 2013 str. 7)

Monitorování AE u materiálů zesílených vlákny napříč základním materiálem je efektivnější ve srovnání s jinými nedestruktivními zkušebními metodami. Zeslabení signálů AE zapříčiněné heterogenní charakteristikou představuje specifické problémy. Efektivní sledování AE u kompozitů vyžaduje mnohem kratší vzdálenosti měniče od zdroje AE z důvodu zhoršené prostupnosti AE napříč kompozitem oproti kovovým materiálům podobné velikosti a konfigurace.

Se správným počtem a umístěním snímačů se ukázalo, že je tato metoda vhodná ke sledování kompozitních konstrukcí, pro detekci a lokalizaci oblastí delaminací prasklin a jiných strukturních degradací. (Miller, a další, 2005 str. 34)

3.2 Testování produkce v průmyslové výrobě

Výrobní automatizované linky jsou vlivem provozu a stáří opotřebovávány. Toto opotřebení může být zapříčiněno také přetížením výrobního stroje, špatným mazáním, vysokou teplotou, korozí, chybnou údržbou nebo únavou materiálu. Při online sledování AE u strojů při automatizované výrobě se sleduje jejich běžný provozní stav. Změna AE může poukázat na blížící se závadu a tím upozornit obsluhu stroje k podrobnější diagnostice stavu stroje a předejít závadě, která by např. mohla způsobit pozastavení výroby, a tím i snížení zisku firmy. (Miller, a další, 2005 str. 243)

Testování výroby může být často provedeno se základním univerzálním měřícím zařízením, které jednoduše měří hodnoty counts nebo marse a varuje, když AE překročí předem stanovenou hodnotu. Automatická kontrola senzoru v testovaném zařízení může být začleněna do konstrukce takového přístroje a být jeho součástí. (Lamet, 1997 str. 610)

3.3 Sledování svařovacích procesů

Moderní svařovací stanice mají integrovaný řídící software, který koriguje svařovací parametry (velikost proudu a napětí, frekvenci pulzačního zdroje…). Výstup z řídící jednotky svařovací stanice lze spojit s výstupem z vyhodnocovací základny AE. Základna AE může mít naprogramované algoritmy na automatické rozpoznávání vzorů a klasifikaci druhů svarů. Zároveň s informací ze svařovací stanice tyto výstupy porovná v reálném čase a upozorní operátora na případnou chybu svařovacího procesu např. propálení základního materiálu. (Lamet, 1997 str. 610)

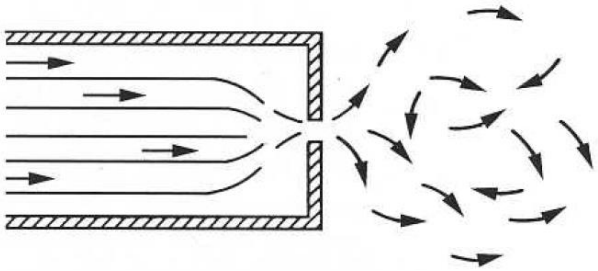
Šum během měření AE během svařování může být způsoben několika faktory. Prvním je zdroj elektrické energie, když je svářecí stanice připojena do stejné elektrické sítě jako měřící jednotka AE. Ta kvůli velkému skokovému odběru elektrické energie může rušit citlivá zařízení uvnitř jednotky měřící AE. Toto rušení lze odfiltrovat k tomu určenými zařízeními obsahujícími kondenzátory nebo stanici AE oddělit od sítě provozem na baterii. Další rušení může pocházet od zemnící svorky svařovací stanice, která byla připojena ke stejnému zemnícími vodiči jako stanice AE.

Při svařování za pomocí střídavého napětí poblíž snímačů nebo vodičů propojujících snímače s měřící jednotkou může část elektromagnetického pole vytvořeného svařovací

stanicí indukovat elektrické napětí na kovový obal snímačů nebo samotných vodičů, a tím vnést falešné signály a šum, které by byly chybně označované jako zdroj AE a znehodnotily tak měření. (Miller, a další, 2005 str. 42)

3.4 Testování netěsností

Měření úniků kapalin a netěsností za pomocí akustické emise je relativně jednoduchá aplikace. Testování netěsností může být provedeno pomocí jednodušších přístrojů měřících pouze hodnoty „marse“ během kontinuálního měření netěsností během tlakových zkoušek. Metoda měření AE má výhodu ve velikosti snímačů, které jsou snadno přemístitelné. Dají se tedy dobře využít pro měření těsnosti dlouhých komplikovaných potrubí a velkých tanků. I sebemenší díra na obalu tlakového systému způsobí při úniku média turbulentní proudění, které je detekovatelné metodou měření AE. (Lamet, 1997 str. 610)



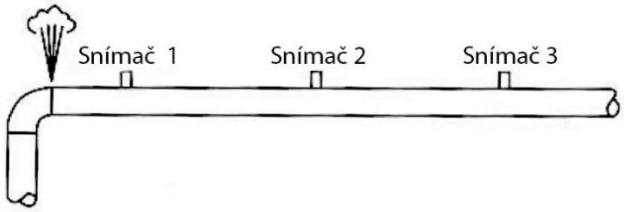
Obr. 18 – Turbulentní proudění kapaliny skrz netěsnost. (Miller, a další, 2005 str. 183)

Měření může probíhat přes snímače umístěné na obalové ploše tlakového systému nebo za pomocí ultrazvukové jednotky, kdy operátor má speciální mikrofon obsahující zesilovač, který převádí ultrazvukové vlny z unikajícího média na pro člověka slyšitelný zvuk do sluchátek operátora, který s tímto zařízením obchází měřený objekt. (Miller a další, 2005 str. 183)

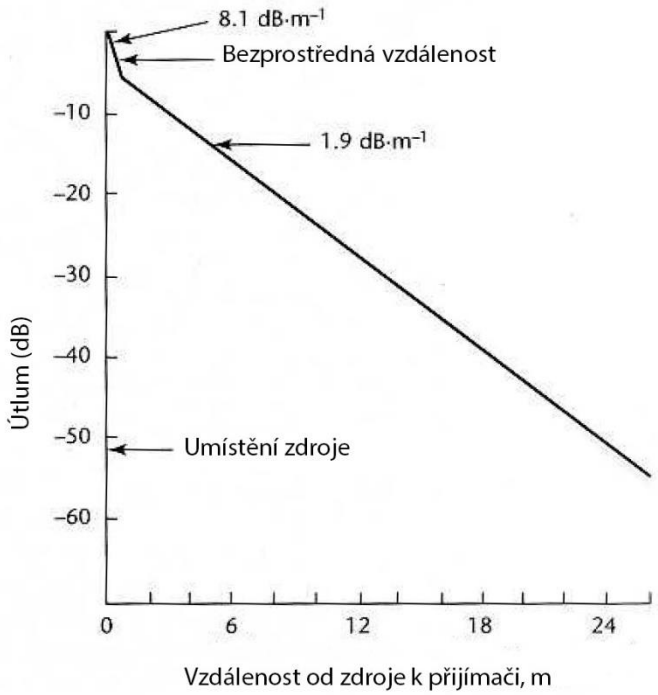
Obr. 19 – Zařízení pro ultrazvukové měření netěsností. Zdroj: https://www.pce-instruments.com/english/slot/2/artimg/large/pce-instruments-ultrasonic-tester-leak-detector-pce-ldc-10-5845549_1044981.jpg*; [2020. 07. 14]*

Aktivní AE je způsobena generováním akustických vln, které vychází z charakteru turbulentního proudění. Turbulentní proudění může vzniknout únikem média z prostředí o vysokém tlaku do prostředí o tlaku nízkém. Dále může vzniknout obtékáním pevných látek, hran či změnou průřezu trubek ve kterých médium proudí. (Miller, a další, 2005 str. 183)

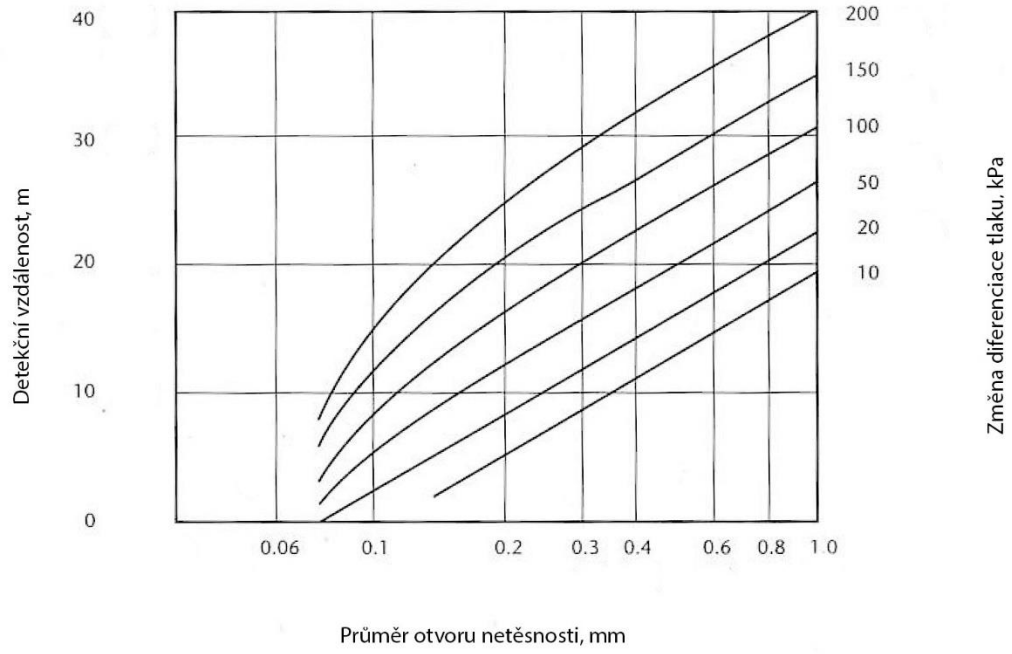
Akustická emise způsobená těmito turbulencemi unikajícího média je detekovatelná i na větší vzdálenost netěsnosti od snímače. *(Miller, a další, 2005 str. 123)*



Obr. 20 – Vizualizace netěsnosti potrubí při multikanálovém měření. (Miller, a další, 2005 str. 123)



Obr. 21 – Znázornění útlumu akustické emise u ocelové trubky průměru 150 mm. (Miller, a další, 2005 str. 123)



Obr 22– Znázornění závislosti detekovatelnosti přenosu zvuku vzduchem na základě vzdálenosti od snímače, průměru díry a rozdílu tlaků. (Miller, a další, 2005 str. 184)

Pasivní akustická emise způsobená únikem média je charakterizována laminárním prouděním vytékajícího média ven z tlakového systému. Laminární proudění neprodukuje žádnou AE. Pasivní únik přesto může být detekován za pomocí generátoru umělých ultrazvukových vln, který vyzařuje signál napříč médiem. Tento specifický ultrazvukový tón může být detekován v místě úniků, protože samotné médium se stane nosičem zvukových vln. (Miller, a další, 2005 str. 183)

4 Tepelné zpracování

Tepelné zpracování je obecný termín, který pokrývá řadu procesů používaných ke zlepšení odolnosti proti opotřebení ocelových materiálů. Kombinace velmi tvrdého povrchu a houževnatého jádra, umožněná různými metodami vytvrzování, má v moderním strojírenském průmyslu neocenitelnou hodnotu. Použitím vysoce kvalitních legovaných ocelí lze velkou pevnost a houževnatost v jádře kombinovat s extrémní povrchovou tvrdostí, což má za následek kompozitní strukturu schopnou vydržet určité druhy namáhání. Pro méně náročné požadavky existuje mnoho různých druhů aplikací zlepšujících mechanické vlastnosti, kde lze dosáhnout různé houževnatosti jádra spolu s vysokým stupněm tvrdosti povrchu i s levně vyrobenou uhlíkovou ocelí. Tři z hlavních typů úpravy, které se běžně používají pro zvýšení odolnosti proti opotřebení povrchu, jsou klasifikovány jako termochemické, tepelné, povlakování nebo pokovování. Příklady termochemických úprav zahrnují cementování, nitridaci a nitrocementování. Procesy povlakování nebo pokovování zahrnují tvrdé chromování, elektrolytické pokovování niklem a různé způsoby vytvrzování. Tyto dlouhodobě zavedené technologie vytvrzování povrchu se neustále zlepšují a zůstávají mezi nejpoužívanějšími. Dnes se však na oceli aplikují a vyvíjejí zcela odlišné povrchové technologie. (Davis, 2002 str. 1 a 2)

4.1 Mechanismy fázových transformací

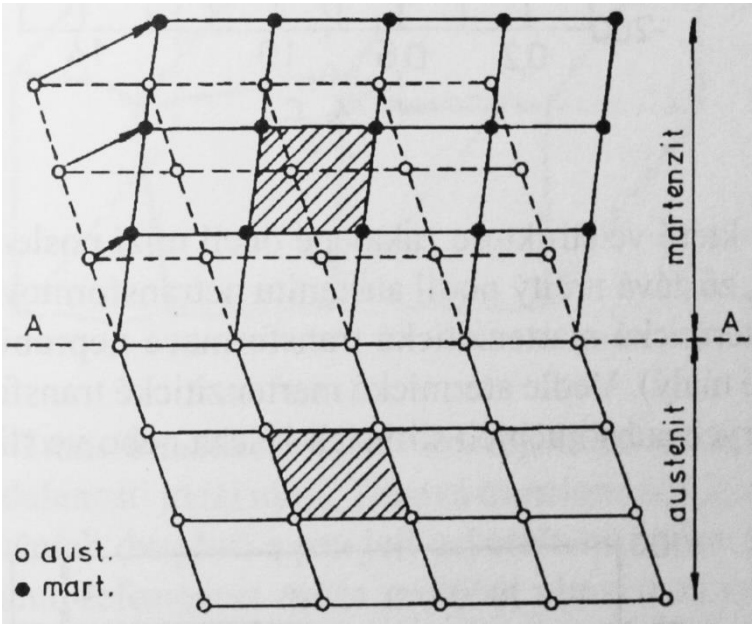
„V obecném pojetí je fázová přeměna každá kvalitativní změna ve struktuře atomů nebo elektronů, ke které dochází alespoň v části sledované soustavy vlivem změny vnějších podmínek.“ (Pluhař, 1983 str. 108). Tyto změny mohou být například tlak, teplota, elektrické nebo magnetické pole. Fázovou přeměnou není jen změna skupenství projevující se rozdílným uspořádáním atomů, ale i přeskupení atomů při změně druhu krystalografické mřížky v tuhém stavu, nebo nespojitá změna elektrických nebo magnetických vlastností. Změna druhu krystalografické mřížky se projevuje i změnou morfologie zrn (krystalů). Příkladem je martenzitická přeměna u oceli, při níž se krychlová plošně středěná mřížka austenitu mění na tetragonální tělesně středěnou mřížku martenzitu. Současně s touto změnou probíhá i změna morfologie krystalu z přibližně pravidelných mnohostěnů s kulovými obalujícími plochami na disky nebo desky. V opačném případě je tomu při rekrystalizace a růstu zrn, kdy nejsou morfologické změny krystalů provázeny kvalitativní změnou v krystalografické mřížce, ani v pohybu elektronů, takže kvůli správnému začlenění rekrystalizace nepatří mezi fázové přeměny.

Při popisu fázových přeměn je nutné brát v potaz jejich mechanismus, kinetiku a termodynamiku. Mechanismus fázových přeměn musí vysvětlit všechny vztahy mezi strukturou původní a nové fáze. Termodynamika je hodnotí z hlediska energetického jako počáteční a konečný stav a z jejich rozdílu odvozuje hybnou sílu fázové přeměny, zpravidla díky rychlosti nukleace a rychlosti růstu nové fáze.

Technicky nejvýznamnějšími přeměnami v kovových materiálech jsou krystalizace a přeměny v tuhém stavu, protože tvoří teoretický základ vlastností materiálu při tváření, svařování, slévání a tepelném zpracování, případně i různých kombinovaných technologiích, např. chemicko-tepelné nebo tepelně mechanické zpracování. (Pluhař, 1983 str. 108)

4.2 Princip martenzitické transformace

Ochlazujeme-li ocel z oblasti teplot stabilního austenitu dostatečně rychle, tak aby jeho austenitická struktura prošla oblastí teplot perlitické a bainitické reakce beze změny, transformuje se při nízkých teplotách martenziticky. „Teploty martenzitické reakce jsou tak nízké, že při nich v ocelích není prakticky možná ani substituční difuze, ani difuze intersticiální. Proto je chemické složení vznikajícího martenzitu totožné se složením původního austenitu a přesuny atomů při transformaci jsou možné jen na vzdálenosti kratší, než je meziatomová vzdálenost v mřížce.“ Jedná se o relativní přesuny atomů vzhledem k jejich nebližším sousedům. Jedná se proto o bezdifuzní přeměnu. Viz obrázek. (Ptáček, 2003 str. 305)



Obr. 23 – Rovinné schéma bezdifuzní přeměny (Ptáček, 2003 str. 305)

Martenzit

Je nerovnovážný přesycený tuhý roztok uhlíku v železe alfa. Při změně tuhého roztoku nedochází k difuzi, chemické složení výchozího austenitu a vznikajícího martenzitu bude stejné. Při martenzitické transformaci dochází k přeměně z austenitu, tj. kubické plošně středěné mřížky na tetragonální prostorově středěnou mřížku martenzitu bez přerozdělení uhlíku. Přesuny atomů jsou při této změně nepatrné. Změna alotropie je způsobená změnou uspořádání a přesunem skupin atomů tak, že se posouvají k sousedním atomům o úseky kratší, než je meziatomová vzdálenost.

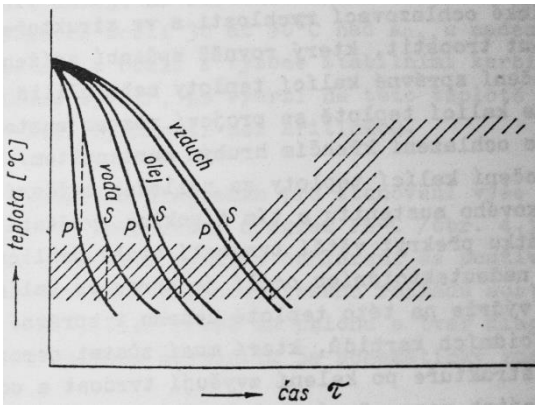
Martenzit je vysoce tvrdá struktura oceli, vyplívá to z jeho struktury, která je velmi jemná. V každém austenitickém zrnu vzniká větší počet martenzitických krystalů. (Skálová, a další, 2010, s. 99-101)

4.3 Druhy kalení

Všechny druhy kalení závisí na specifických vlastnostech různých druhů ocelí. Níže uvedené druhy vychází z obecných ARA diagramů ocelí. Svislé přímky znázorňují rozdíl teploty na povrchu a ve středu kaleného předmětu, na začátku a na konci martenzitické přeměny.

Kalení základní

Jedná se o nejčastější a nejjednodušší způsob kalení. Po ohřevu na správnou teplotu následuje ihned plynulé ochlazení až na teplotu ochlazovacího prostředí. Na obrázku je vyobrazeno ochlazení v různých médiích. (Kraus, 1992 str. 106)



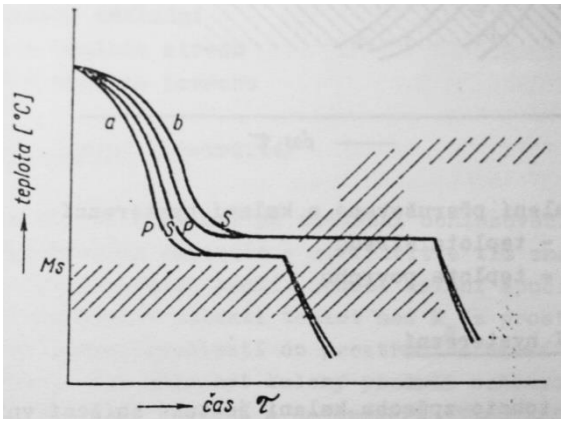
Obr. 24 – Základní kalení, S – teplota středu, p – teplota povrchu (Kraus, 1992 str. 106)

Kalení lomené

Účelem je zmenšit rychlost ochlazování v průběhu přeměny austenit – martenzit, a tím zmenšit strukturní a tepelné pnutí. Kalený předmět může být ochlazován ve vodě a v oleji, nebo v oleji a na vzduchu. Lomené kalení spočívá v přetržitém ochlazování v oblasti teplot nad M_s z prostředí s větší ochlazovací rychlostí do prostředí s menší ochlazovací rychlostí. Nevýhodou tohoto způsobu kalení je náročné měření teplot před přenesením do dalšího ochlazovacího prostředí. (Kraus, 1992 str. 108)

Kalení termální

Účelem tohoto kalení je oddělení tepelných a strukturních pnutí, a tím zmenšení jejich společných účinků. Postup spočívá v martenzitickém kalení s rychlostí ochlazování větší než kritickou v teplé lázni nad M_s, výdrží do vyrovnání teplot v celém průřezu materiálu a následným dochlazením na teplotu místnosti. (Kraus, 1992 str. 110)



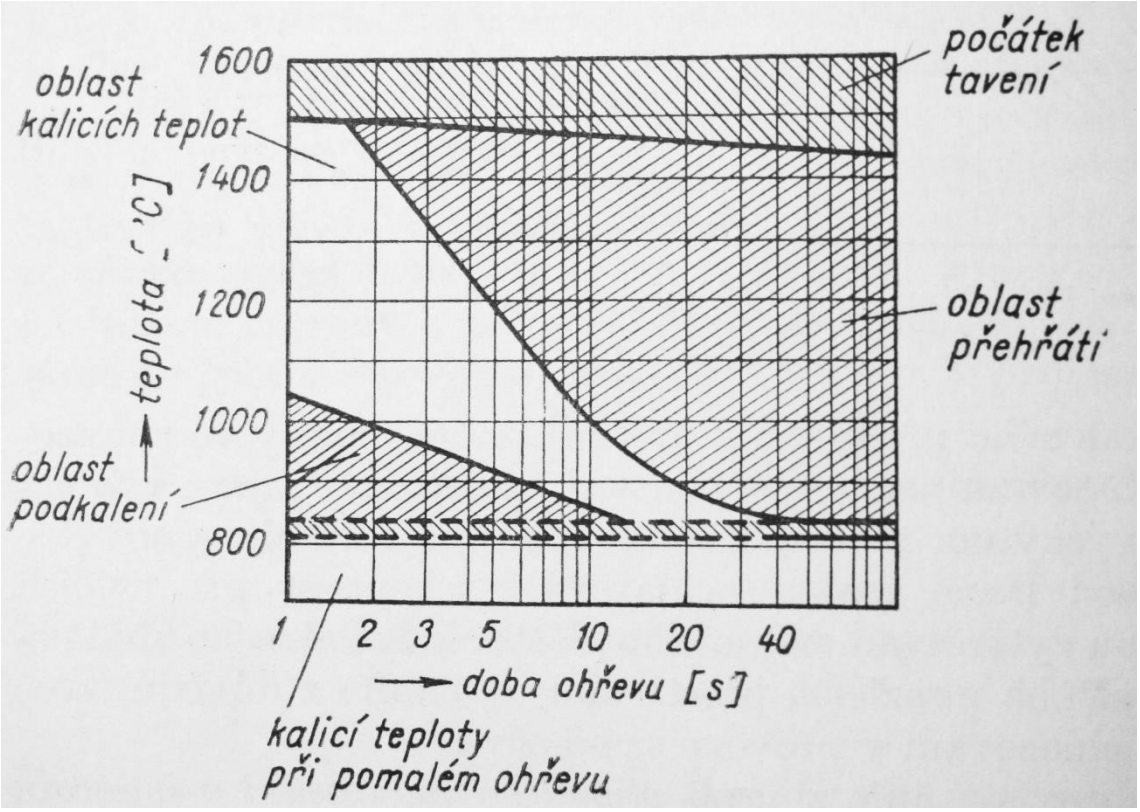
Obr. 25 – Kalení termální, S – teplota středu, p – teplota povrchu (Kraus, 1992 str. 110)

Kalení se zmrazováním

Díky zmrazení při ochlazování se zmenší množství zbytkového austenitu, a tím se zvětší tvrdost a zlepší rozměrová stabilita. Zmrazení musí proběhnout ihned po martenzitickém kalení, aby se zbytkový austenit nestačil stabilizovat. Jako médium chlazení se používá směs lihu a tuhého oxidu uhličitého (-80°C) nebo tekutého dusíku (-196°C). Rychlá změna teplot způsobí velké vnitřní pnutí, které má za následek případné deformace nebo výskyt trhlin. U vyšších teplot a větších rozměrů kaleného tělesa se zmenšuje schopnost ochlazování kvůli vytvoření parního polštáře kolem kaleného předmětu. Kvůli vysoké spotřebě mrazících prostředků je tato technologie finančně náročná a využívá se jen výjimečně. (Kraus, 1992 str. 112)

Povrchové kalení

Účelem povrchového kalení je zvýšit tvrdost pouze povrchové vrstvy a zachovat houževnaté a měkké jádro kaleného předmětu. Docílí se toho za pomoci rychlého ohřevu povrchu předmětu a následujícího rychlého ochlazení. Ohřívá-li se povrch předmětu větší rychlostí, než jakou předmět přivedené teplo odvádí směrem dovnitř materiálu, vznikne v jeho povrchové vrstvě tepelný spád, který umožní dosáhnout kalící teploty jen do určité hloubky pod povrchem. Čím je rychlejší ohřev, tím je větší tepelný spád. Díky tomu se může korigovat velikost zakalené vrstvy. Čím je ohřev pomalejší, tím je tepelný spád menší a hloubka kalené vrstvy je větší. Jako zdroj ohřevu se využívá elektromagnetické indukce nebo plamene, dnes spíše laseru a plasmy. (Jech, 1983 str. 100)



Obr. 26 – Vliv rychlosti ohřevu na kalicí teplotu (Jech, 1983 str. 100)

5 Návrh experimentu

Předmětem experimentu bakalářské práce bude měřit a vyhodnocovat projevy akustické emise indukované při tepelném zpracování. Půjde o měření doby trvání a charakteristiky akustických impulzů vyvolaných rychlou změnou teploty. Dále měření doby martenzitické přeměny u konstrukčních ocelí napříč různými druhy chladících médiích, různými způsoby a druhy kalení.

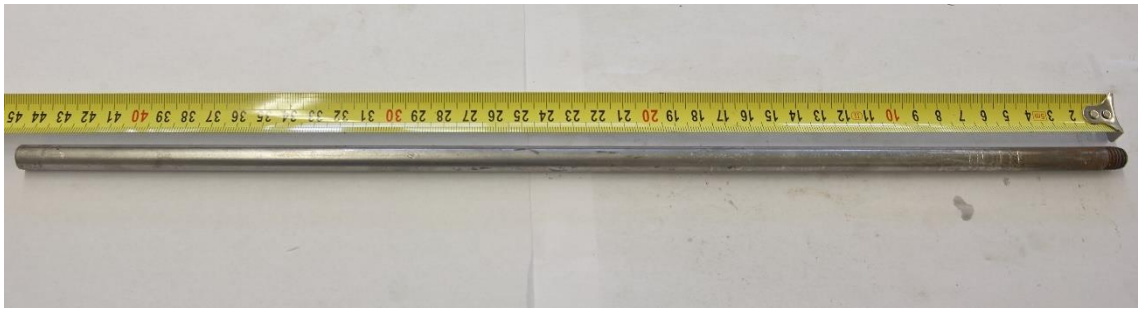
Dále bude popsána konstrukce a aplikace použití zvukovodů potřebných pro realizaci těchto měření.

6 Výroba zvukovodu

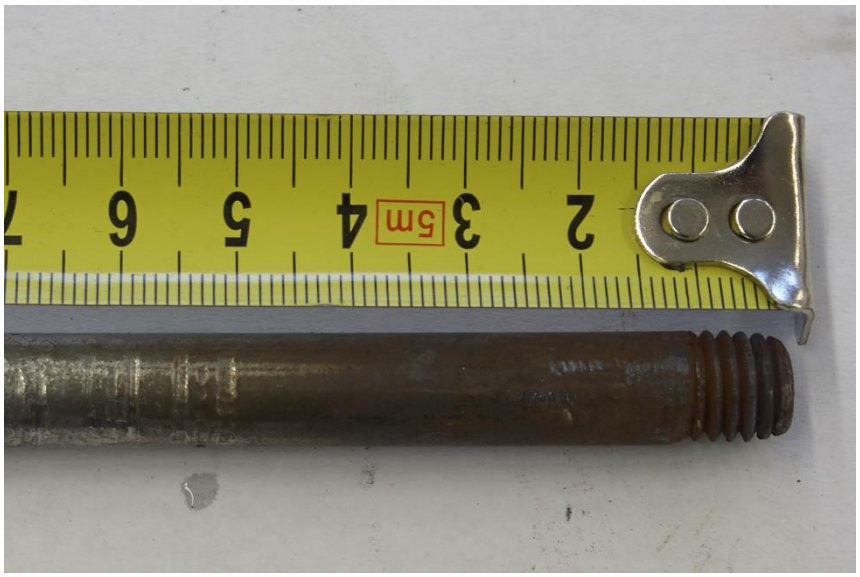
Prvním krokem k veškerému měření bylo zajištění vhodného zvukovodu, který by zabránil destrukci snímače způsobené vysokou teplotou zkoumaného vzorku. Ideální zvukovod pro měření akustické emise během kalení musí odolávat vysokým teplotám (1200 °C), být korozivzdorný, mít malou tepelnou roztažnost, musí vydržet cyklické namáhání – být opakovatelně použitelný a zejména musí dobře vést zvuk, tj. mít nejmenší akustický útlum.

6.1 Zvukovod v podobě tyče

Prvním testovaným zvukovodem byla tyč kruhového průřezu (konstrukční hlazená ocel o délce 450 mm, průměru 10 mm) zakončená závitem (M10x1,5). Tato tyč byla ke vzorku připevněna za pomoci závitu do hloubky cca 6 mm. Tyč měla nejlepší akustické vlastnosti, dobře chladla – nepřenášela na snímač teplo ze vzorku. Na druhou stranu se s ní velmi špatně manipulovalo. Bylo velmi obtížné tyč našroubovat do rozžhaveného vzorku. Tyč přenášela rušivé signály způsobené změnou napětí a tvaru v závitu, které jsou zapříčiněné teplotní roztažností. V průběhu měření na ní vznikala oxidace a koroze, která opět způsobovala výskyt akustických signálů. Pro měření AE u oceli chladnoucí na vzduchu byl závit zvukovodu zbroušen do špičky pro snazší šroubování



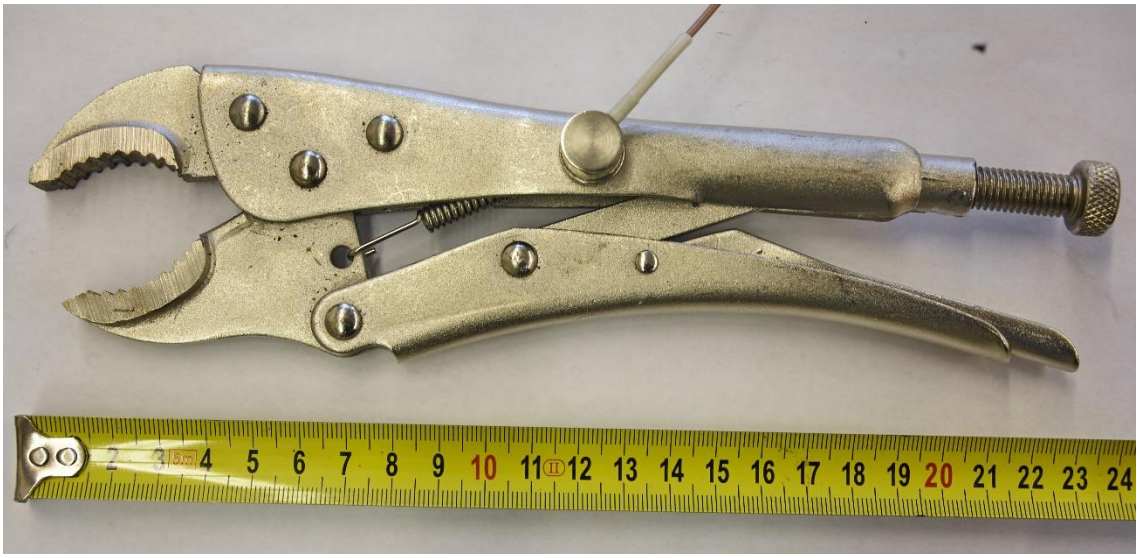
Obr. 27 – Kruhová tyč pro přímé měření AE (zdroj: autor)



Obr. 28 – Detail závitu tyče (zdroj: autor).

6.2 Zvukovod v podobě samosvorných kleští

Dalším testovaným zvukovodem byly samosvorné rychloupínací kleště. Tyto kleště měly o trochu vyšší útlum než tyč. Skládaly se z několika částí, byly nýtované a z měkčího materiálu (měly větší akustický útlum). Z důvodu kratší konstrukce tyto kleště přenášely na snímač teplo, ale při měření teplota na snímači nepřesáhla 70 °C. Na druhou stranu se s nimi nejlépe manipulovalo, stačilo nastavit na kleštích požadovaný průměr a vzorek kleštěmi sevřít a zacvaknout. Tyto kleště si vždy udržovaly určité předepnutí a akustický signál vedly při celém průběhu ochlazovaní bez nutných dodatečných úprav. Signál zapříčiněný změnou objemu (teplotní roztažnost) nebyl tímto zvukovodem naměřen. Vzorek pro použití kleští není třeba nijak upravovat.

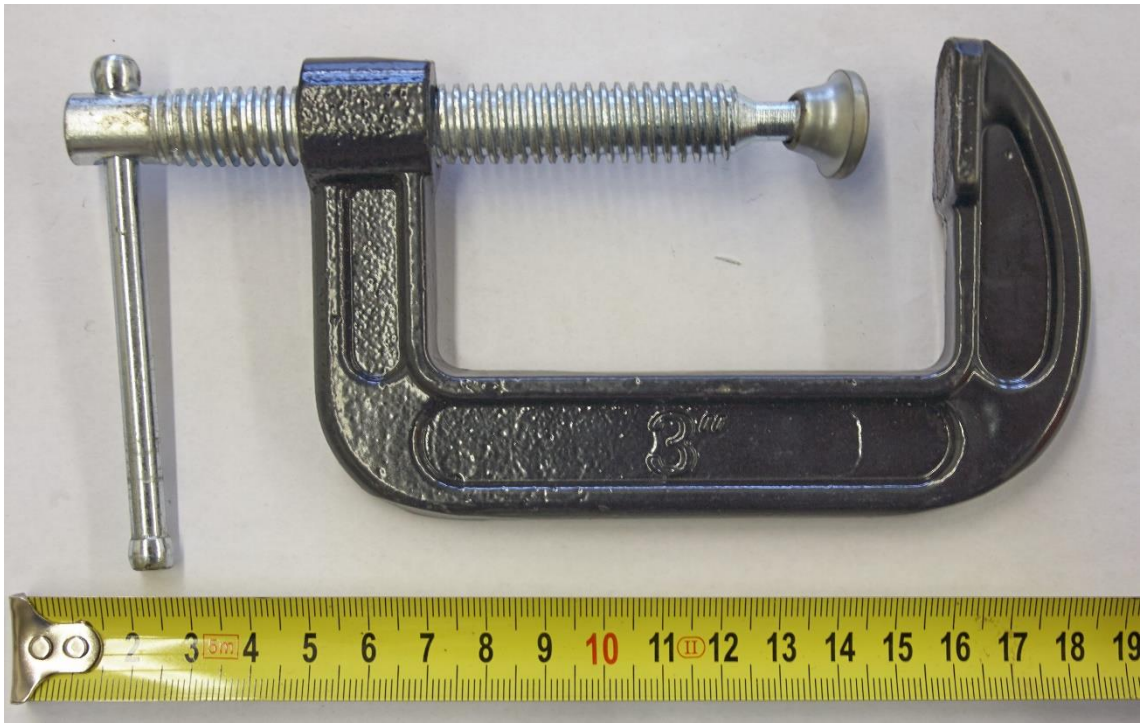


Obr. 29 – Samosvorné rychloupínací kleště (zdroj: autor)

6.3 Zvukovod v podobě svěrky

Litinová svěrka velikosti 3“ s pochromovanou ocelovou závitovou tyčí zakončenou vratidlem vedla signál ze zkoušených zvukovodů nejhůře. Byla natřena barvou, která se v místě dotyku vzorku vypálila. Litinová svěrka do tvaru „U“ pohlcovala téměř veškerý akustický signál, i když k ní byla přidělána ocelová závitová tyč. Kvůli své malé konstrukci velmi dobře vede do snímače teplo. V průběhu ochlazování vzorku bylo nutné snímač ze svěrky odepnout kvůli zabránění poškození snímače. Další nevýhoda byla zaznamenána v samotném předepnutí, respektive v ochlazování vzorku. Vzorek bezprostředně vytažený z pece byl upnut do svěrky a řádně utažen. Po pár minutách ochlazování, a tím pádem i změnou objemu způsobeného teplotní roztažností, se vzorek ve svorce uvolnil a nepřenášel žádný signál.

Za jiných podmínek by se tato svěrka dala využít jako akustický tlumič a držák jiné měřící techniky.

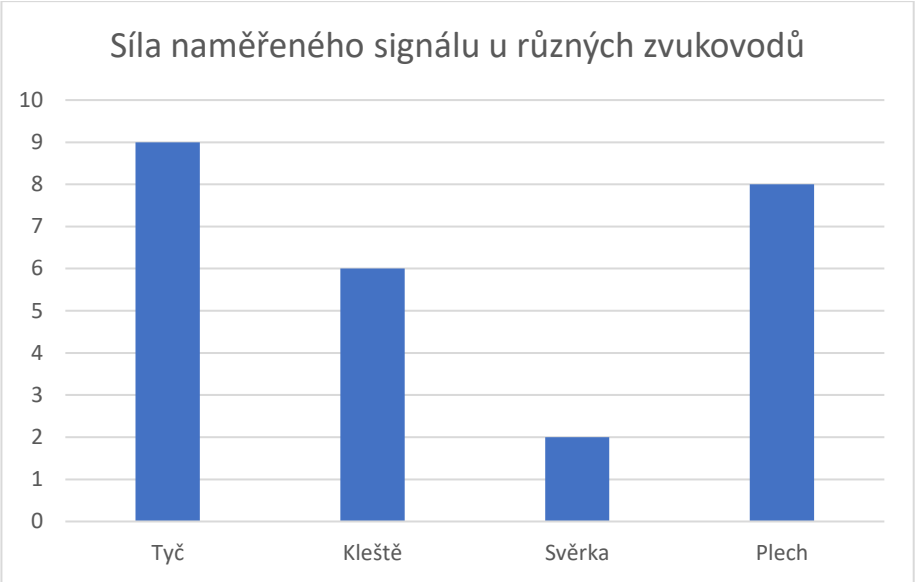


Obr. 30 – Litinová svěrka (zdroj: autor)

6.4 Zvukovod v podobě nerezového plechu

Byl použit nerezový plech o rozměrech 220 mm x 2,5 mm. Měřený vzorek byl na plech položen. Při kalibrování měl plech ze všech zvukovodů nejlepší akustické vlastnosti, díky tvaru se i na vzduchu velmi dobře chladil. Avšak akustický signál u malých vzorků vedl podprůměrně. Toto překvapivé zjištění lze přisoudit malé hmotnosti měřeného vzorku, tím pádem i malému tlaku vzorku působícímu na plech.

Obr. 31 – Nerezový plech (zdroj: autor)



Graf 1. Síla naměřeného signálu u různých zvukovodů. (zdroj: autor)

Na grafu č. 1. Je zidealizované srovnání akustických vlastností vybraných zvukovodů. Čím větší hodnota, tím menší akustický útlum.

7 Postupy měření

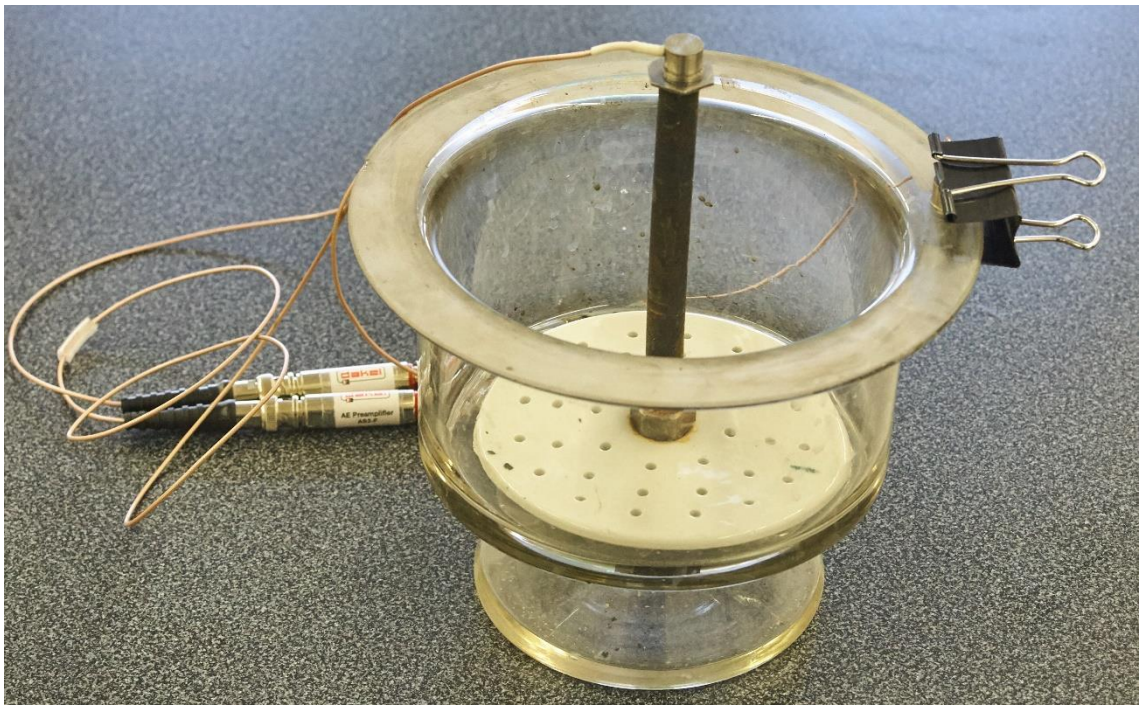
7.1 Experimentální aparatura

První myšlenkou bylo nepoužívat zvukovod, ale zachycovat signál přes chladící medium – vodu. Pro tyto účely bylo zkoušeno snímat signály ze stěny nádoby naplněné vodou, a pak do nádoby umístit vhodný předmět – zvukovod, který by byl co nejblíže ochlazovanému vzorku, po kterém by zvukové vlny přes vodu šly snímat. Samotný snímač do vody ponořit nebylo možné, jelikož není voděodolný.

Pro měření byl použity snímač značky Dakel typu MDK-13, který umožňuje být používán v rozmezí teplot -20°C až +95°C, snímače jsou zakončeny magnetem.

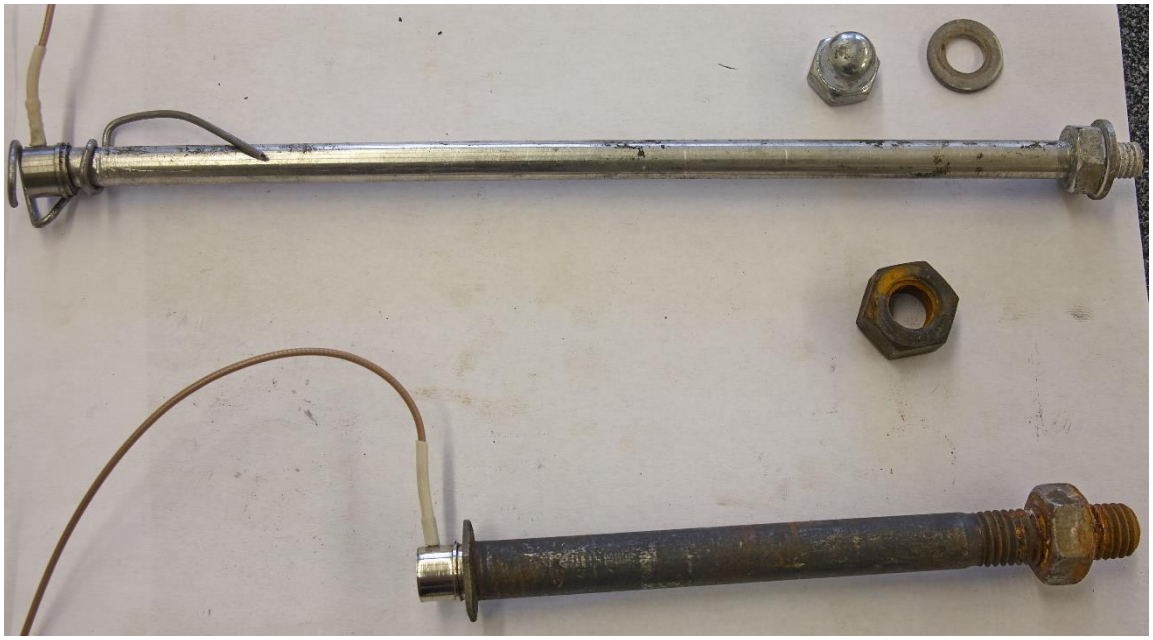
S těmito požadavky byla zkonstruována experimentální aparatura. Skládá se z exsikátoru o průměru 300 mm, tento exsikátor sloužil jako nádoba na vodu s odpovídajícím tvarem. Uprostřed exsikátoru se nacházelo keramické síto, ve kterém byl umístěn centrální zvukovod. Zvukovod byl zajištěný k sítu za pomoci podložek a matic. K centrálnímu zvukovodu byl následně připnut snímač. Další snímač se nacházel na horní hraně exsikátoru, který byl k exsikátoru připojen kancelářskou sponkou – toto jednoduché řešení se velice osvědčilo.

Pro centrální zvukovod byl použit pevnostní šroub M14 s odřezanou hlavou. Dále byla testována i duralová tyč o průměru 10 mm. Při testování měly oba dva zvukovody obdobný akustický útlum. Rozdíly naměřených hodnot mohly být zanedbány kvůli útlumu samotné vody, který byl řádově vyšší. Pro finální měření byl vybrán šroub M14 kvůli snadnější aplikaci magnetického snímače. Na všechny snímače v místě dotyku se zvukovodem byl nanesen glycerín pro lepší vedení zvuku.



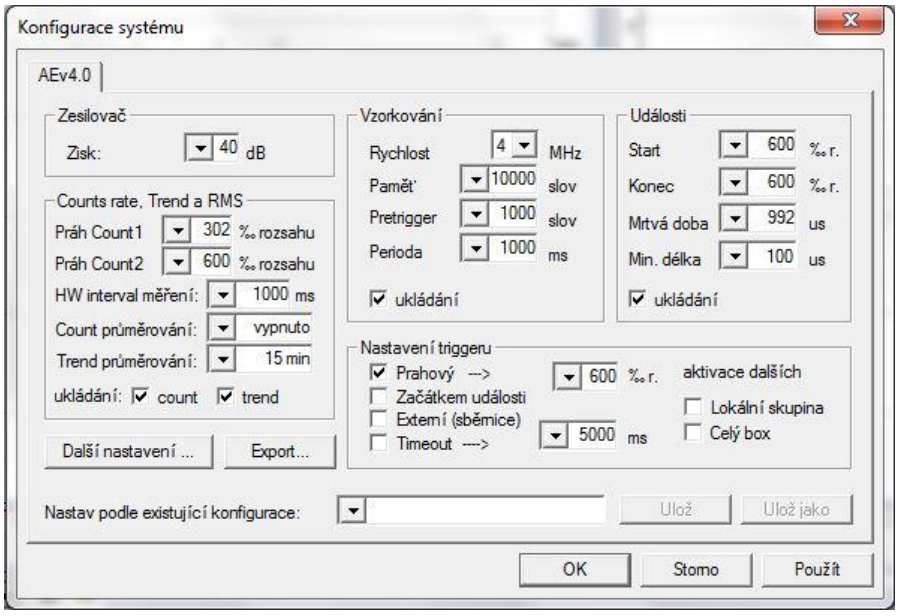
Obr. 32 – Experimentální aparatura s připojenými snímači. (zdroj: autor)

Obr. 33 – Uchycení snímače č. 3 k horní hraně exsikátoru za pomocí kancelářské sponky. (zdroj: autor)



Obr. 34 – Srovnání duralové tyče se závitem a držákem snímače a šroubem. (zdroj: autor)

Pro měření akustické emise byla použita standardní jednotka Dakel Xedo s tříkanálovým měřením. Se snímači typu MDK 13 je součástí snímače i permanentní magnet pro snadnější manipulaci. Teplotní odolnost snímače je -20 °C až 95 °C. V průběhu měření bylo zjištěno, že snímač č. 3 (s3) na celém průběhu měření zaznamenával šum o hodnotě RMS cca 50 mV. Tuto chybovost lze přisoudit poškození snímače, protože tělo snímače má uvolněný permanentní magnet. Pro záznam a ukládaní dat se používala aplikace Deamon a pro zpětné zpracování dat program DeaShow. Nastavení parametrů pro všechna měření byla defaultně nastavena dle doporučení výrobce. Ukládaly se hodnoty count, trend, vzorkování a události.



Obr. 35 – Nastavení ukládání a parametrů v aplikaci Deamon (zdroj: autor)

Je třeba podotknout, že během celého průběhu měření byla zaznamenána velká nestabilita těchto aplikací. Velmi často se aplikace sama zavřela, zmrzla, nebo neukládala naměřená data, ačkoliv bylo vše nastaveno dle návodu. Tímto způsobem byla ztracena více jak 1/3 všech naměřených dat. Aplikace Deamon zaznamenávala signály a zobrazovala je na monitoru v reálném čase, ale po zaškrtnutí políčka „nahrávat“ aplikace nenahrávala, neuložila data a ve složce, která by měla obsahovat naměřená data, se nacházel jen prázdný soubor. Občas tato aplikace sama vytvářela rekurzivní kořenové složky, které byly samovolně cyklicky vytvářeny po zapnutí nahrávání měření. Tento problém většinou vyřešil restart aplikace, předcházející znovu nastavení složky pro ukládání záznamu. Aplikace měly obecně mnoho chyb a znepříjemňovaly a komplikovaly celé měření. Nejspíš to bylo způsobeno i tím, že softwarová část měřícího systému XEDO – Deamon, je k dispozici pro platformu Windows 95 a Windows NT. Měření probíhalo na počítači s operačním systémem Windows 7, pro který by měla existovat zpětná kompatibilita. Různými techniky, kteří se systémem XEDO měří, bylo sděleno, že nestabilita aplikace je její běžná vlastnost.

Dále je třeba podotknout, že u všech níže vyexpedovaných grafů je chybné časové razítko, čas i datum měření nemusí přesně odpovídat skutečnostem. Všechna ostatní data vyobrazená v grafech jsou správná. Tento problém byl způsoben chybně nastaveným časem v operačním systému počítače.

7.2 Popis legendy u grafů a kódování záznamů

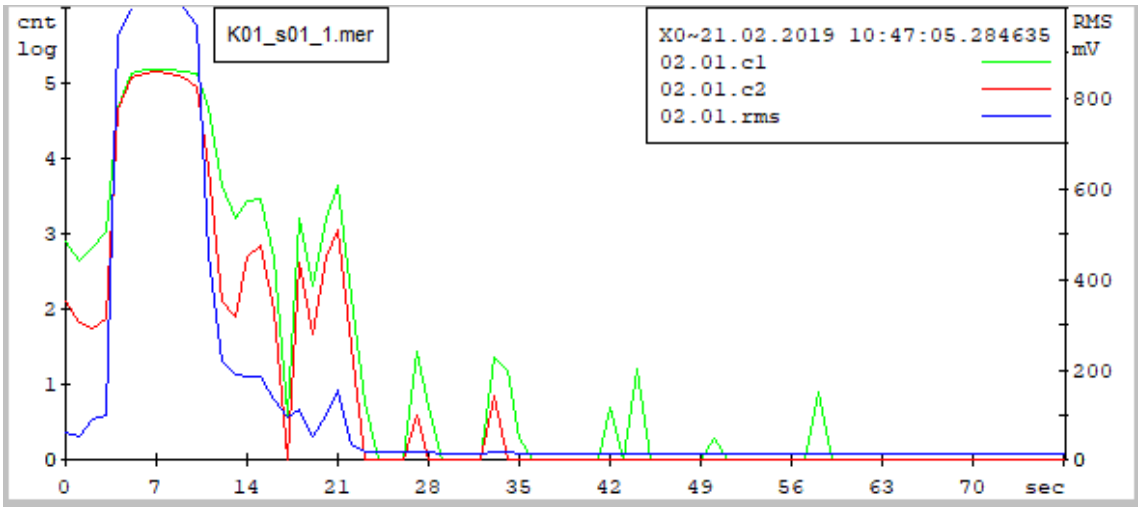
Všechny grafy v této práci vygenerované v programu DeaShow jsou opatřeny kódem, např. K01_s01_1.mer. První část popisuje druh materiálu a číslo vzorku, druhá část popisuje číslo snímače nebo použitý zvukovod, třetí část popisuje po kolikáté se na daném vzorku provádělo měření, respektive po kolikáté byl vzorek ohřátý a zchlazený.

Na pravé straně grafu je časové razítko s časem záznamu. Značení křivek v legendě např. 02. 01. c1 znamená, že byl použit box (nahrávací zařízení Dakel Xedo) č. 2 (02). Snímač byl zapojen do konektoru č. 1 (01). A křivky popisuje county 1 (C1). Značení (C2) znamená county 2 a RMS pak celkovou střední energii signálu.

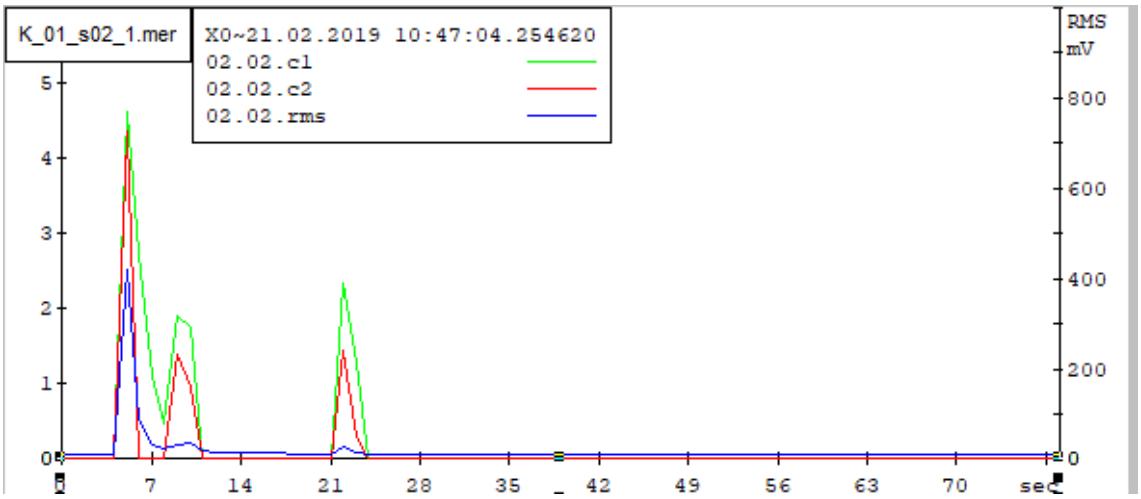
7.3 Kalení do vody

Pro kalení do vody byly použity vzorky z materiálu ČSN 12 050, pro účely této práce je tento materiál značen symbolem K s pořadovým číslem vzorku, např. K01. Tyto vzorky byly o rozměrech š 36×v68×h13 mm, opatřeny dírou se závitem M10. Tento materiál je určen pro tepelné zpracování. Jako kontrolní vzorek pro kalení do vody byl použit materiál S235 JR. V rámci této práce byl vzorek značen symbolem N s pořadovým číslem vzorku. Vzorky byly o rozměru š 34×v90×h10 taktéž opatřeny závitem M10. U tohoto druhu materiálu by martenzitická přeměna neměla probíhat, pokud ano, tak minimálně. Všechny vzorky byly označeny značkou, tj. pořadovým číslem. Vzorky určené pro kalení do vody byly v peci ohřáty na teplotu 850 °C, na této teplotě drženy 15 min. Po této době byl ihned do vzorku našroubován zvukovod a následně byl tento vzorek ponořen do vody, kde došlo k jeho rychlému zchlazení. Vzorek se zvukovodem byl ponořen do nádoby s vodou o teplotě cca 10 °C pod úhlem cca 30° tak, aby horní hrana vzorku byla minimálně 20 mm pod hladinou. Vzorek byl ponořen co nejrychleji, ale zároveň tak, aby nevytvořil na hladině vlnky a nedotýkal se centrálního zvukovodu, ani stěn nádoby. Po utichnutí signálu způsobeném vytvoření plynného polštáře kolem vzorku byl vzorek opatrně položen na keramické sítko a zvukovod položen na hranu nádoby. Položení vzorku vytvořilo krátký signál AE v průměru mezi 20. až 30. sekundou záznamu, toto položení je zřetelné na níže vyobrazených grafech.

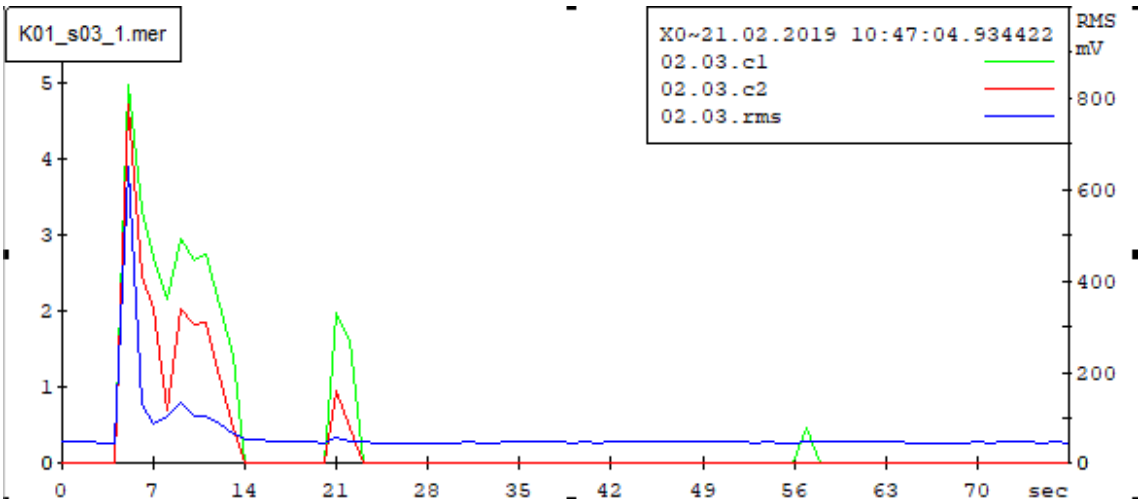
K experimentální aparatuře pro kalení do vody byly vždy připojeny tři snímače. Snímač 1, na grafech značen jako s1, byl umístěn přímo na zvukovodu, který byl přes závit připevněn k měřenému vzorku. Snímač 2 (s2) byl umístěn ve středu ochlazované nádoby. Snímač 3 (s3), byl umístěn na horním kraji nádoby a připevněn byl sponkou. Toto uspořádání třech rozmístěných snímačů mělo sloužit k porovnání útlumu signálu mezi ostatními snímači a snadnější interpretaci dat, dále i k případnému vyfiltrování rušivého pozadí. Filtrování pozadí v této práci nebylo potřeba, všechna měření byla prováděna v tiché místnosti. Pro analýzu dat byly použity výhradě signály ze snímače s1 – přímého zvukovodu přišroubovaném ke vzorku.



Graf č. 2. Záznam AE v průběhu ochlazování do vody, měření K01_s01_1.mer (zdroj: autor)

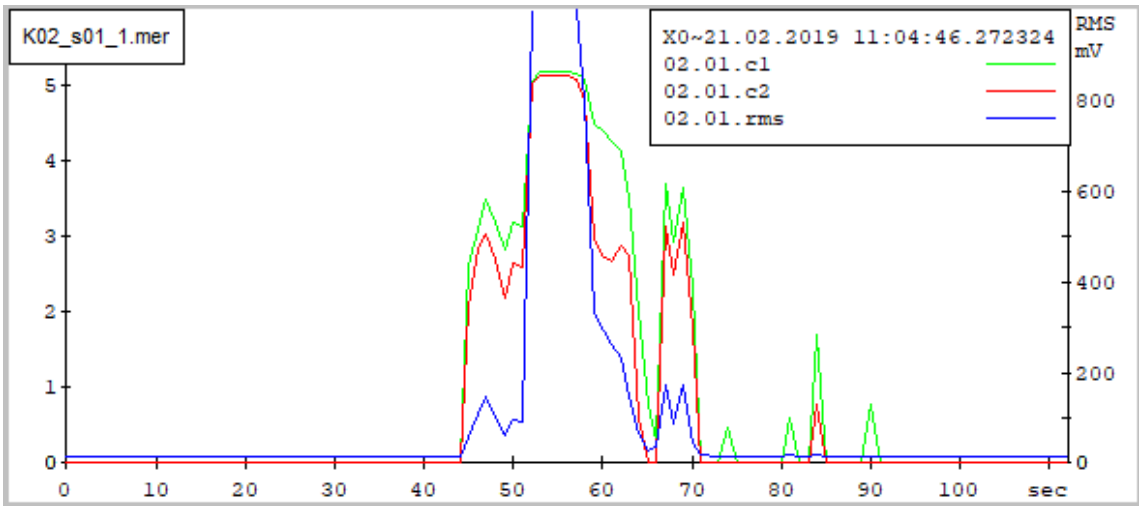


Graf č 3. Záznam AE v průběhu ochlazování do vody, měření K01_s02_1.mer (zdroj: autor)

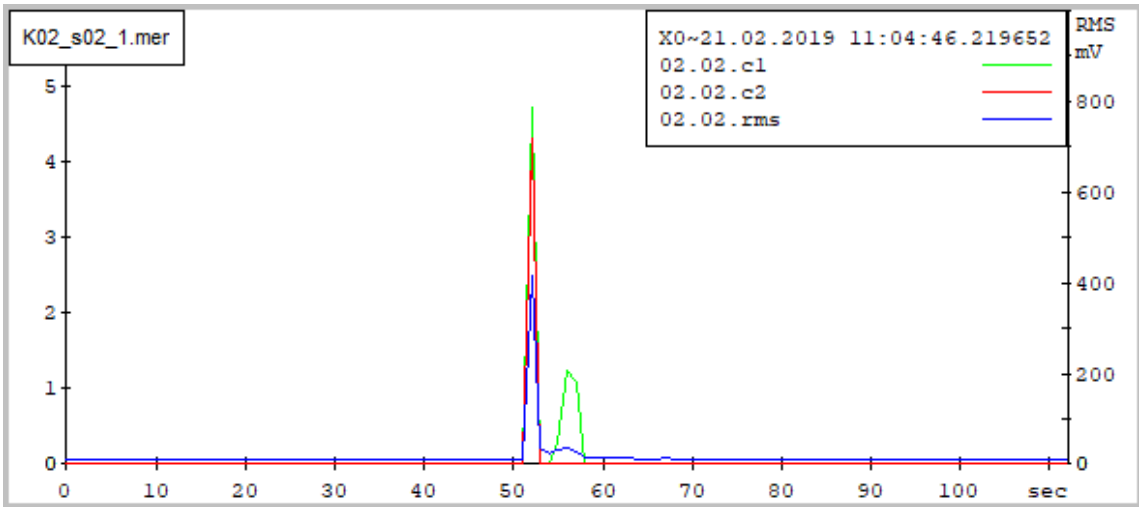


Graf č 4. Záznam AE v průběhu ochlazování do vody, měření K01_s03_1.mer (zdroj: autor)

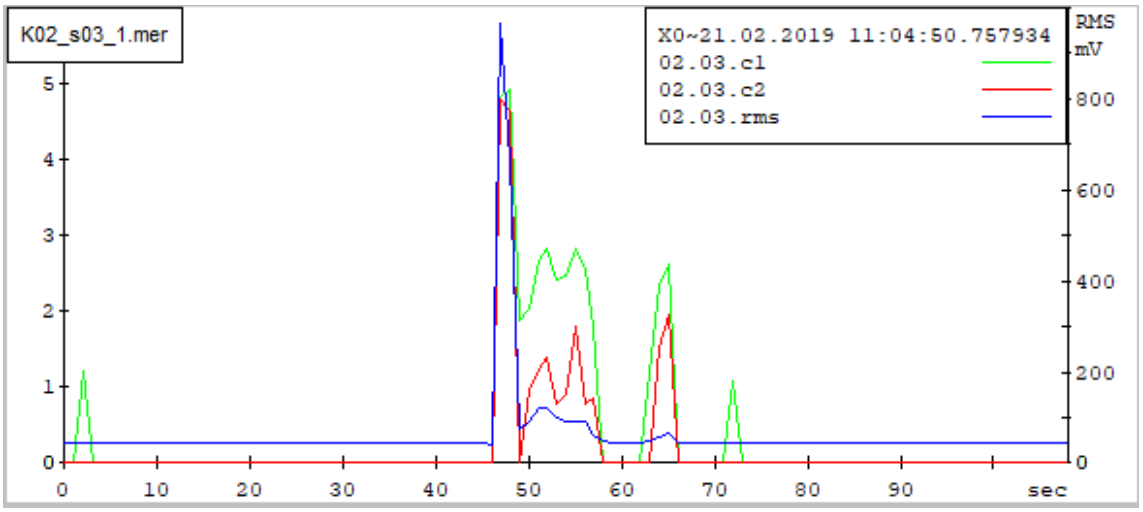
Na grafech číslo 2, 3 a 4 můžete vidět nárůst signálu AE při ochlazování vzorku do vody. Při porovnání s různě rozmístěnými snímači na experimentální aparatuře na grafu č. 2. je patrné velké množství signálů, v celkové míře převyšující měřitelné hodnoty. Tyto signály jsou způsobené výskytem bublin plynu v kapalině při odpařování vody z povrchu ochlazovaného vzorku. Na grafu č. 4 mezi sedmou a čtrnáctou vteřinou by mělo docházet k martenzitické přeměně. Ve dvacáté první vteřině záznamu je zaznamenán signál z položení vzorku na dno nádoby. Ostatní signály z grafu jsou způsobeny mikrobublinami ze začínajícího výskytu koroze. Teplota vzorku se z původních 850 °C na cca 30 °C ochladila za 20 vteřin.



Graf č 5. Záznam AE v průběhu ochlazování do vody, měření K02_s01_1.mer (zdroj: autor)

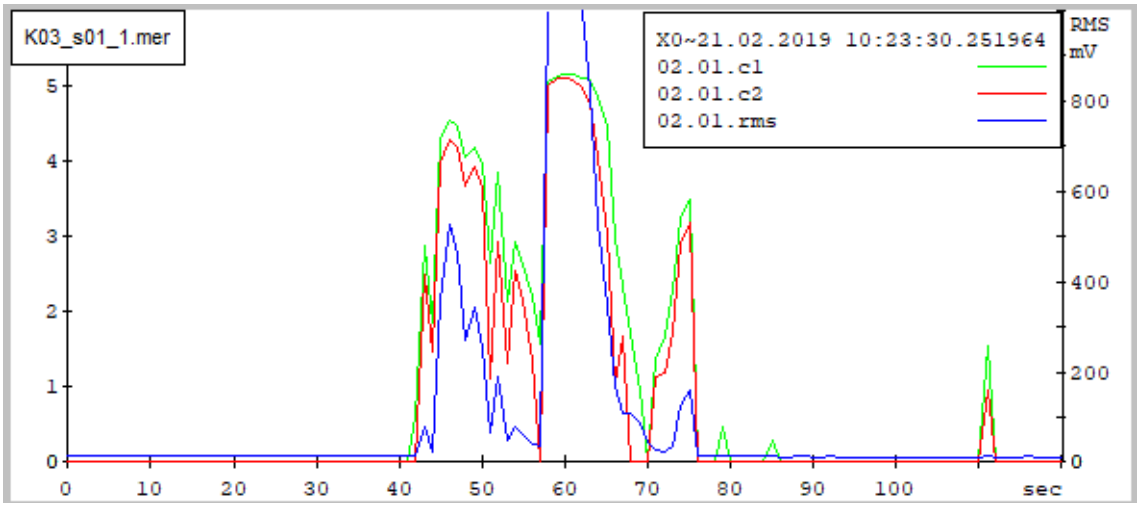


Graf č 6. Záznam AE v průběhu ochlazování do vody, měření K02_s02_1.mer (zdroj: autor)



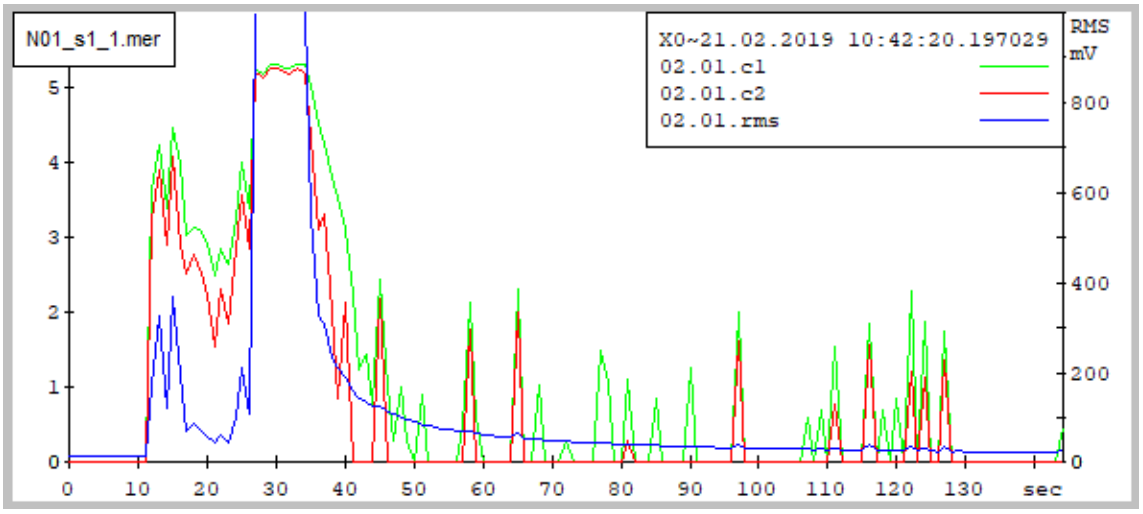
Graf č 7. Záznam AE v průběhu ochlazování do vody, měření K02_s03_1.mer (zdroj: autor)

Na grafech č. 5 až 7 je vidět obdobný trend jako na grafech 2 až 4, a to prudký nárůst signálu, mírné pozastavení, výskyt kratšího slabšího signálu značící nejspíše výskyt martenzitické přeměny, další prodlevu a signál z položení vzorku na dno nádoby. Na konci grafů lze pozorovat výskyt bublinek z koroze.

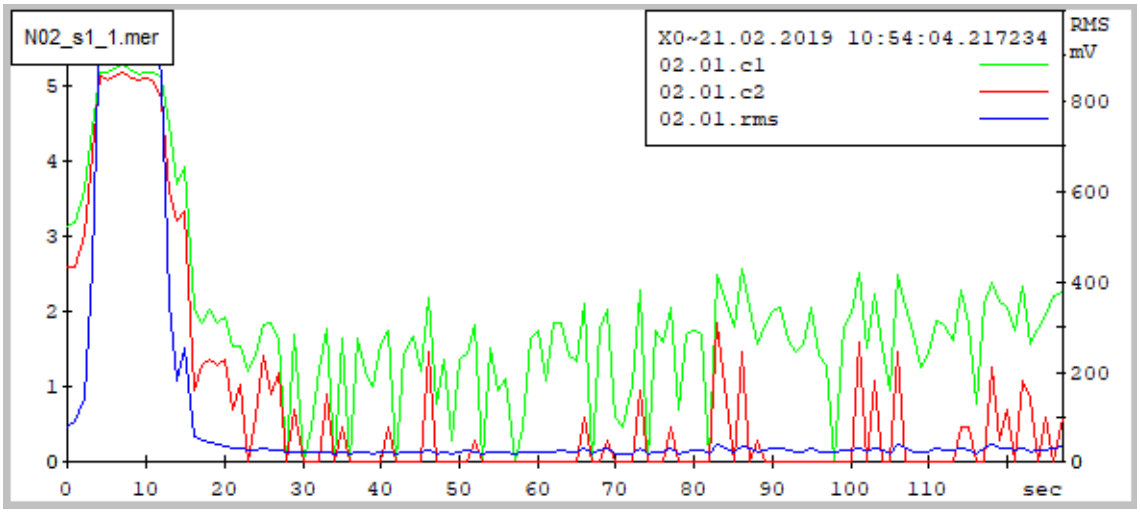


Graf č 8. Záznam AE v průběhu ochlazování do vody, měření K03_s01_1.mer (zdroj: autor)

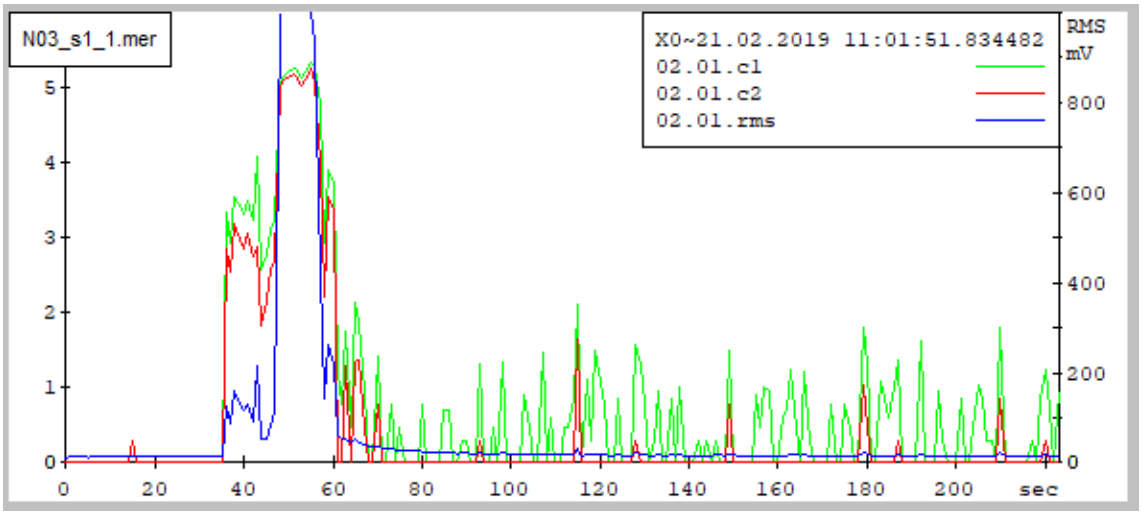
Signál z grafu č. 8 má opět velmi podobný trend, kvůli redundanci dat je zbytečné zobrazit grafy ze snímačů s2 a s3, které ukazují to stejné, jen s vyšším útlumem.



Graf č 9. Záznam AE v průběhu ochlazování do vody, měření N01_s1_1.mer (zdroj: autor)



Graf č 10. Záznam AE v průběhu ochlazování do vody, měření N02_s1_1.mer (zdroj: autor)



Graf č 11. Záznam AE v průběhu ochlazování do vody, měření N03_s1_1.mer (zdroj: autor)

Na grafech č. 8 až 11 popisujících AE zapříčiněné zchlazením materiálu N (S235 JR) lze pozorovat kratší výskyt signálu ze samotného ochlazení oproti materiálu K (ČSN 12 050). V tomto materiálu by martenzitická přeměna neměla být natolik výrazná. Na druhou stranu lze pozorovat pár kratších ostřejších impulzů značící změnu napětí v závitu způsobenou změnou objemu vzorku. Tato změna zapříčinila zaseknutí zvukovodu ve vzorku. K povolení – vyšroubování vzorku bylo potřeba vykonat veliké úsilí při povolování, i když byl zvukovod připevněn do dílenského svěráku a vzorek byl uchopen půlmetrovými kleštěmi.

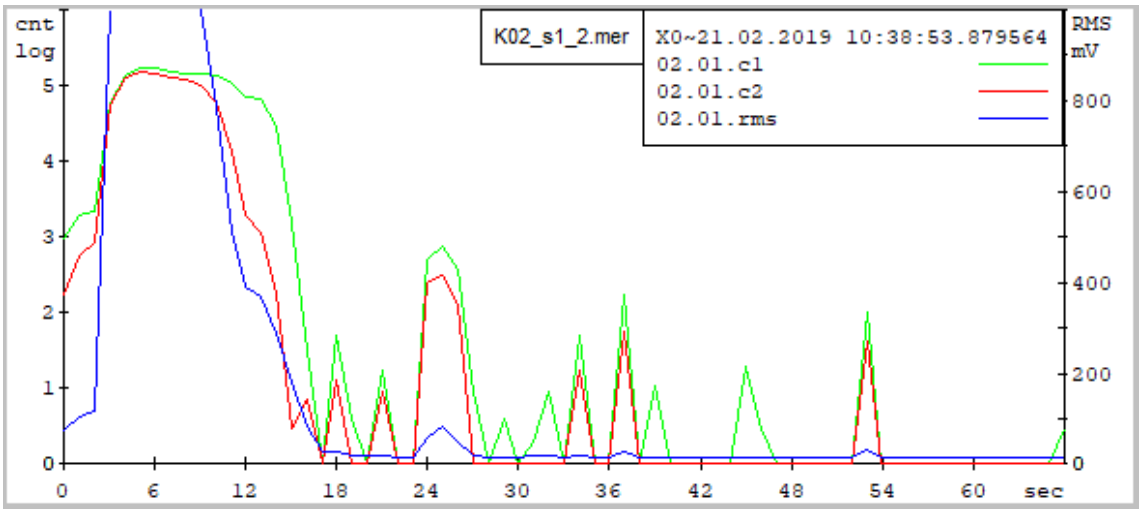
Zvukovod v materiálu K bylo možné po ochlazení volně povolit rukou.

Kalení do nasyceného solného roztoku

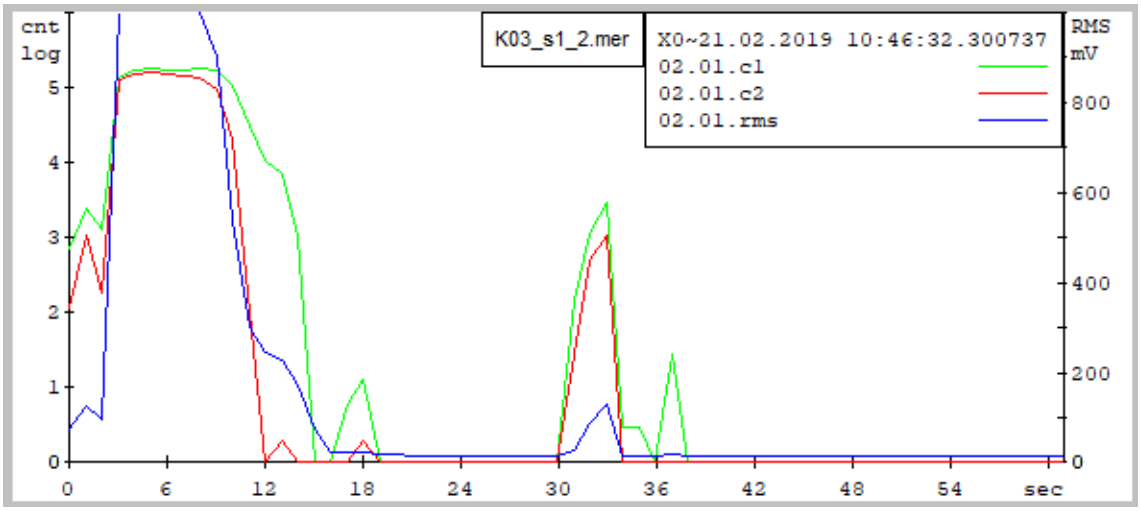
Následující grafy č. 12 až 16 popisují výskyt akustické emise u kalení do solného roztoku. Jednalo se o nasycený roztok vody s kuchyňskou solí. Solný roztok by měl snížit velikost plynového polštáře kolem ochlazovaného vzorku, a tím snížit množství rušivých signálů.

U obou testovaných materiálů bylo zaznamenáno nepatrné vylepšení signálu. Lépe řečeno v průběhu ochlazení se nevytvářelo tolik bublinek kolem ochlazovaného vzorku. V konečném důsledku toto opatření nemělo pro snížení rušivých elementů při měření skoro žádný vliv. Charakteristika AE byla obdobná jako při první relaci ochlazování, jen už nedosahovala tak velkých četností vzniku signálu, ani snížení maximálních naměřených hodnot v průměru o 70mV RMS. U materiálu K už nebyl patrný signál bezprostředně po vyprchání bublin, který při první relaci naznačoval výskyt martenzitické přeměny. U kontrolního materiálu N byl zaznamenán vyšší signál od koroze povrchu vzorku.

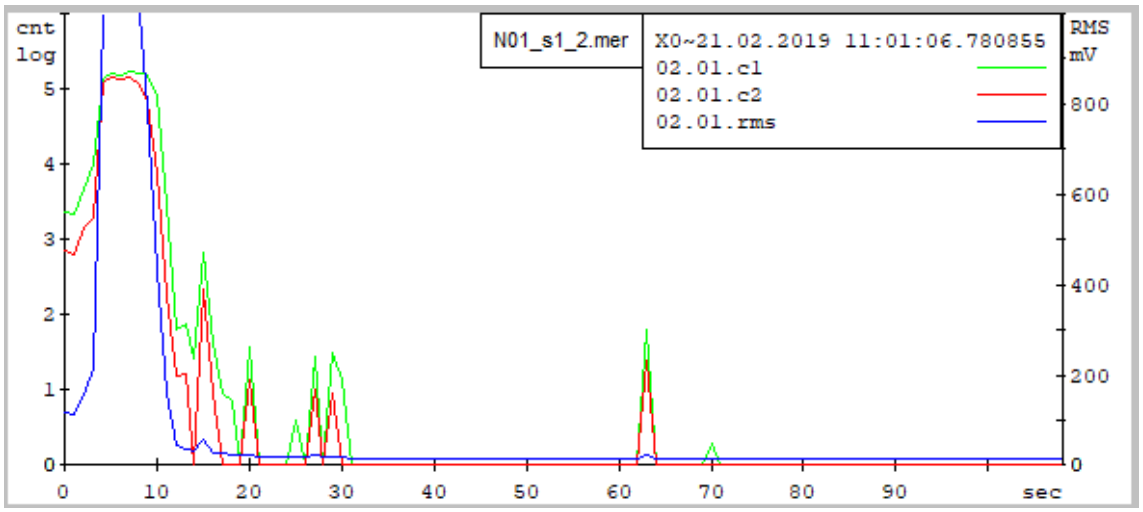
Během této relace měření aplikace nezaznamenala data ze vzorku K01_2.mer. Aplikace vytvořila pouze kořenovou složku, do které nenahrála žádné záznamy.



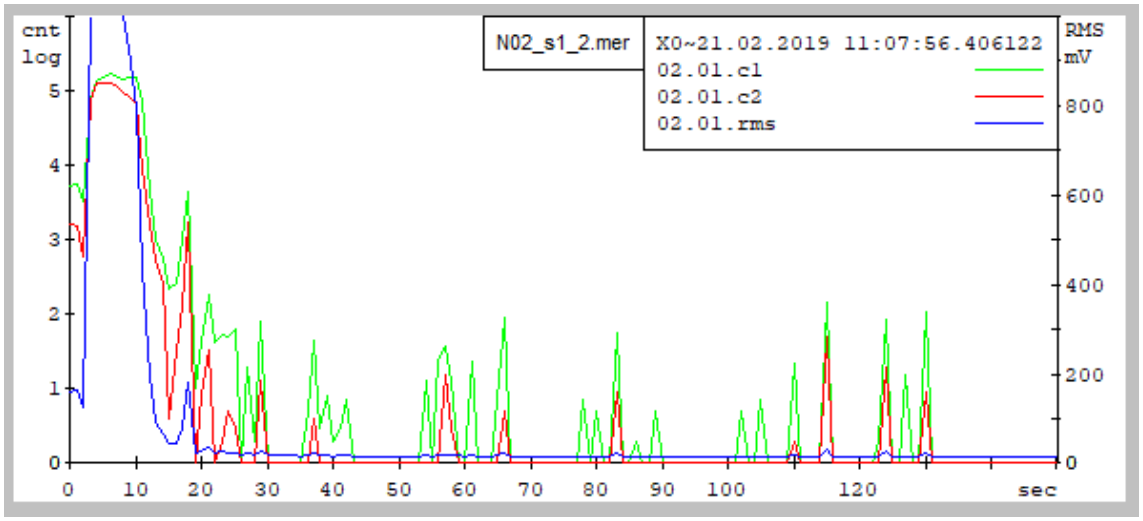
Graf č 12. Záznam AE v průběhu ochlazování do roztoku vody se solí, měření K02_s1_2.mer (zdroj: autor)



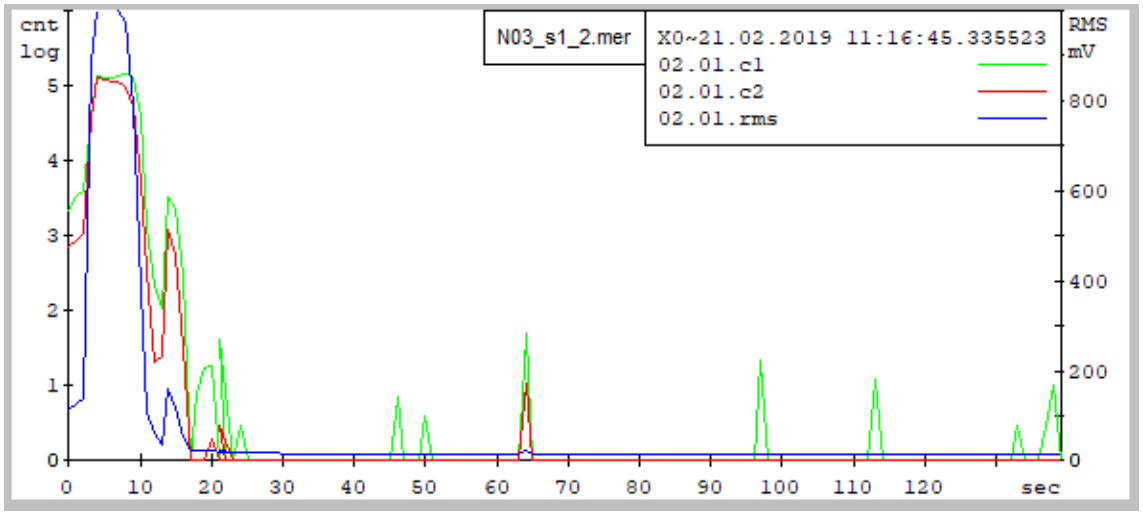
Graf č 13. Záznam AE v průběhu ochlazování do roztoku vody se solí, měření K03_s1_2.mer (zdroj: autor)



Graf č 14. Záznam AE v průběhu ochlazování do roztoku vody se solí, měření N01_s1_2.mer (zdroj: autor)



Graf č 15. Záznam AE v průběhu ochlazování do roztoku vody se solí, měření N02_s1_2.mer (zdroj: autor)

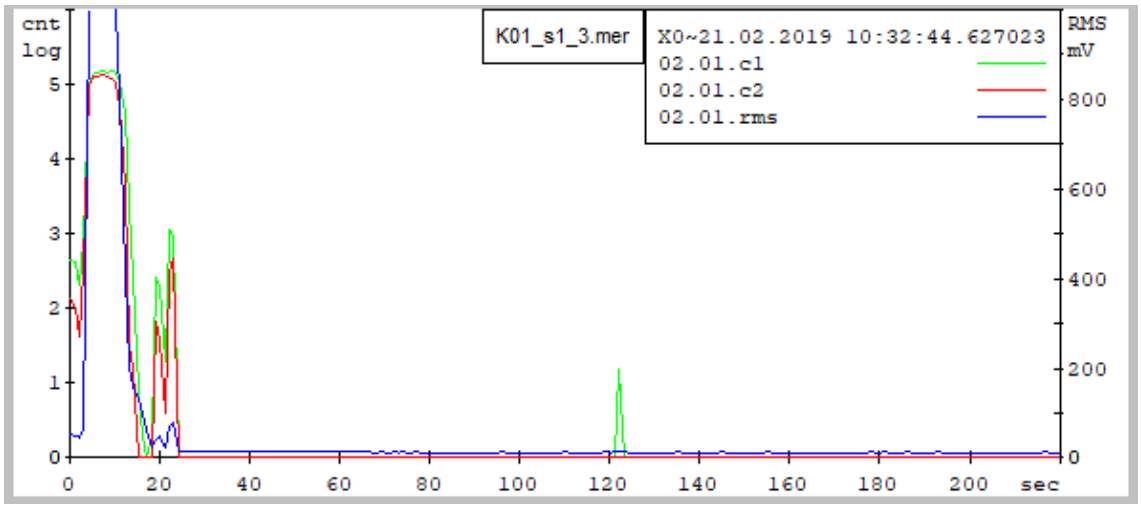


Graf č 16. Záznam AE v průběhu ochlazování do roztoku vody se solí, měření N03_s1_2.mer (zdroj: autor)

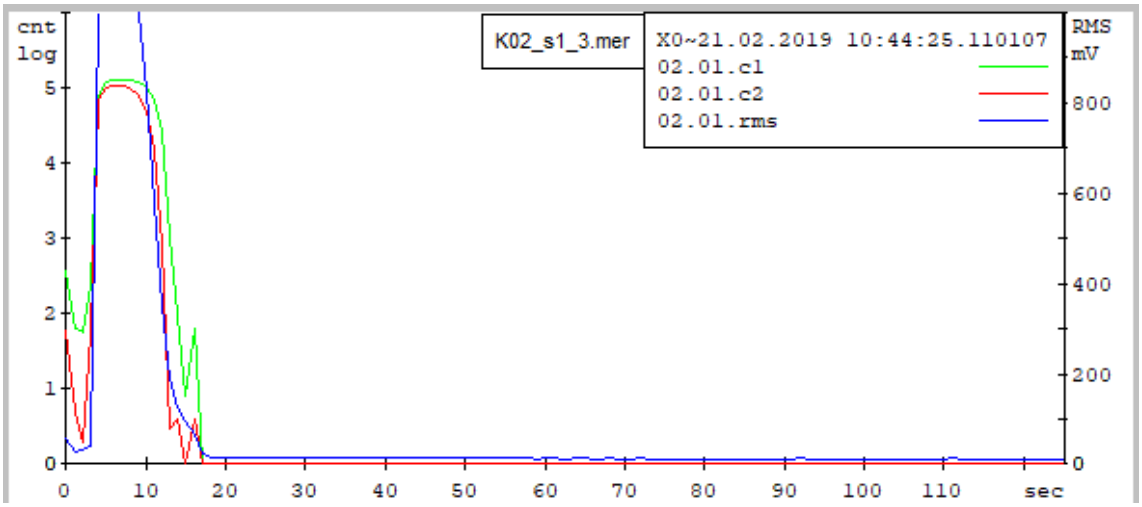
U třetí relace měření (grafy č. 17 až 21), tzn. znovu ohřátí v peci na 850 °C, výdrž na teplotě 15 min a po zašroubování zvukovodu prudké ochlazení do vody se solí u materiálu K (ocel ČSN 12 050), bylo pozorovatelné obecně velké snížení všech naměřených signálů. Nebyla nalezena ani žádná prodleva v intenzitě signálu během ochlazování, která by měla naznačovat martenzitickou přeměnu. Nejspíše je to způsobeno oduhličením povrchu. U vzorku z materiálu N (S235) byl signál oproti ostatním měřením potlačen jen mírně, za to se daleko více začal objevovat signál z narůstající koroze.

Obr. 36 – Koroze v závitu u vzorku K02 (materiál ČSN 12 050) (zdroj: autor)

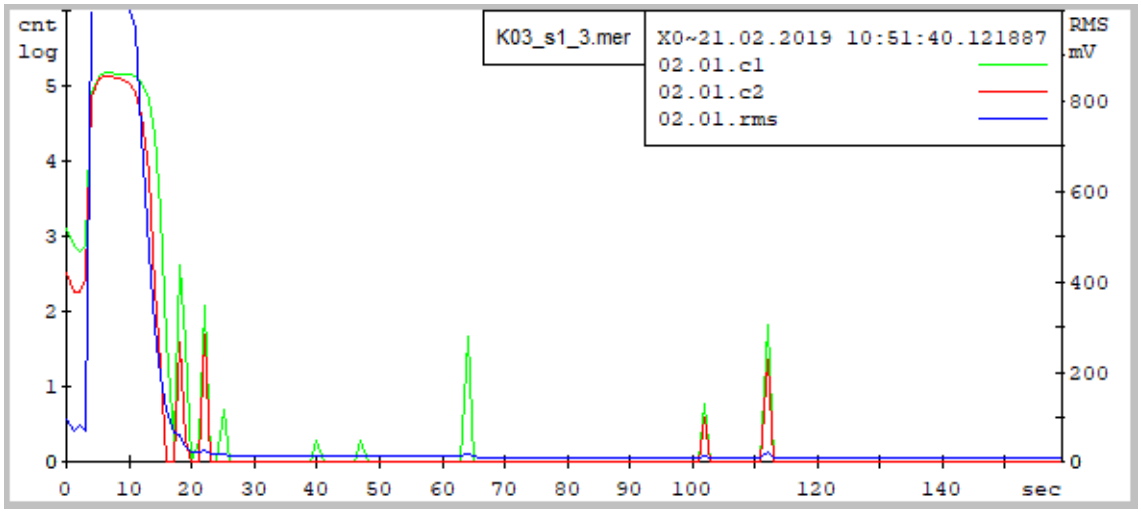
Obr. 37 – Oduhličení povrchu vzorků K01, K02 a K03 po třetím cyklu ochlazování (zdroj: autor*)*.



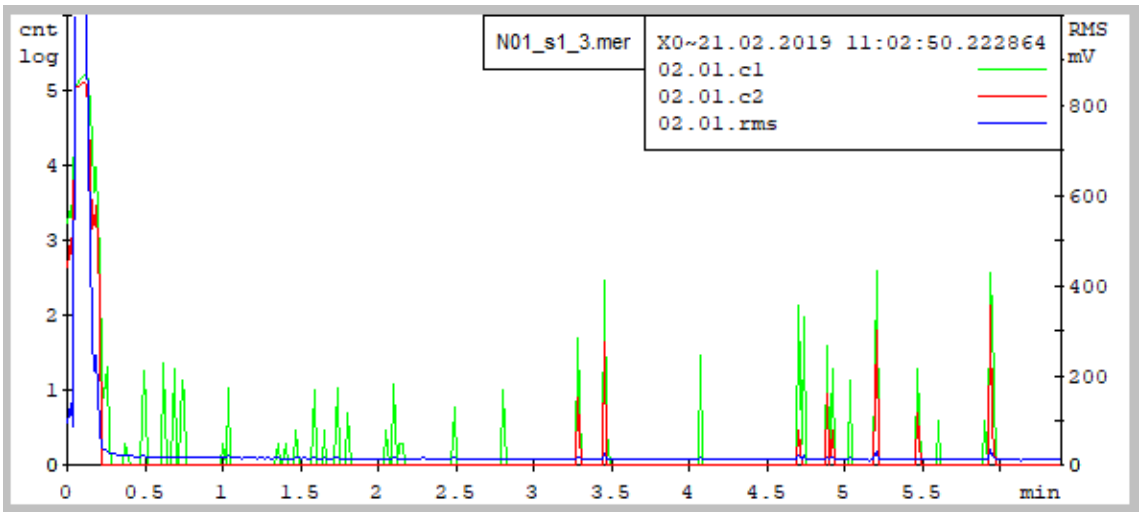
Graf č 17. Záznam AE v průběhu ochlazování do roztoku vody se solí, měření K01_s1_3.mer (zdroj: autor)



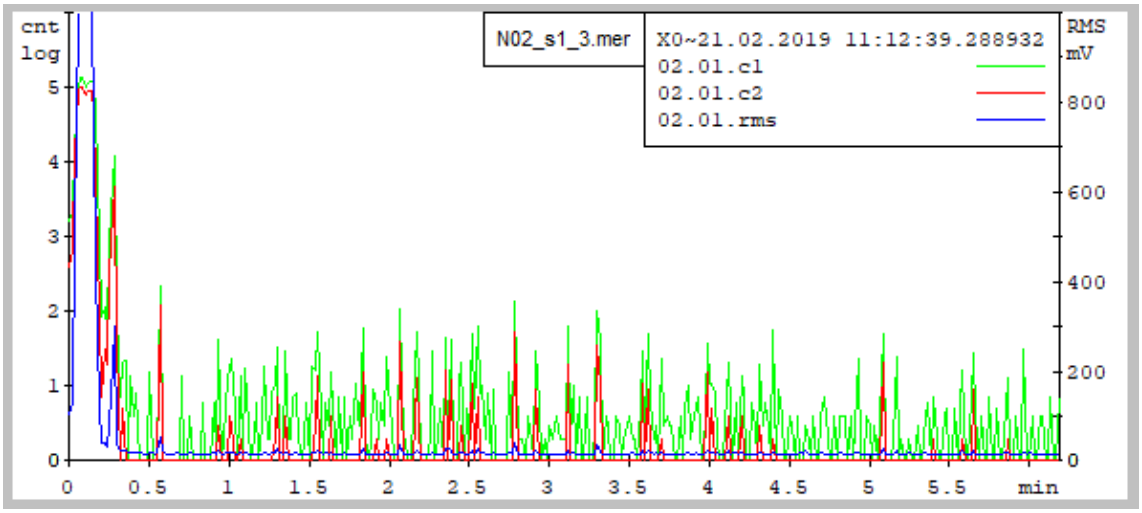
Graf č 17. Záznam AE v průběhu ochlazování do roztoku vody se solí, měření K02_s1_3.mer (zdroj: autor)



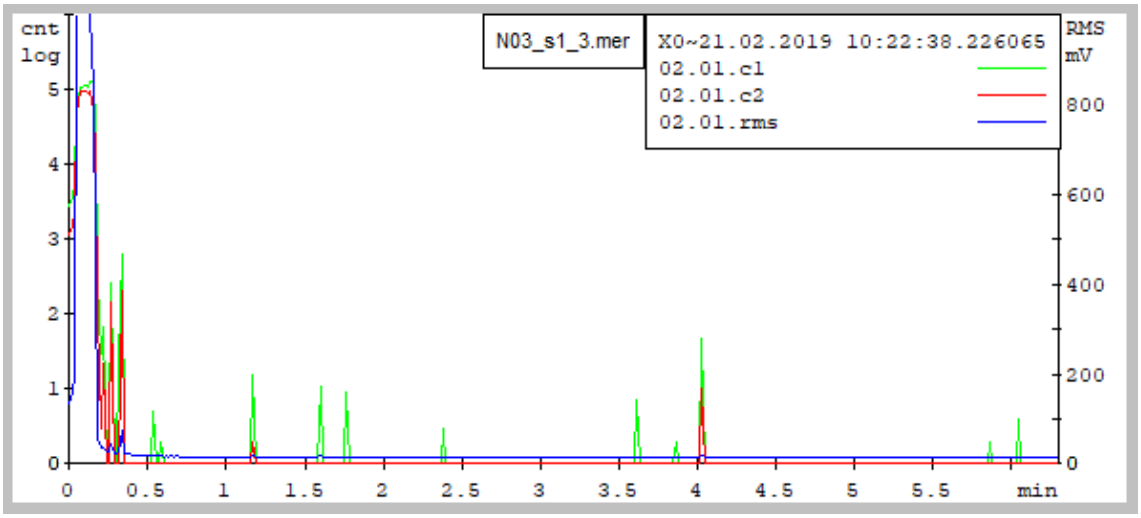
Graf č 18. Záznam AE v průběhu ochlazování do roztoku vody se solí, měření K03_s1_3.mer (zdroj: autor)



Graf č 19. Záznam AE v průběhu ochlazování do roztoku vody se solí, měření N01_s1_3.mer (zdroj: autor)



Graf č 20. Záznam AE v průběhu ochlazování do roztoku vody se solí, měření N02_s1_3.mer (zdroj: autor)



Graf č 21. Záznam AE v průběhu ochlazování do roztoku vody se solí, měření N03_s1_3.mer (zdroj: autor)

7.4 Kalení na vzduchu

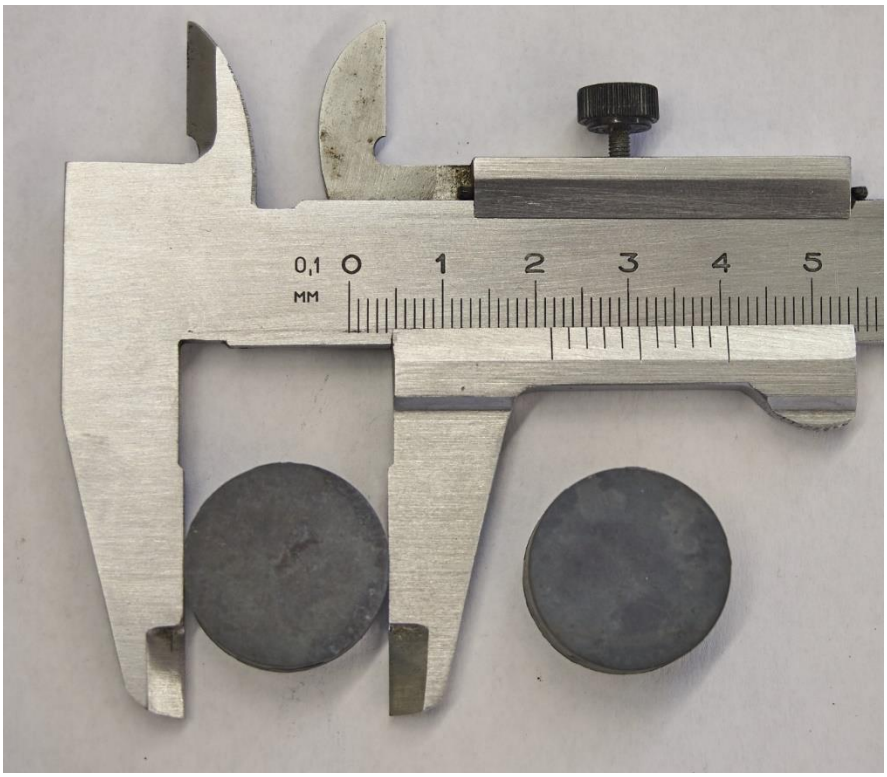
Pro kalení na vzduchu byly vybrány vzorky z materiálu ČSN 19 830, v této práci pod kódovým označením R. Vzorky byly tyče kruhového průřezu o průměru 30 mm a délce 60 mm opatřeny dírou se závitem M10. Dále byly vybrány vzorky z materiálu Sverker 21 od firmy Uddeholm ve tvaru kruhové tyče o průměru 21,5 mm a délce 9 mm. Tento materiál je v této práci kódově označen zkratkou Sv.

U materiálů kalitelných na vzduchu byl nutný předehřev. U vzorku R se jednalo o ohřátí v peci na teplotu 550 °C po dobu 20 min, dále ohřátí na teplotu 900 °C s výdrží na teplotě 10 min, následně byl vzorek ohřát na teplotu 1200°C a držen na této teplotě 10 min. Nahřátý vzorek byl vytáhnutý z pece za pomoci kovářských kleští, do vzorku byl našroubován zvukovod se snímačem a položen na šamotovou cihlu do místnosti s teplotou 20°C. Pozdějším měřením bylo zkoušeno více druhů zvukovodů.

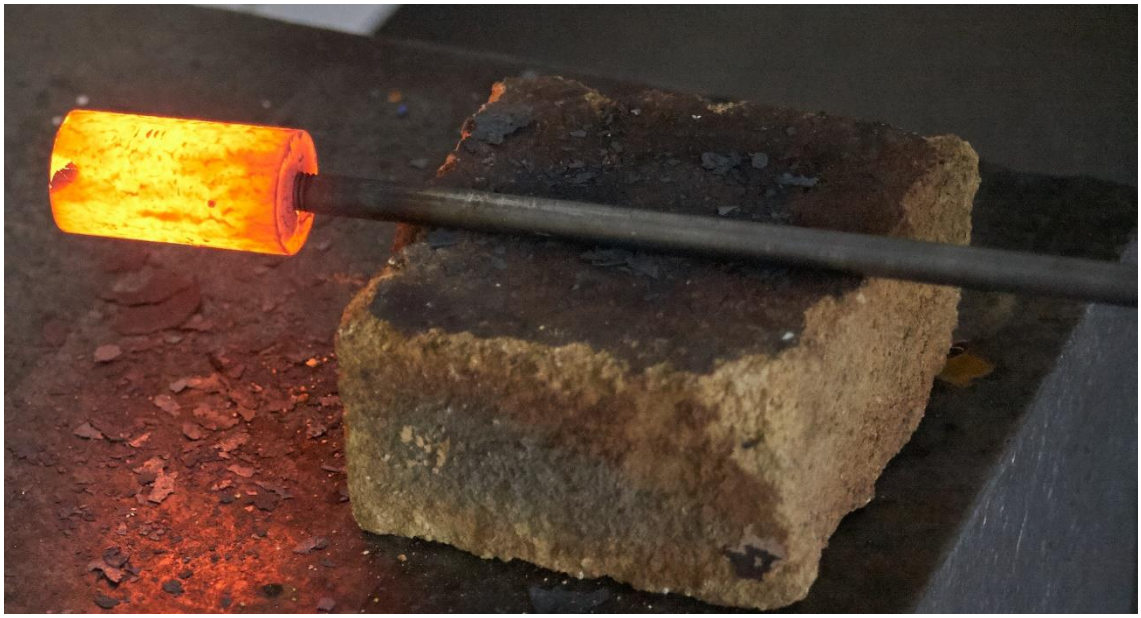
Materiál Sv byl ohřát v peci na teplotu 700 °C, na této teplotě byl držen 10 min, následně byl ohřát na teplotu 1080 °C a na této teplotě držen 33 min. U vzorků Sv byly použity různé druhy zvukovodů.

U vzorků kalených na vzduchu byla měřena teplota pomocí infračervené kamery značky Flir, a to pro popsání charakteristiky chladnutí a tím snadnější určení teploty martenzit start.

Obr. 38 – Rozložení měřící techniky (zdroj: autor)

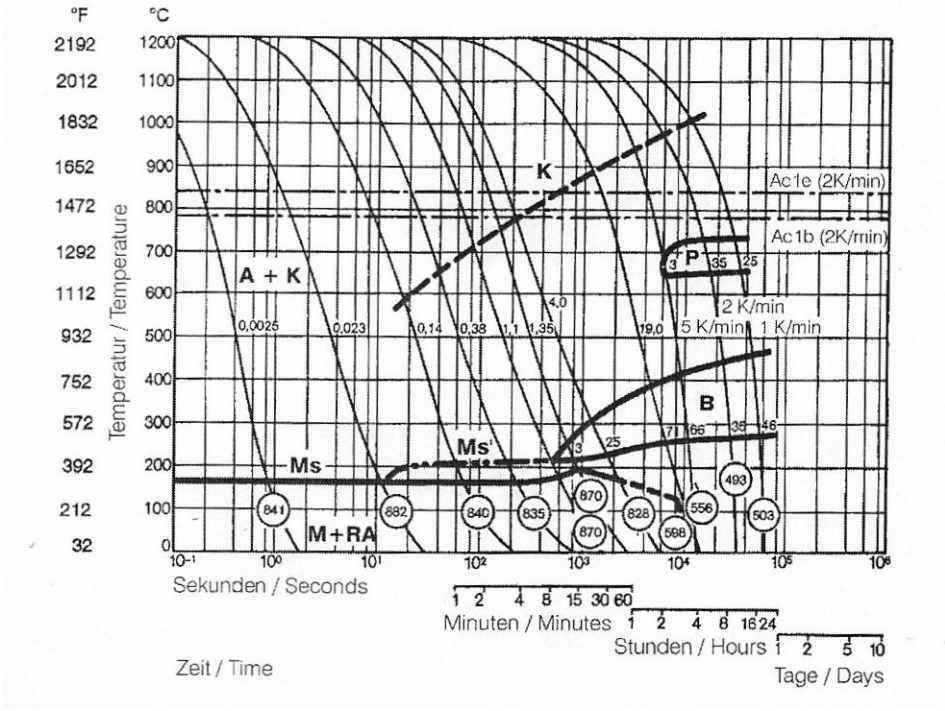


Obr. 39 – Vzorek z materiálu Sverker 21 od firmy Uddeholm po třech cyklech měření. (zdroj: autor)



Obr. 40 – Chladnoucí vzorek R01 čerstvě vytažený z pece (zdroj: autor)

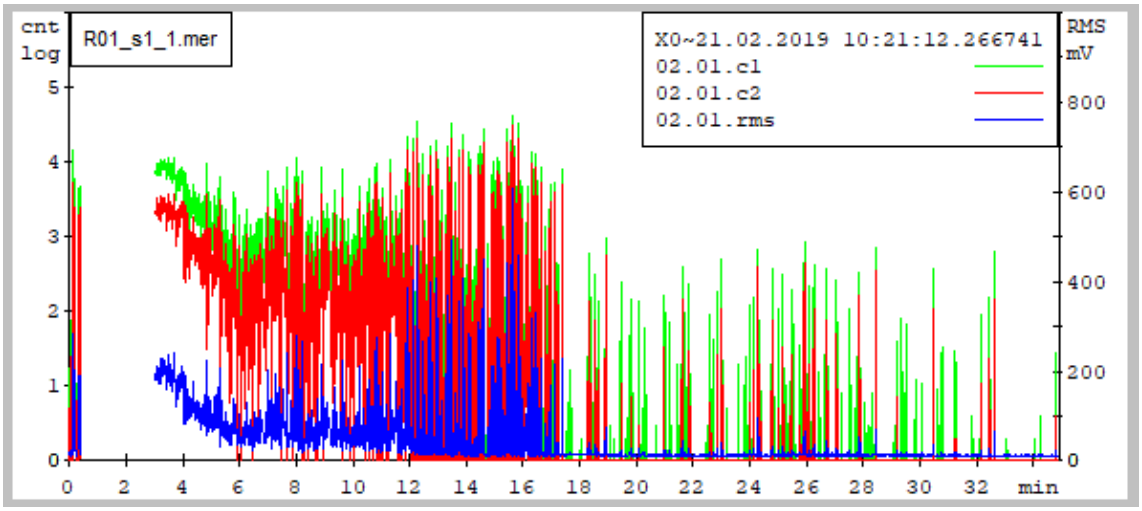
Chemische Zusammensetzung (Anhaltswerte in %) / Chemical composition (average %)									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	W	Co
0,89	0,25	0,25	0,019	0,010	4,13	4,75	1,82	6,12	4,62



Obr. 41 – Chemické složení a IRA diagram materiálu ČSN 19 830. Obrázek převzat z katalogového listu firmy Böhler.
Zdroj: https://www.uddeholm.com/czech/cs/products/uddeholm-sverker-21/ *[2020. 07. 14]*

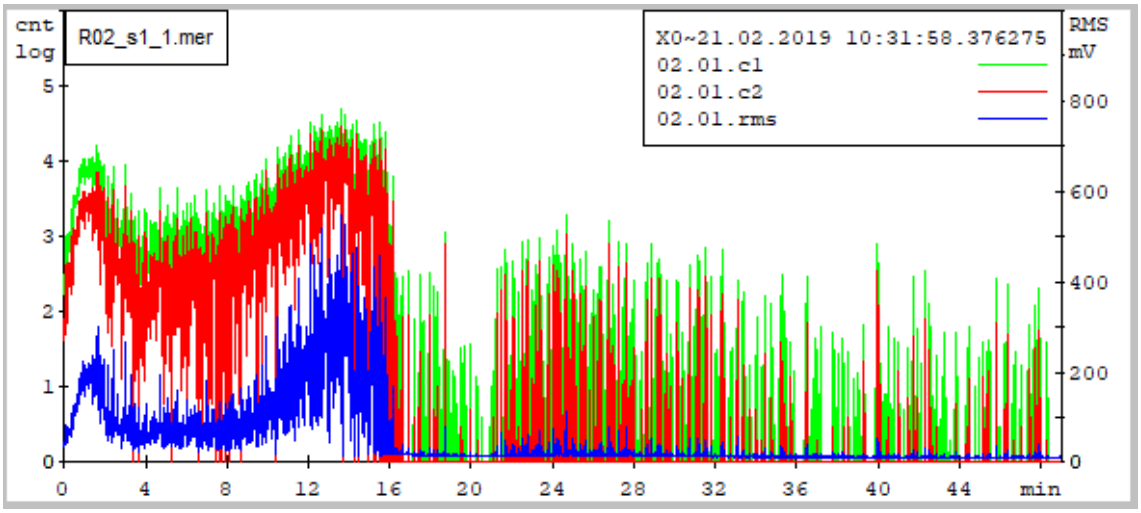
Obr. 42 – Oduhličený vzorek R01 (zdroj: autor)

U prvního cyklu kalení materiálu R je vidět podobný trend ochlazování, což ukazuje graf č. 22 a č. 23. Na začátku ochlazování je signál AE silný; způsobený je velkým odvodem tepla do prostředí a změnou rozměru závitu po našroubování zvukovodu s teplotou místnosti. Od čtvrté minuty chlazení jde i pouhým uchem slyšet výrazné praskání způsobené silným oduhličením povrchu vzorku. Toto oduhličení způsobuje odlupování povrchu a odlétávání kousků materiálu do okolí. V cca desáté minutě chladnutí teplota povrchu vzorku dosáhla na teplotu martenzit start (210 °C). Je zde vidět konstantní nárůst signálu. Bezprostředně po změně překrystalizace je signál slabší. Ke konci měření jsou měřitelné jen krátké impulzy způsobené odlupováním povrchu.



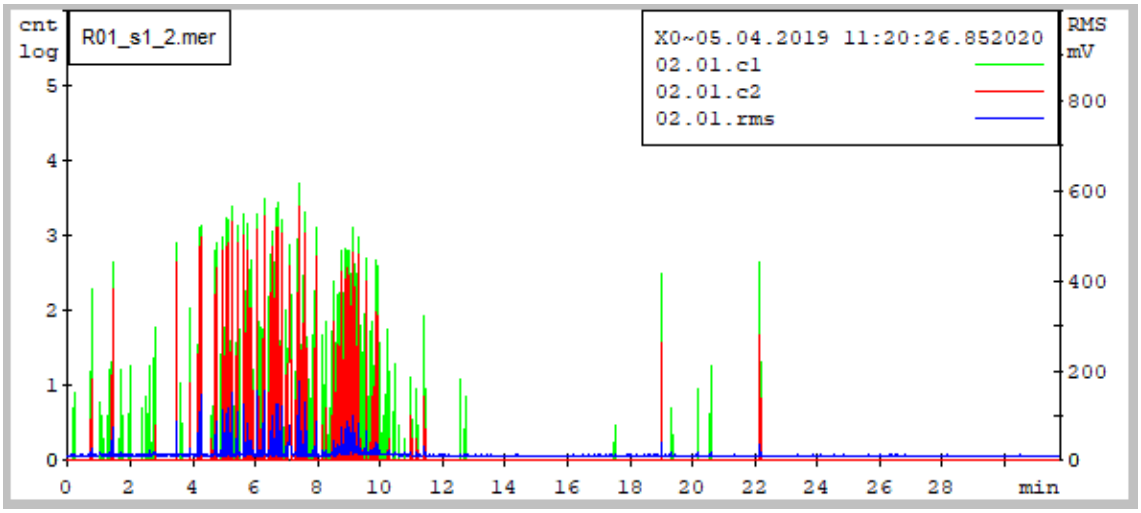
Graf 22. Záznam AE vzorku R01 chlazeného na vzduchu s přišroubovaným zvukovodem v prvním cyklu ohřátí. (zdroj: autor)

Na grafu č. 22 je vidět absence záznamu z počátku měření, tato chyba byla zapříčiněna povytaženým konektorem RJ45 posílající signál z měřícího zařízení Dakel XEDO do počítače.



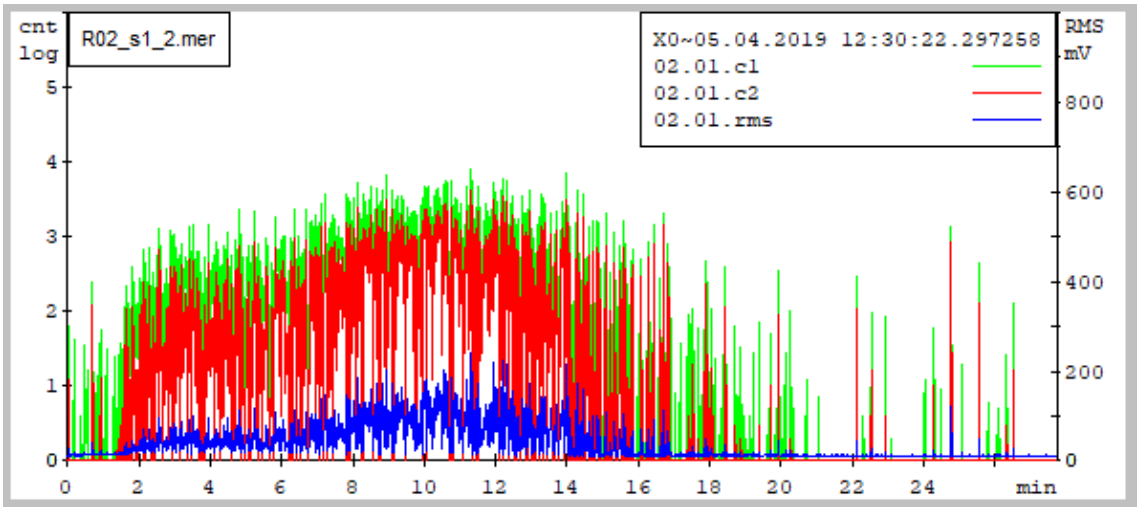
Graf 23. Záznam AE vzorku R02 chlazeného na vzduchu s přišroubovaným zvukovodem v prvním cyklu ohřátí.

Na grafech č. 24 a 25 popisujících druhý cyklus kalení vzorků R01 a R02 je pozorován obdobný trend AE způsobený chlazením vzorků jako u předcházejících grafů. Změna oproti minulému měření je snížení signálu z počátku měření a také obecně utlumení síly signálu. Není zde ani znatelná mezera snížení síly signálu při dosažení teploty martenzit start; opět zhruba v desáté minutě záznamu.



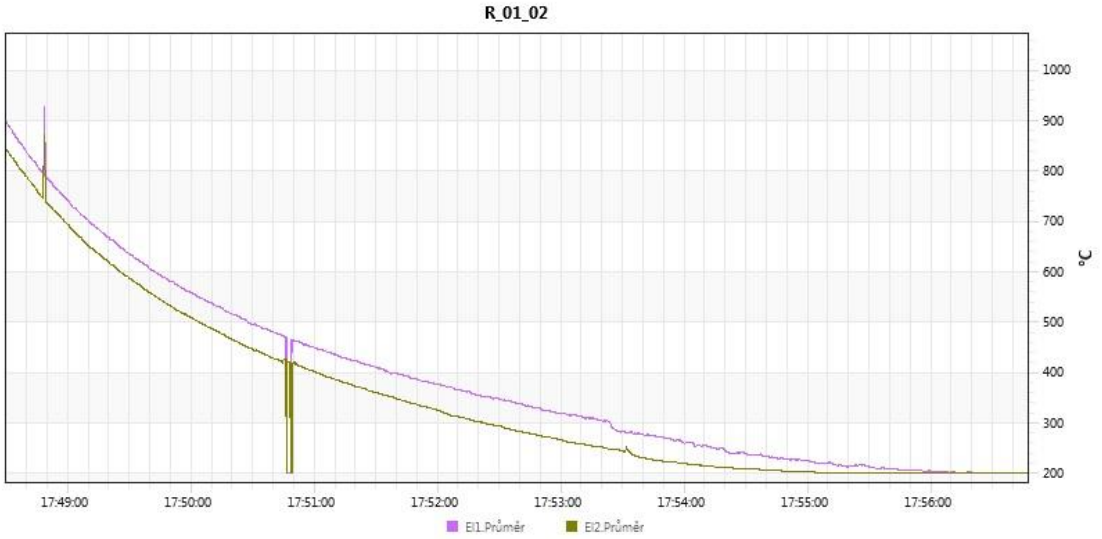
Graf 24. Záznam AE vzorku R01 chlazeného na vzduchu se zasunutým zvukovodem v druhém cyklu ohřátí. (zdroj: autor)

Na grafu č. 24 u vzorku R01 při druhém cyklu ochlazování je obecné snížení počtů signálů. To je způsobeno nevhodnou aplikací zvukovodu. Po opětovném zahřátí se v materiálu ČSN 12 050 zdeformoval závit a nebylo možné zvukovod řádně přišroubovat. Podařilo se ho pouze lehce zasunout. Ani při dodatečné úpravě zvukovodu, zabroušení závitu do špičky a dalších opakování měření, nebylo možné zvukovod do žádného vzorku z materiálu ČSN 12 050 zašroubovat.

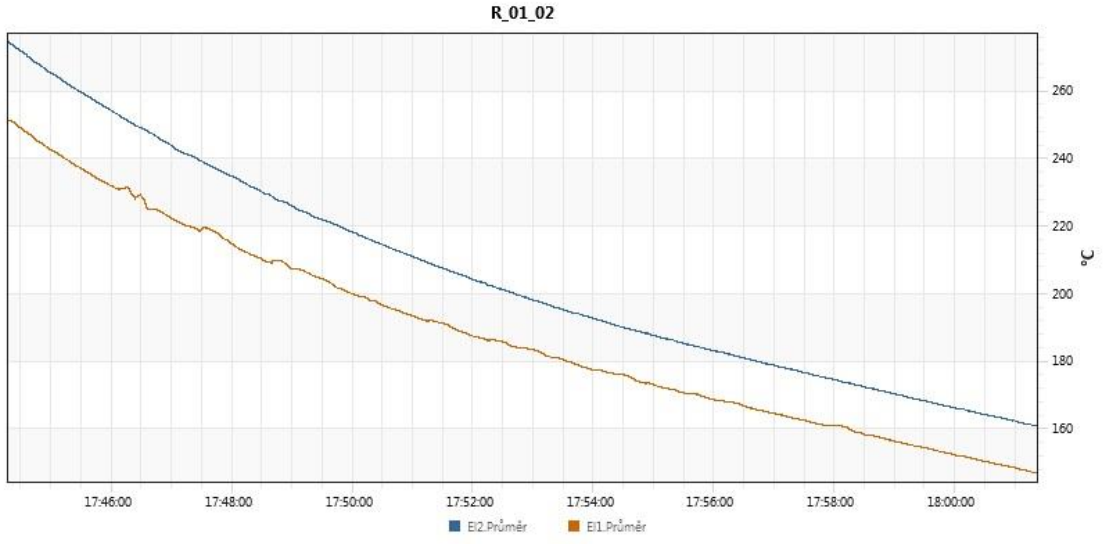


Graf 25. Záznam AE vzorku R02 chlazeného na vzduchu s přišroubovaným zvukovodem v druhém cyklu ohřátí (zdroj: autor)

Charakteristika chladnutí byla změřena infračervenou kamerou značky Flir. Kamera byla online připojena k počítači a pořizovala video záznam z celé doby ochlazení. Následně byl pak vygenerován graf chladnutí. Kamera pracovala ve dvou rozsazích měřitelných teplot. V prvním měla rozsah snímání 200 °C až 2000 °C, v druhém nastavení měla měřitelný rozsah mezi 0 °C až 600 °C. Z tohoto důvodu jsou vždy pro jedno měření dva grafy popisující charakteristiku chlazení. Zároveň má každý graf definovanou jinou míru emisivity, která byla kalibrována u vzorků bezprostředně vytažených z pece. Podle teploty termočlánku v peci byla nadefinována potřebná emisivita rozžhaveného vzorku. Grafy 26 a 27 byly vytvořeny v programu FlirTools.



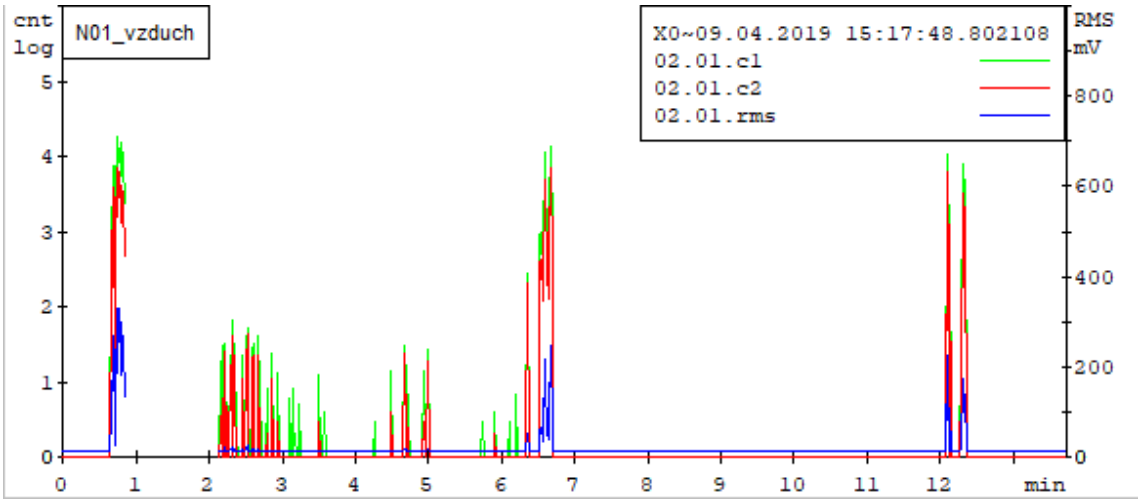
Graf 26. Záznam z termokamery Flir. Chlazení vzorku R01 – hnědá křivka a vzorku R02 – růžová křivka. Zvolená emisivita byla 0,65. (zdroj: autor)



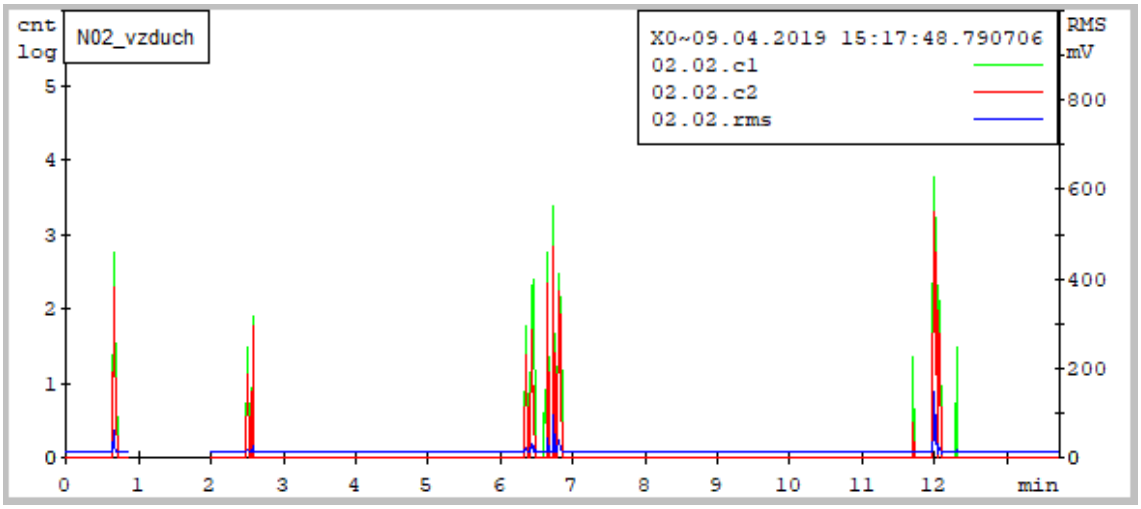
Graf 26. Záznam z termokamery Flir. Chlazení vzorku R01 – hnědá křivka a vzorku R02 – modrá křivka. Zvolená emisivita byla na 0,95. (zdroj: autor)

Jako kontrolní vzorek pro kalení na vzduchu byly použity vzorky z cyklu kalení do vody, a to vzorky N01 a N02 (materiál S235). Jednalo se o jejich čtvrtý cyklus zchlazování. Vzorky byly ohřáty v peci na teplotu 850 °C, na této teplotě drženy 10 min a ochlazeny na vzduchu. U vzorku N01 byly použity jako zvukovod samosvorné kleště. U vzorku N02 byla použita jako zvukovod litinová svěrka. V grafech č. 26 a 27 je záznam AE z ochlazení výše zmíněných materiálů. Po první minutě měření nastal výpadek záznamu, bylo to způsobeno neznámou chybou a zavřením aplikace Deamon. Na grafech jsou zaznamenány jen impulzy zapříčiněné odlupováním povrchu vzorku způsobeným oduhličením.

V dalších testováních vzorků R01 a R02 při různých zvukovodech se nedochovala žádná data, vždy se při měření program neočekávaně zavřel, nebo neuložil zobrazovaná data. Z více testovacích měření bylo zjištěno, že litinová svěrka jako druh zvukovodu se pro tyto aplikace nehodí kvůli svému vysokému akustickému útlumu.

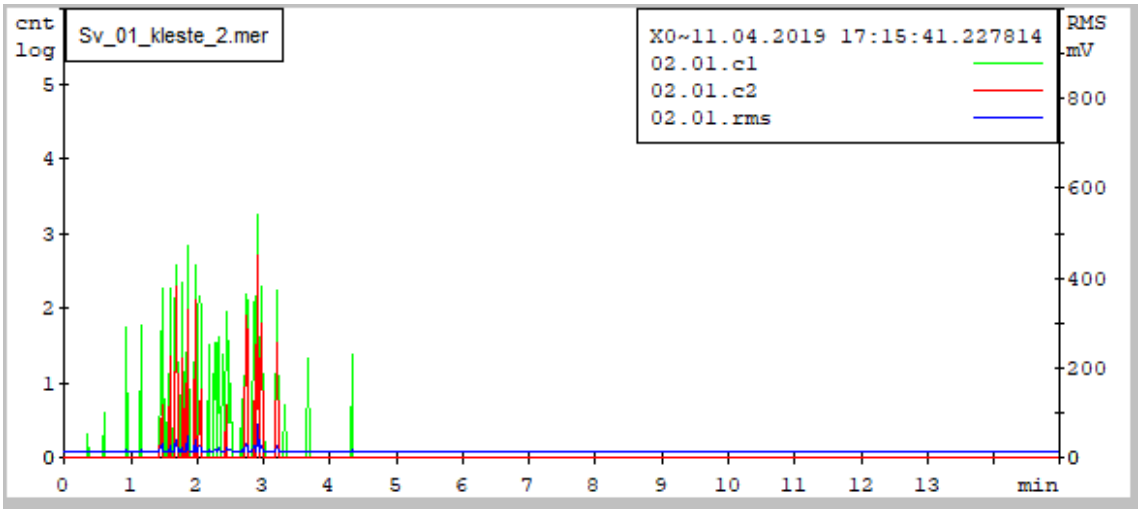


Graf 28. Záznam AE vzorku N01 chlazeného na vzduchu, použitým zvukovodem byly samosvorné kleště. Čtvrtý cyklus ochlazení materiálu. (zdroj: autor)

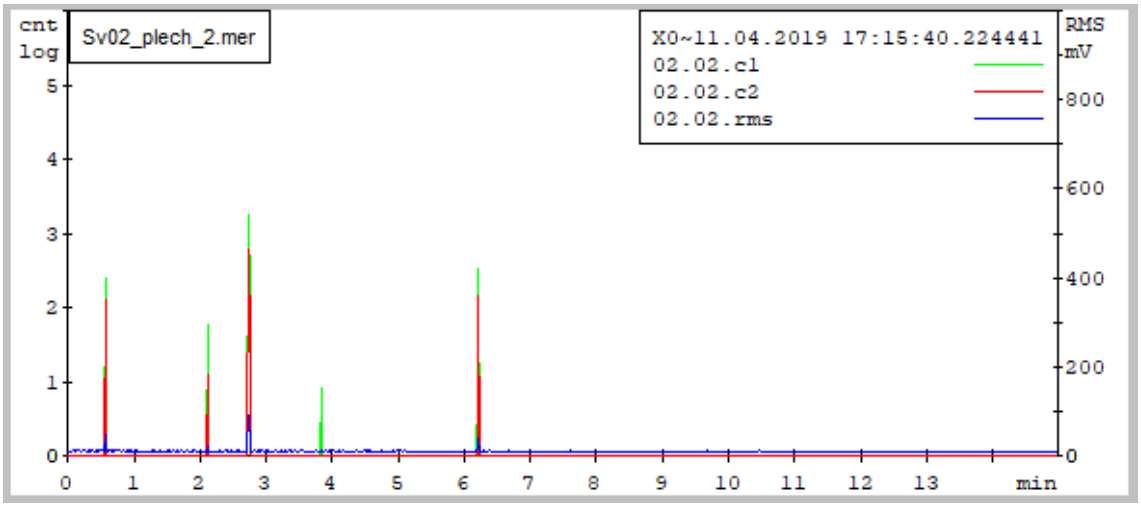


Graf 29. Záznam AE vzorku N02 chlazeného na vzduchu, použitým zvukovodem byla litinová svěrka. Čtvrtý cyklus ochlazení materiálu. (zdroj: autor)

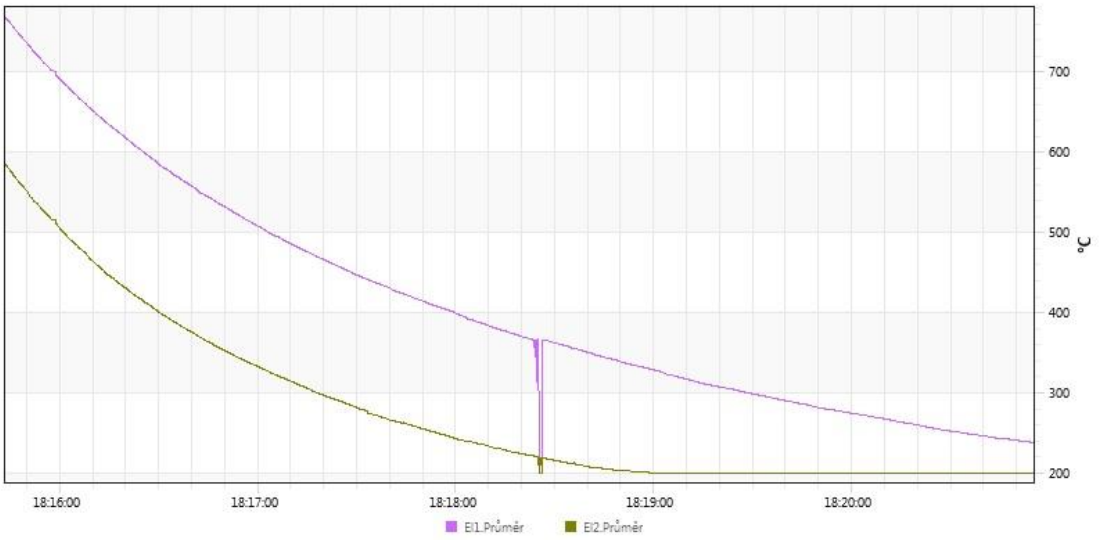
Pro další měření byly zvoleny vzorky z materiálu Sverker 21 od firmy Uddeholm. Hledán byl materiál, který je kalitelný na vzduchu a má menší teplotu pro rozpouštěcí žíhání, tudíž bude méně náchylný na oduhličování, respektive popraskání povrchu vzorku, a tím dojde ke snížení rušivých akustických signálů. První cyklus měření se v programu Deamon nezaznamenal. Uložily se jen záznamy z druhého cyklu ochlazování, který je podle online sledování záznamu AE o zhruba 50mV v RMS slabší. V průběhu ochlazování byla křivka obdobná. Graf č. 31 popisuje chlazení vzorku Sv02 na vzduchu. Vzorek byl položen na nerezovou destičku, která byla použita jako zvukovod. Nicméně tento způsob přenosu zvuku nefungoval optimálně z důvodu špatného kontaktu vzorku s podložkou. Na vzorku se vytvořily uhlíkové okuje, a tím vzorek od podložky nadzvedly. Přes zmíněné okuje se akustický signál šířil velmi špatně. Tento materiál má teplotu martenzit start pro takto rychlé ochlazování okolo 170 °C. Dle záznamu termokamery na dané teplotě nebyl zaznamenán žádný signál AE. Vzorek Sv02 se ochlazoval rychleji než vzorek Sv01 kvůli použitému zvukovodu. Samosvorné kleště obepnuly vzorek a fungovaly jako chladič.



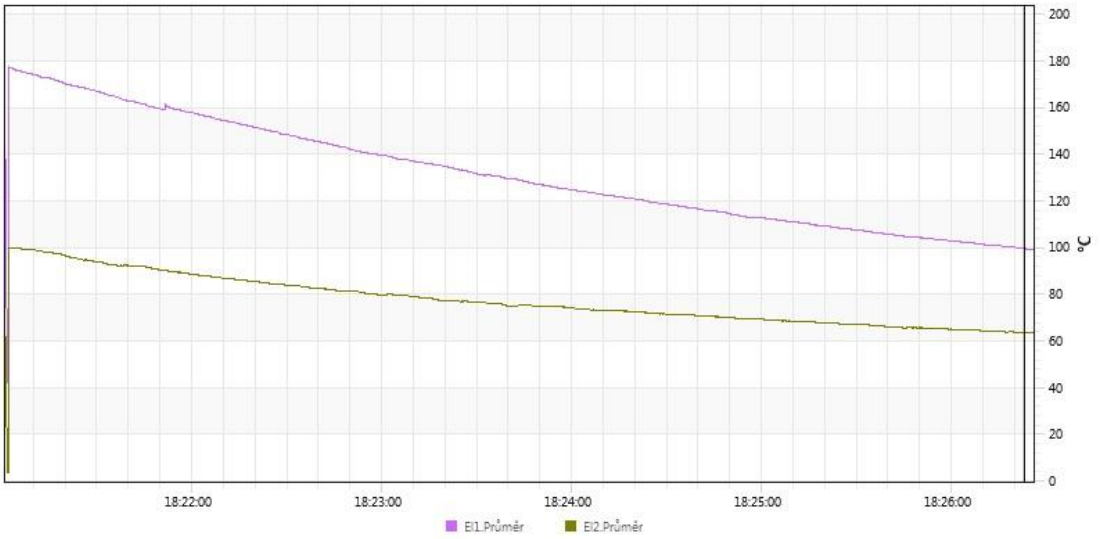
Graf 30. Záznam AE vzorku Sv01 chlazeného na vzduchu, použitým zvukovodem byly samosvorné kleště. Druhý cyklus ochlazení materiálu (zdroj: autor)



Graf 31. Záznam AE vzorku Sv02 chlazeného na vzduchu, použitým zvukovodem byl nerezový plech. Druhý cyklus ochlazení materiálu (zdroj: autor)

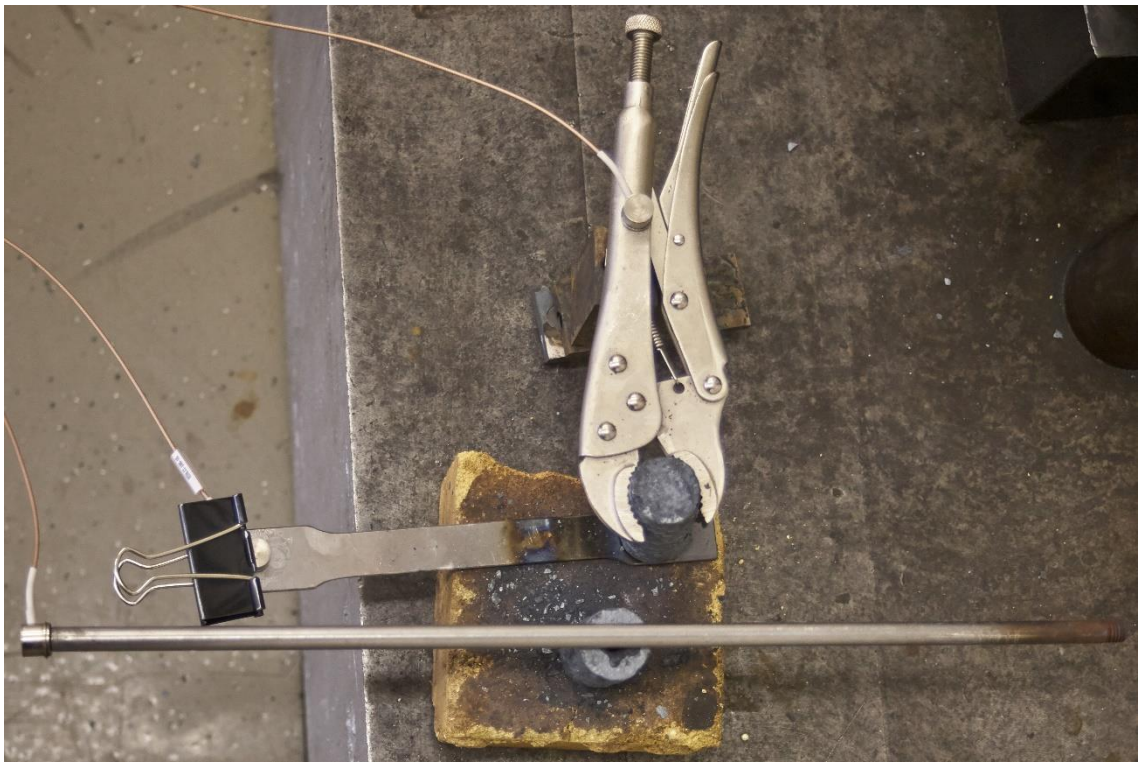


Graf 32. Záznam z termokamery Flir. Chlazení vzorku Sv01 – hnědá křivka a vzorku Sv02 – růžová křivka. Zvolená emisivita byla na 0,95. Graf vytvořen v programu FlirTools (zdroj: autor)

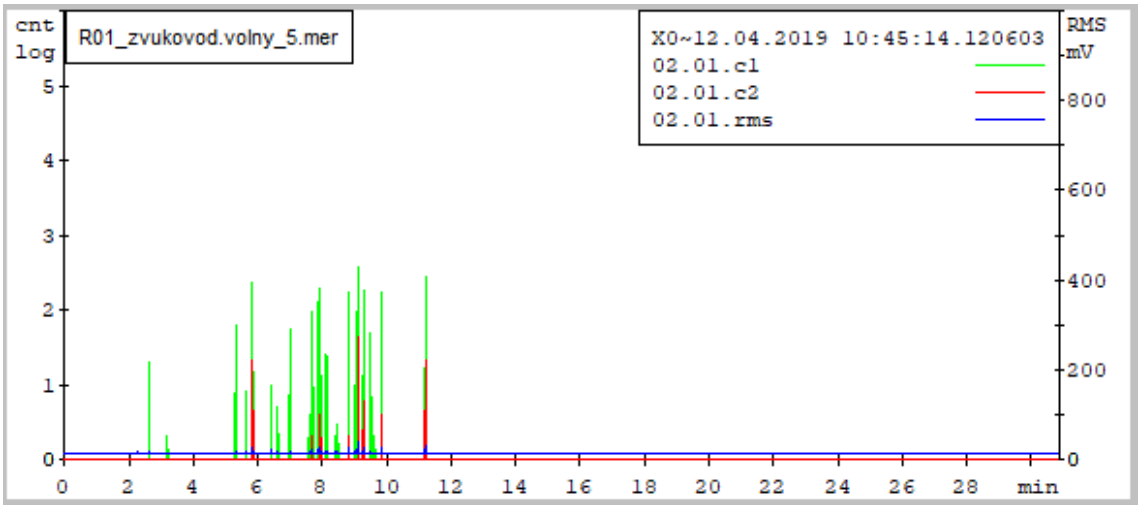


Graf 33. Záznam z termokamery Flir. Chlazení vzorku Sv01 – hnědá křivka a vzorku Sv02 – růžová křivka. Zvolená emisivita byla na 0,95. Graf vytvořen v programu FlirTools (zdroj: autor)

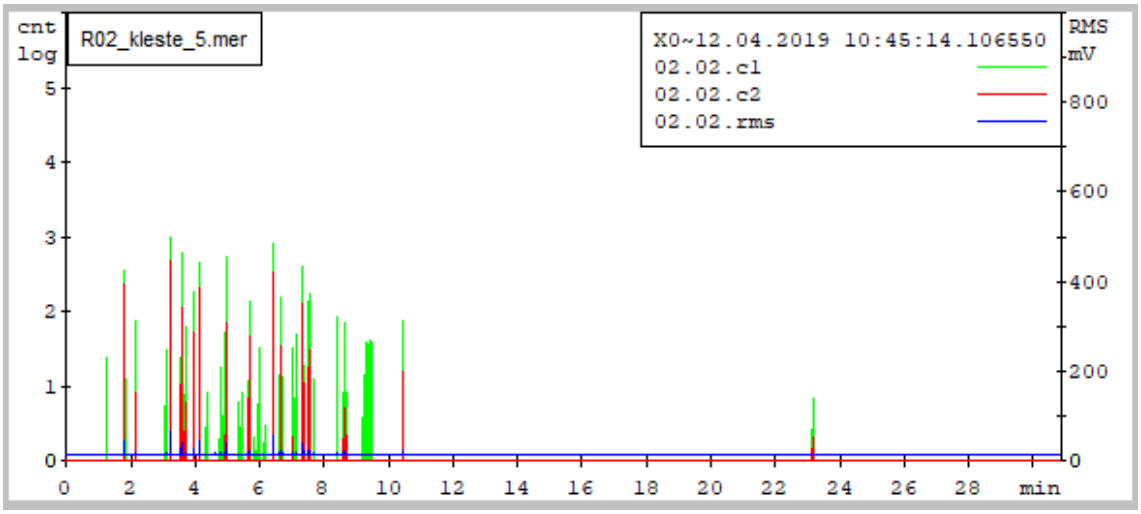
V další části měření byly použity vzorky z materiálu ČSN 19 830. Z důvodu velké deformace v oblasti závitu způsobené opětovným ohřevem a ochlazením nebylo možné do vzorku zašroubovat zvukovod. Proto byl použit u vzorku R01 zvukovod v podobě kruhové tyče, položenou volně na vzorek. Vzorek R02 byl položen na nerezový plech a upnut do samosvorných kleští; i když se jednalo už o pátý cyklus ohřátí vzorku, stále se povrch velmi oduhličoval a během chlazení se povrch vzorku loupal. Síla i počet signálů se oproti prvnímu měření velmi zmenšily. Bylo to způsobeno nejspíše oduhličením vzorku a absencí závitu v materiálu. V desáté minutě chladnutí, kde by dle termokamery měla povrchová teplota vzorku dosahovat 210 °C a tím by i měla začít martenzitická přeměna, nebyl změřen žádný signál AE.



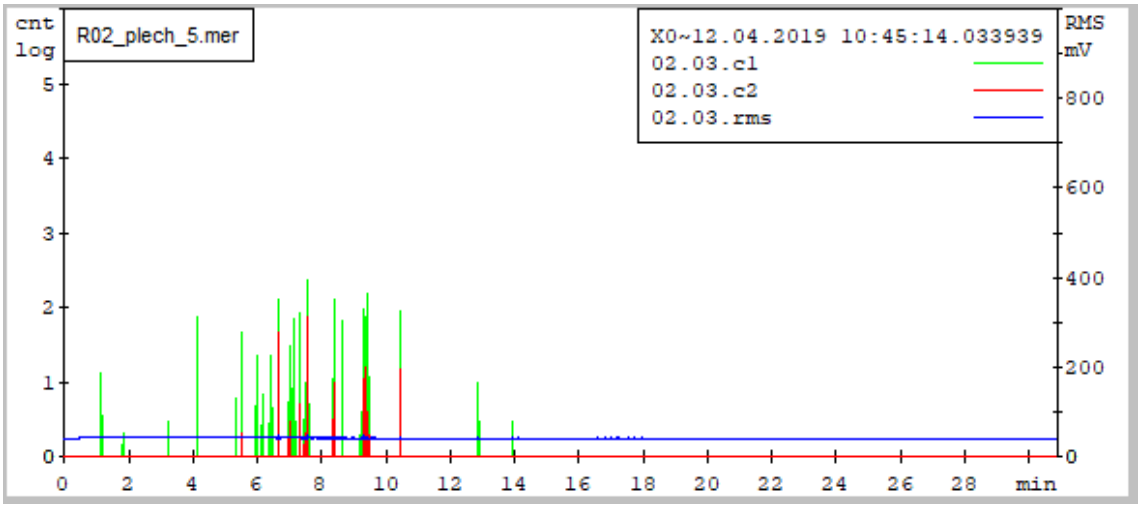
Obr. 43 – Umístění zvukovodů a snímačů pro vzorky R01 a R02 při pátém cyklu ochlazování. (zdroj: autor)



Graf 34. Záznam AE vzorku R01 chlazeném na vzduchu s volně položeným zvukovodem v pátém cyklu ohřátí. (zdroj: autor)



Graf 35. Záznam AE vzorku R02 chlazeném na vzduchu se samosvornými kleštěmi jako zvukovodem v pátém cyklu ohřátí. (zdroj: autor)



Graf 36. Záznam AE vzorku R02 chlazeném na vzduchu s nerezovým plechem jako zvukovodem v pátém cyklu ohřátí. (zdroj: autor)

Obr. 44 – Povrch vzorku R01 a R02 po pátém cyklu ochlazování (zdroj: autor)

8 Diskuze výsledků

Tématu zvukové emise zatím nebyla věnována v akademické oblasti velká pozornost, proto zatím není k dispozici větší množství výzkumných zdrojů. V tuzemské literatuře k tématu pozorování AE u tepelného zpracování ocelí byl nalezen jen jeden autor z roku 2016 Aleš Mazal se svou diplomovou prací Performace rychlosti martenzitické transformace při snímání silových akustických impulsů. Tato Mazalova práce byla výchozím zdrojem předkládané bakalářské práce. Autor používal metrové zvukovody, které do zkušebního vzorku lisoval s přesahem, který pak pojistil proti povolení letováním, resp. svařováním. Tento způsob se z podstaty zadání předkládané bakalářské práce nejevil vhodný, jelikož jedním z cílů práce je objevit nejvhodnější variantu, jak univerzálně zajistit akustickou vazbu mezi horkým materiálem a snímačem AE. Dalším z cílů bylo nalézt zvukovod, který by byl demontovatelný. Školní pec by ani neumožňovala zajistit tak vysoké teploty ohřevu s takto příliš dlouhým zvukovodem. Ing. Mazal pro práci s daty používal software Matlab. V předkládané práci bylo využíváno programové sady DeaShow od výrobce měřícího zařízení. Pro potřeby bakalářské práce zcela dostačovalo vyhodnocovat hodnoty counts a marse. V případě rozsáhlejšího výzkumu, jak v počtu změřených vzorků, tak i pro pokročilejší statistické výpočty, by bylo zvolení software Matlab vhodnější.

V průběhu měření bylo zjištěno několik faktorů, které mohly ovlivňovat výsledky měření. Kalící medium není vhodné jako přenašeč AE způsobené kalením. Využití závitů u zvukovodů také není vhodné, zejména pro opakované měření – závit se začne vlivem teplotních změn deformovat a může do měření vnést falešné signály způsobené smršťováním materiálu během ochlazování. V průběhu měření se bohužel nebylo možné vyvarovat několika chyb. Nebude-li brán ohled na samotnou spolehlivost měřícího zařízení, tak ve dvou případech bohužel došlo k překročení času o několik minut u nahřívání vzorku, kvůli nastavování parametrů v softwaru. Je však málo pravděpodobné, že by tato skutečnost zásadním způsobem změnila výsledky měření. Dále bylo velmi náročné našroubovat zvukovod do rozžhaveného vzorku, což znesnadňovalo měření a způsobovalo někdy delší časovou prodlevu.

Pro zlepšení postupu měření by bylo lepší využít jiné materiály – objemově větší vzorky, které by byly kalitelné na vzduchu při co nejnižší teplotě. Jako zvukovod v podobě samosvorných kleští by bylo vhodné použít co nejtvrdší materiál, vyrobený z co nejméně částí. Součástí zvukovodu by mohlo být také žebrování pro snazší chlazení. K těmto zidealizovaným kleštím by mohl být připevněn termočlánek, který by orientačně určoval povrchovou teplotu měřeného vzorku a zvukovodu. Tato informace by byla vhodná jak k ochraně snímače proti poškození, tak by mohla sloužit jako dodatečná informace pro snazší identifikaci martenzitické přeměny – při znalosti IRA diagramů pro určitý materiál.

Celkový přínos této bakalářské práce spočívá v nalezení možnosti, jak AE emisi u tepelného zpracování ocelí měřit. Práce popisuje, jak se vyvarovat právě „slepým uličkám“, a tím zjednodušit případný výzkum, který by se účelně věnoval strukturálním transformacím u daného materiálu. Dále se práce zabývá nalezením takového zvukovodu, který neničí měřený vzorek.

9 Závěr

Měření akustické emise během tepelného zpracování není jednoduchá disciplína. Interpretace naměřených dat je ještě mnohem náročnější vzhledem k možnému zásahu proměnných z okolního prostředí (např. tepelná roztažnost, ruchy z bezprostředního okolí).

Obecně byl u všech vzorků zaznamenán trend postupného klesání počtů signálů, zeslabování signálu AE při opakovaných cyklech ochlazování vzorků. V průběhu měření se snižovala intenzita signálu u všech opakovaně měřených vzorků, jak na délce, tak intenzitě signálu. Je možné, že by mohlo jít o důsledek procesů spojených s oduhličením povrchu.
U prvních měření bylo možné hledanou martenzitickou přeměnu zachytit. Toto zjištění nám částečně potvrdily IRA diagramy s informací o době chladnutí.

Zajímavé bylo, že všechny kontrolní vzorky z materiálu S235 nešly po ochlazení ze zvukovodu téměř odšroubovat. Všechny ostatní vzorky z kalitelných materiálů šly odšroubovat velmi lehce rukou. Nejspíše difundovaný uhlík z materiálu fungoval v závitu jako mazivo.

Existuje mnoho vlivů, které měření AE mohou ovlivnit. V našem případě mezi tyto vlivy patří umístění zvukovodu, hloubka závitu, drsnost závitu, výskyt povrchové koroze nebo míra předepnutí závitu či kleští. Nelze opomenout tepelnou roztažnost i přítomnost různých ruchů z okolního prostředí.

Pro kalení do vody není vhodné používat vodu jako přenašeč AE indukované při tepelném zpracování ocelí. Voda pro tyto účely má velký akustický útlum zejména u vyšších frekvencí. Navíc při ponoření horkého vzorku do vody okamžitě vznikne silný šum způsobený přeměnou vody na vodní páru. Z praktických hledisek je toto řešení nepoužitelné.

Všechny závěry a popisy grafů pocházejí jen z odhadů vycházejících z IRA diagramů daných materiálů nebo z empirických vztahů. Pravděpodobně nelze přesně říct, co se v daném okamžiku v materiálu během ochlazování děje. Tato práce může sloužit jako pomůcka k vyvarování se chyb během měření a k nastínění procesů, které se dějí během ochlazování oceli.

Bibliografie

BYRNE CHARLES L. *Signal Processing a Mathematical Approach*.: Taylor & Francis, 2015.

DAVIS J. R. *Surface Hardening of Steels Understanding the Basics*.: ASM international, 2002.

HANÁK VOJTĚCH. *Kmity a vlny - multimediální učební text*, 2011.

HUANG J. Q. *Non-destructive evalution (NDE) of Composites: acoustic emission (AE),* 2013.

JECH J. *Tepelné zpracování oceli, metaografická příručka*., Praha: SNTL, 1983.

KOPEC BERNARD. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV), Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2008.

KRAUS VÁCLAV. *Technologie tepelného zpracování* . Plzeň: ZČU, 1992.

LAMET. *ASM Handbook Volume 17: Nondestructive evaluation and quality control*: ASM International, 1997.

MILLER RONNIE K., HILL ERIC V.K. A MOORE PATRICK O. *Nondestructive Testing Hanbook, Volume 6, Acoustic Emission, third edition*: American Society for Nondestructive Testing, 2005.

MONNIER THOMAS A KOL. *Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors by the Method of Reciprocity, Theoretical and experimental Considerations*: Senlis, 2012.

PLUHAŘ JAROSLAV. *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu*. Praha : ČVUT, 1983.

PTÁČEK LUDĚK. *Nauka o materiálu I.* Brno: CERM, 2003.

SAUSE MARKUS R. R. *Acoustic Emission Signal propagation in Damaged Composite Structures.* Augsburg: University of Augsburg, Institute for Physics, 2013.

SHULL J., PETER. *Nondestrutive Evalution, Theory, Techniques, and Applications*: Marcel Dekker, 2002.

SKÁLOVÁ JANA, KOUTSKÝ JAROSLAV A MOTYČKA VLADISLAV. Nauka o materiálech. Plzeň.: Západočeská univerzita v Plzni, 2010.

VLACHOVÁ MAGDA. *Mechanické kmitání a vlnění* [Online] // muni.cz. - 20. červen 2020. - https://is.muni.cz/el/1431/podzim2012/F1141/um/superzabavnejucebnitext.pdf.

WALKER JEARL. *Fundamentals of Physics*: CERN, 2007.