

**ZÁPADOČESKÁ UNIVARZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Využití vybraných technik NDT při kontrole tepelného  
zpracování**

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta strojní

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Využití vybraných technik NDT při kontrole tepelného  
zpracování**

Zpracoval: Bc. Vilém Vítovec

Plzeň 2020







## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Vítovec	Jméno Vilém	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Beneš Ph.D.	Jméno Petr	
<b>PRACOVISŤE</b>	<u>ZČU - FST</u> - KMM		
<b>DRUH PRÁCE</b>	DIPLOMOVÁ	<del>BAKALÁŘSKÁ</del>	Nehodící se škrtněte
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Využití vybraných technik NDT při kontrole tepelného zpracování		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

**POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)**

<b>CELKEM</b>	82	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	65	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	17
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Diplomová práce je zaměřena na využití vybraných NDT technik při kontrole chemickotepelného a tepelného zpracování. Tato diplomová práce dále ukazuje potenciál využití NDT metod i v oblastech ne zcela standartních.</p>
<p><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>NDT, Nedestruktivní, Zpracování oceli, Akustická <u>emise</u>, <u>CHTZ</u>, TZ, Ultrazvuk, Vířivé proudy</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Vítovec	Name Vilém	
<b>FIELD OF STUDY</b>	Materials Engineering and Engineering Metallurgy		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Beneš Ph.D.	Name Petr	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Use of selected NDT techniques in the control of heat treatment of steels.		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KMM	<b>SUBMITTED IN</b>	2020
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

**NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)**

<b>TOTALLY</b>	82	<b>TEXT PART</b>	65	<b>GRAPHICAL PART</b>	17
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This diploma thesis is focused on selected NDT techniques during chemical-thermal and heat treatment control. This thesis presents also use of NDT techniques even in non-standard situations.
<b>KEY WORDS</b>	NDT, Nondestructive, Heat treatment, Acoustic emission, Chemical heat treatment, Ultrasonic, Eddy currents,

## Obsah

1	Úvod.....	1
2	Definice NDT technik [1],[12].....	2
2.1	Kapilární zkouška [1], [2],[12] .....	2
2.2	Ultrazvukové zkoušky [1],[2],[12].....	2
2.3	Magnetické a elektrické zkoušky (Prášková magnetická metoda) [2],[12].....	3
2.4	Použití vířivých proudů [16],[4] .....	3
2.5	Akustická emise .....	3
3	Ultrazvuková kontrola materiálu [19] .....	4
3.1	Popis vlny ultrazvuku.....	4
3.2	Odraz a lom .....	6
3.3	Metody a měření NDT [20],[ 19] .....	6
3.4	Vliv materiálových mechanických vlastností na ultrazvukové vlnění[D], [16], [17] .....	8
3.4.1	Druhy rozptylu [22], [17] .....	9
3.5	Vyhodnocení velikosti zrna struktury a provozní třídění materiálu podle struktury [17] .....	10
3.6	Vyjádření modulu pružnosti v závislosti na rychlostech šíření ultrazvukových vln [D] .....	10
4	Metoda vířivých proudů [24],[25].....	11
4.1	Metody pro detekci a vyhodnocení vířivých proudů [1],[2] .....	13
4.2	Sondy využívané u metody vířivých proudů[26], [23].....	13
4.3	Moderní trendy vířivých proudů a nekonvenční metody [3] .....	16
5	Akustická emise a její využití v aplikacích měření chemicko-tepelného zpracování [4] .....	17
5.1	Praktické využití akustické emise [4] .....	17
5.2	Snímače pro akustickou emisi [11], [12].....	18
5.3	Vyhodnocování akustické emise [11] .....	20
5.4	Experimentální metody ověřování CHTZ .....	20
6	Chemicko-tepelné zpracování ocelí [6].....	22
6.1	Dělení metod CHTZ [6].....	22
6.2	Druhy CHTZ .....	22
6.2.1	Cementace [6] .....	22
6.2.2	Nitridace [6], [7], [8], [9].....	25
6.2.3	Nitrocementace [6], [7], [8].....	26
6.2.4	Karbonitridace [6], [7], [8] .....	26
7	Chyby při CHTZ [6].....	27
7.1	Napětí v materiálech.....	27
7.1.1	Deformace při CHTZ [6] .....	28
7.2	Hodnocení hloubky cementační a nitridační vrstvy [10].....	30
7.3	Velikost zrna materiálu [18].....	31





## **Seznam obrázků**

Obr. 1 Spektrum kmitočtů [19] .....	4
Obr. 2 Popis zvukové vlny [19] .....	5
Obr. 3 Průchodová [20].....	7
Obr. 4 Odrazová metoda .....	8
Obr. 5 Metoda vířivých proudů (princip) [23] .....	12
Obr. 6 Parametry ovlivňující hloubku vniku vířivých proudů [26] .....	13
Obr. 7 Schéma absolutní sondy [3] .....	14
Obr. 8 Schéma diferenční sondy [3].....	15
Obr. 9 Schéma reflexní sondy [3] .....	15
Obr. 10 akustické emise [5].....	17
Obr. 11 Snímač akustické emise [11].....	18
Obr. 12 Lineární lokalizace AE [11].....	19
Obr. 13 Plošná lokalizace zdroje AE [11].....	19
Obr. 14 Hodnocení CHTZ metodou vířivých proudů [6] .....	21
Obr. 15 Popis trhlin po tepelném zpracování [6] .....	30
Obr. 16 Trhliny vzniklé po nadkritickém ochlazení [15].....	33
Obr. 17 Trhlina vzniklá nerovnoměrným ochlazením [15].....	34
Obr. 18 Oxidy u materiálu 20MnCr5 [16] .....	35
Obr. 19 Intergranulární oxidy [16].....	36
Obr. 20 ARA diagram .....	37
Obr. 21 Nikl-chromová ocel.....	37
Obr. 22 Snímek cementované vrstvy 3 h .....	41
Obr. 23 Snímek cementované vrstvy 12 h .....	42
Obr. 24 Snímek nitridované vrstvy s úběrem 10 $\mu$ m .....	42
Obr. 25 Simulace cementovaného vzorku po dobu 3h v softwaru Sonoanalyzér. 46	
Obr. 26 Simulace cementovaného vzorku po dobu 6h v softwaru Sonoanalyzér. 47	
Obr. 27 Simulace cementovaného vzorku po dobu 12h v softwaru Sonoanalyzér. 47	
Obr. 28 Simulace kaleného vzorku v softwaru Sonoanalyzér .....	48
Obr. 29 Simulace kaleného vzorku ve folii v softwaru Sonoanalyzér .....	48
Obr. 30 Měření pomocí sond 4 MHz, cementovaný vzorek 3h .....	49
Obr. 31 Cementované vzorky 100 Hz-2Khz.....	54
Obr. 32 Cementované vzorky 300 Hz-10kHz.....	54
Obr. 33 Kalené vzorky 1KHz-50KHz.....	55
Obr. 34 Kalené vzorky 300 Hz-10KHz.....	55
Obr. 35 Nitridované vzorky .....	56
Obr. 36 Konfigurace měření ultrazvukových vlastností vzorků metodou akustické emise 57	
Obr. 37 Měření akustické emise u cementovaného vzorku .....	57

### ***Seznam tabulek***

Tab. 1 Naměřené hodnoty tvrdostí HV1 .....	40
Tab. 2 Naměřené a vypočtené hodnoty rychlosti ultrazvuku u cementovaných vzorků	44
Tab. 3 Naměřené a vypočtené hodnoty rychlosti ultrazvuku u cementovaných vzorků pro případ příčné vlny.....	45
Tab. 4 Naměřené a vypočtené hodnoty rychlosti ultrazvuku u kalených vzorků .	45
Tab. 5 Naměřené a vypočtené hodnoty rychlosti ultrazvuku u kalených vzorků .	45
Tab. 6 Naměřené a vypočtené hodnoty rychlosti ultrazvuku u nitridovaných vzorků	46
Tab. 7 Naměřené a vypočtené hodnoty rychlosti ultrazvuku u nitridovaných vzorků.	46
Tab. 8 Měření materiálových charakteristik u cementované vrstvy pomocí osciloskopu	50
Tab. 9 Měření charakteristik nitridované vrstvy pomocí osciloskopu .....	51
Tab. 10 Měření materiálových charakteristik kalených vzorků pomocí ultrazvuku	52
Tab. 11 měření akustické emise cementované vzorky .....	58
Tab. 12 měření akustické emise nitridovaná vrstva .....	58
Tab. 13 měření akustické emise kalené vzorky.....	59

### ***Seznam grafů***

Graf 1 Naměřené hodnoty tvrdostí.....	40
Graf 2 Hodnocení cementované vrstvy .....	50
Graf 3 Hodnocení nitridované vrstvy .....	52
Graf 4 Hodnocení kalených vzorků .....	53
Graf 5 Hodnocení akustická emise cementovaná vrstva.....	58
Graf 6 Hodnocení akustická emise nitridovaná vrstva vrstva.....	59

## 1 Úvod

Kvalita strojních součástí je dána především kvalitou materiálů a jejich chemickým a tepelným zpracováním. Vlastnosti materiálů jsou dále ovlivněny postupy, které vedou ke zlepšení vlastností materiálu. Samotné materiály se nedají vyrobit bez vad. Z tohoto důvodu se využívá velké množství různých destruktivních a nedestruktivních metod pro hodnocení kvality výroby materiálů.

Ovšem tyto metody nejsou vždy stoprocentní, a proto se kombinují mezi sebou. Je to dáno tím, že žádná metoda nemůže zjistit všechny vady v materiálu, avšak kombinací více metod se dá docílit stoprocentního hodnocení kvality výrobku.

Hodnocení vad v materiálu se provádí buď přímo ve výrobě, v místě montáže nebo laboratorně. Dříve se pro takovéto vyhodnocení používalo spíše laboratorních zkoušek. Nicméně v současné době zaujímá velké využití spíše nedestruktivní zkoušení materiálu (NDT), které se dá použít na hotových výrobcích a není nutné tyto výrobky znehodnotit. Použitím NDT metod se dá předejít i velkým finančním ztrátám. Přesto se v současné době kontrola tepelného zpracování provádí hlavně destruktivním způsobem nebo pouze měřením tvrdosti na povrchu výrobku.

Tato problematika se tedy může zdát velmi jednoduchá, ale vybrat metody, které se hodí pro toto hodnocení, je při širokém sortimentu metod velmi složité.

Cílem této diplomové práce je vybrat nedestruktivní metody použitelné pro hodnocení tepelného a chemicko-tepelného zpracování materiálu. Pro takovéto hodnocení je důležité zhodnotit, které metody jsou vhodné k použití v konkrétním případě.

Dalším cílem diplomové práce je vytvořit seznam metod, které se hodí pro určitý typ tepelného a chemicko-tepelného zpracování. Předpokladem použití NDT metod pro kontrolu tepelného a chemicko-tepelného zpracování je kontrola takovéto vrstvy do hloubky materiálu bez nutnosti destrukce materiálu.

## 2 Definice NDT technik [1],[12]

Stanovení vad nedestruktivními metodami je většinou nepřímé. V takových případech se jako prostředník používá fyzikální veličina, která mění své fyzikální vlastnosti v závislosti na prostředí. Zjištěním změny fyzikálních vlastností se hodnotí tvar a místo vady. Následný rozbor těchto vad je základem pro nedestruktivní hodnocení vad v materiálu.

Esenciálním parametrem pro hodnocení defektoskopických způsobů je energie použitá při zkouškách. Běžné NDT metody se dělí dle použití na dané vady, jež dělíme na povrchové a vnitřní.

- A) povrchové vady: - vizuální metody
  - penetrační
  - magnetoinduktivní
- B) vnitřní vady: - akustické
  - radiologické

Všechny metody NDT se dají použít různými způsoby a dají se kombinovat, ale každá metoda je použitelná jenom v určité oblasti použití. Tato oblast je dána podmínkou zkoušky a místem hledání vad, tedy pro úplnou představu o všech vadách v materiálu musíme kombinovat více zkoušek. Prozatím není známa metoda, která by hodnotila všechny vady. NDT zkoušky pro hodnocení vad jsou popsány v dalších kapitolách.

### 2.1 Kapilární zkouška [1], [2],[12]

Kapilární zkouška se používá pro hodnocení vad na povrchu materiálu, tedy se jedná o vady vyskytující se přímo na povrchu materiálu. Tato metoda se dá použít pouze u materiálů, které nejsou ošetřeny nátěrem, nejsou pórovité a nejsou rozpustné detekční kapalinou. Kapilární zkouška se používá tzv. kapilární jev, což je schopnost látek vzlínat do trhlin.

Velkou výhodou této metody je její jednoduchost, praktičnost a samozřejmě cena. Touto metodou se dají kontrolovat svary, povrchy po broušení, a dokonce i tělesa, která jsou složitá jako například ozubená kola apod.

Princip této metody spočívá v nanesení detekční kapaliny na povrch materiálu. Poté se odstraní přebytečná kapalina. Kapalina, která zůstane ve vadách materiálu, následně vzlíná na povrch materiálu, kde se zviditelní pomocí vývojky. Detekční kapalina je díky odlišné barvě ve vývojce dobře patrná.

### 2.2 Ultrazvukové zkoušky [1],[2],[12]

Ultrazvuk představuje kmitání částic o kmitočtu vyšším než 20 kHz. Tyto zkoušky pak využívají odrazu ultrazvuku na rozhraní dvou akustických prostředí. Pomocí ultrazvuku se dá vyhodnocovat síla materiálu, vnitřní pnutí apod.

Metoda ultrazvukové zkoušky se využívá pro hodnocení vad uvnitř materiálu a v případech, kdy jsou vady kolmé na směr vln ultrazvuku. Jestliže vada není kolmá na směr vln ultrazvuku, je třeba využít speciálních metod. Příkladem speciální metody je využití úhlové sondy.

Ultrazvukové zkoušky umožňují snadnou detekci plošných a rovinných vad, které jsou rovnoběžné s povrchem materiálu. Těmito metodami se dají hodnotit ocelové materiály a dokonce i materiály z lehkých slitin.

### **2.3 Magnetické a elektrické zkoušky (Prášková magnetická metoda) [2],[12]**

Obě tyto zkoušky jsou založeny na magnetické indukci. Magnetickými zkouškami se dají hodnotit povrchové a těsně podpovrchové vady.

Mezi tyto metody patří prášková magnetická zkouška, která se používá pro kontrolu povrchových vad jako jsou trhliny, praskliny atd. Vada je následně detekována změnou magnetického odporu a v místě vady dochází k zakřivení trajektorie magnetických indukčních siločar. Zkoušku je možné provádět jen u feromagnetických materiálů, které se po provedení zkoušky musí odmagnetizovat.

### **2.4 Použití vířivých proudů [16],[4]**

Metoda použití vířivých proudů je založena na jednoduchých principech. Nejčastěji se využívá sestav několika cívek pro indukování vířivých proudů. Pokud se sonda přiblíží ke zkoumanému vzorku, začnou se ve vzorku indukovat vířivé proudy. Hustota vířivých proudů exponenciálně klesá s hloubkou.

V současné době známe dvě metody pro hodnocení vířivých proudů, a to impedanční metodu a odesílací metodu.

### **2.5 Akustická emise**

Akustickou emisí se označuje fyzikální jev, kdy se pozorují akustické signály, které se vysílají v materiálu. Tato metoda patří k pasivním inkoherentním metodám využívající postupných vlnových impulsů. Signály doprovází dynamický proces v materiálu a následně se projevují jako elastické vlnění. Zdrojem vlnění jsou náhlá uvolnění energie uvnitř materiálu. Tento proces doprovází změny uvnitř materiálu (např. lomové změny).

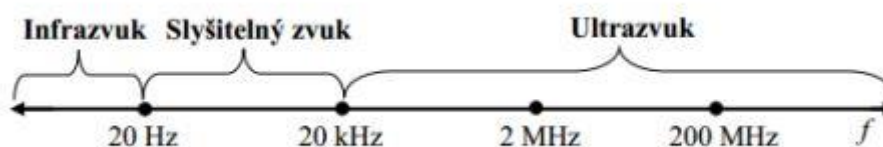
Akustická emise je nedestruktivní pasivní metoda. To znamená, že neovlivňuje měřený objekt a podává integrální informace o momentálním dynamickém stavu materiálu. Nevýhodou je neobjasněný způsob vzniku emisních balíků.

### 3 Ultrazvuková kontrola materiálu [19]

Fyzikální podstatou ultrazvuku je mechanické vlnění šířící se prostorem. Tyto vlny se mohou šířit ve všech skupenstvích. Takováto vlna vzniká mechanickým kmitání částic. Pokud se jedná o ultrazvukové kmitání, pak je frekvence o hodnotě 20 kHz a vyšším.

Ultrazvuková vlnění se šíří prostředím danou rychlostí a energií. Hodnota této energie se projevuje například změnou tlaku, prostředí apod. Jednou ze základních vlastností ultrazvuku je intenzita vlnění. Pokud hodnota vlnění má nízkou hodnotu, pak takovýto typ ultrazvuku neovlivňuje fyzikální, ani chemické vlastnosti prostředí. Tento typ je označován jako pasivní a uplatňuje se hlavně v diagnostice, nedestruktivním hodnocení apod.

Pokud vlny ultrazvuku mají velkou intenzitu, tak mají vliv na prostředí, ve kterém se nacházejí. Takových vln se dá využít ve strojírenství, například ke svařování, obrábění nebo k čištění součástí.



Obr. 1 Spektrum kmitočtů [19]

#### 3.1 Popis vlny ultrazvuku

Existují dva základní typy šíření vln: stojaté a postupné. Postupné se ještě dále dělí na podélné a příčné vlny. V plynech a kapalinách se ultrazvuková vlna šíří jako podélné vlnění. Naproti tomu v pevných látkách se šíří jako vlnění příčné.

Popis rychlosti vlny ultrazvuku se dá popsat rovnicí, která je rozdílná v plynech, kapalinách i pevných látkách.

$$\text{Rychlost šíření v plynech} \quad c_p = \sqrt{\frac{\kappa p_0}{\rho_0}} \quad (\text{m} * \text{s}^{-1})$$

$$\text{Rychlost šíření v kapalinách} \quad c_k = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (\text{m} * \text{s}^{-1})$$

$$\text{Rychlost šíření v pevných látkách} \quad c_{pl} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{m} * \text{s}^{-1})$$

Kde odpovídají

- k - plynová konstanta
- $p_0$  - klidový tlak v plynu
- $\rho_0$  - klidová hustota plynu
- $\rho$  - hustota kapaliny nebo pevné látky
- K - modul objemové stlačitelnosti kapaliny
- E - youngův modul pružnosti

Popis vlny se dá interpretovat vlnovou rovnicí:

$$\frac{\delta^2 a(x, t)}{\delta t^2} = \vartheta * \frac{\delta^2 a(x, t)}{\delta x^2}$$

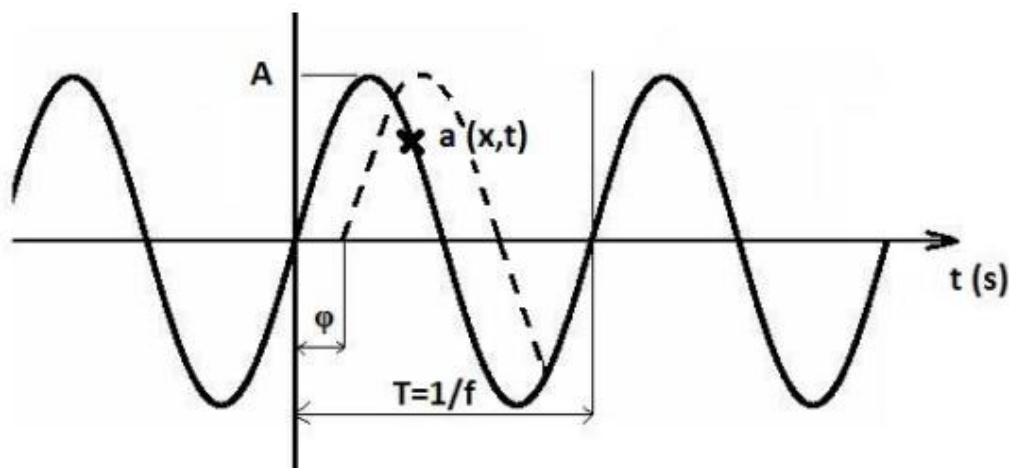
Řešením této rovnice získáme vtahy pro rychlost kmitání částic

Vlnová délka  $\lambda = \frac{v}{f} = v * T$

Vlnová délka udává vzdálenost, kterou je schopna vlna urazit za jednu dobu kmitu T.

Dále určuje vzdálenost dvou bodů se stejnou fází.

Akustickou rychlost vyjadřuje kmitání částic prostředí, kde se šíří rozruch.



Obr. 2 Popis zvukové vlny [19]

- $a(x,t)$  - okamžitá hodnota výchylky
- $A[x]$  - amplituda výchylky
- $T [s]$  - perioda kmitu
- $f [Hz]$  - frekvence vlnění
- $\varphi [rad]$  - faze



$\omega[s^{-1}]$ - kruhová frekvence

### 3.2 Odraz a lom

Dalším důležitým faktorem, který ovlivňuje průchod ultrazvukové vlny je její odraz a lom na rozhraní dvou nebo více prostředí.

V homogenním prostředí se vlna pohybuje přímočaře, ovšem narazí-li na rozhraní dvou nebo více akustických prostředí dochází k lomu nebo odrazu. Každé prostředí je charakterizováno jiným vlnovým odporem  $Z_x$ , což je fyzikální veličina popisující akustické vlastnosti prostředí

$$Z_x = \frac{P_{ef}}{v_{ef}}$$

$P_{ef}$  – hodnota akustického tlaku

$Z_x$  – vlnový odpor

$v_{ef}$  – hodnota akustické rychlosti

Jev, který nastane jsou-li odpory různé popisuje Snellův zákon:

$$n_1 * \sin\varphi_1 = n_2 * \sin\varphi_2$$

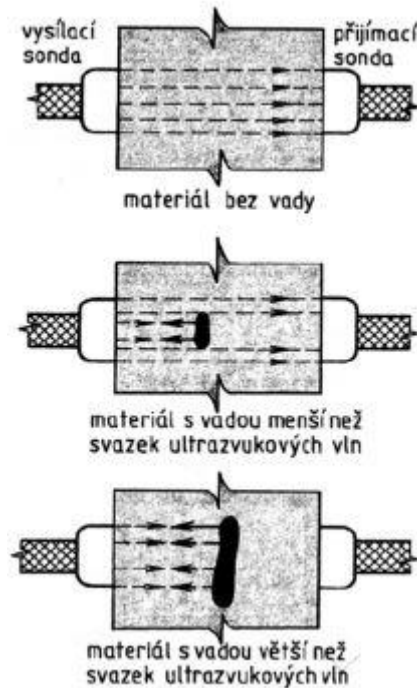
$n_{1,2}$  – index lomu prostředí

$\sin\varphi_1, \varphi_2$  – úhly dopadajícího svazku

### 3.3 Metody a měření NDT [20],[ 19]

Ultrazvuková defektoskopie využívá tři základní metody. Jedná se o metodu průchodovou, pulse-echo metodu a metodu rezonanční.

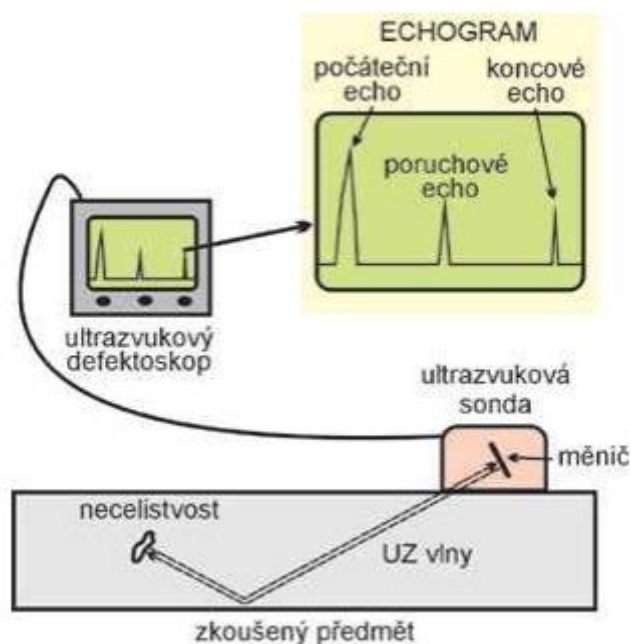
Průchodová metoda využívá dvě sondy, které jsou umístěny proti sobě, přičemž jedna je využívána jako vysílač a druhá jako přijímač. Pokud uvnitř zkoumaného materiálu je vada, část vln se odrazí a tím vznikne stín. Přijímací sonda zaznamená úbytek energie. Tato metoda nedokáže určit přesnou polohu vady. Pro kvalitní průchod vln je potřeba nanést na povrch vazelínu nebo olej. Průchodová metoda se dá dobře automatizovat a dají se jí zkoumat různé materiály. Nevýhodou je náročnost na seřízení dvou sond a samozřejmě přístup ke zkoumanému materiálu z obou stran.



Obr. 3 Průchodová [20]

Druhou metodou je metoda odrazová, jenž využívá sondy na jedné straně zkoumaného materiálu, kde se nachází vysílač i přijímač. Sonda vysílá krátké ultrazvukové impulzy, které se odráží od povrchu nebo od vnitřních vad. Zařízení je schopné detekovat na základě odrazu místo a vzdálenost vady. Pokud se v materiálu nenachází žádná vada, ultrazvukové vlny se odrážejí až od protilehlé strany materiálu.

Touto metodou jsme možné detekovat i vměstky. Odrazová metoda je přitom citlivější než metoda průchodová. Výhodou této metody je však i nenáročnost na nastavování sond, což je podmínkou v případě metody průchodové.



Obr. 4 Odrazová metoda

Poslední metodou je metoda rezonanční. Touto metodou se v materiálu docílí stojatého vlnění. Stojaté vlnění vzniká postupným měněním ultrazvukového vlnění. Vzhledem k tomu, že známe frekvenci, jsme pak schopni určit i polohu vady. Metoda se dá dobře automatizovat, ale v současné době se již nepoužívá. Nahradila ji metoda odrazová, která je efektivnější.

Dále je důležité rozlišovat šíření ultrazvuku v materiálech. Rozlišujeme dva základní typy a to mechanické vlnění příčné, kdy částice kmitají kolmo na směr šíření ultrazvuku. Druhý typ spočívá v mechanickém šíření ultrazvuku podélném. V tomto případě částice kmitají ve směru šíření vlnění.

### 3.4 Vliv materiálových mechanických vlastností na ultrazvukové vlnění, [21], [16], [17]

Při průchodu ultrazvukem určitou látkou dochází k útlumu energie a akustického tlaku. To je způsobeno absorpcí ultrazvuku materiálem a rozptylem prostředí.

Absorpce je způsobena vnitřním třením kmitajících částic. Mechanická energie se mění na tepelnou energii. Pokud dochází ke zvyšování frekvence, ztráty jsou větší. Jestliže je vlnová délka stejná, je u příčných vln útlum menší než u vln podélných.

Rozptyl nastává tehdy, jestliže je materiál nehomogenní a krystalický. Pak dochází k dopadu na rozhraní různě orientovaných nehomogenit k odrazu, lomu nebo ohybu ultrazvuku. Z důvodu různé prostorové orientace těchto uvedených struktur se ultrazvuková

vlna rozptyluje do všech směrů. Čím větší jsou nehomogenity a anizotropie krystalů struktury, tím větší podíl má ztráta rozptylem na celkové ztrátě. Obecně pak platí, že materiály s hrubou strukturou mají vyšší útlum. Dále také platí, že materiály, jako jsou jemné keramiky, mosazi a bronzy, mají střední útlum. Nejnižší útlum pak mají materiály jako jsou tvářené oceli.

Měřením bylo dále prokázáno že, velikost zrn materiálu ovlivňuje rychlost ultrazvukových vln, a to tak, že se rychlost zpomaluje se zvětšujícím se zrnem. Další zjištění je, že pokud je materiál zpracováván pod teplotou Ac1, tak rychlost ultrazvuku zůstávala konstantní kolem 826 °C. Pokud ale došlo ke zpracování materiálu teplotou mezi Ac1 a Ac3 docházelo k poklesům rychlosti ultrazvuku.

Dále volba teploty tepelného zpracování ovlivňuje i útlum ultrazvuku. Pod teplotou Ac1 je hodnota útlumu kolem 0,25 dB/mm. Minimální útlum se projevuje u materiálu kole teploty Ac3. Útlum se dále zvyšuje dle velikosti zrna. Útlum ultrazvukových vln se vyjadřuje činitelem útlumu a je součtem dílčích útlumů.

Vzhledem k tomu, že některé fyzikální vlastnosti ultrazvuku ovlivňují průchod materiálem, je možné použít ultrazvuk k hodnocení struktury materiálu a jeho poruch. To ale záleží na mnoha faktorech, jako jsou rozptyly vlny apod.

V další podkapitole se zaměříme na druhy rozptylu, které ovlivňují průchod ultrazvukových vln.

### 3.4.1 Druhy rozptylu [22], [17]

#### Rayleighův rozptyl: $\lambda \gg D$

$$\text{Pro } 0,016 < \alpha = \frac{D}{\lambda} < 0,16 \text{ platí: } \alpha \approx \alpha_p * f + \alpha_r * f^4$$

Součinitel rozptylu  $\alpha_r$  je mnohonásobně menší oproti součiniteli pohlcování  $\alpha_p$  a rozptyl se začíná projevovat až při vyšších frekvencích. Pro oceli se začíná rozptyl projevovat až při frekvencích 2MHz

#### Stochastický rozptyl: $\lambda \approx D$

$$\text{Pro } D < \lambda < 2\pi D \left( 0,16 < \frac{D}{\lambda} < 1 \right) \text{ platí: } \alpha \approx \alpha_p * f + \alpha_r * f^2$$

Pokud můžeme vlnovou délku  $\lambda$  porovnat se střední hodnotou velikosti zrna D dochází díky fázovým rozdílům drah různě orientovaných ploch zrn k deformaci čela původně rovinné vlny a vlny se šíří do různých směrů.

#### Difuzní rozptyl: $\lambda < D$

V intervalu  $0,1 \cdot D < \lambda < D \cdot 1 \left( 1 < \frac{D_{stř}}{\lambda} < 10 \right)$  při větších frekvencích dochází k difuznímu rozptylu. Ultrazvuk difunduje mezi jednotlivé krystaly. Útlum je maximální, když se délka vlny blíží střední hodnotě zrna.

Při  $\lambda \ll D \cdot \lambda < 0,1 \cdot D \left( 10 < \frac{D}{\lambda} \right)$  dochází k odrazu na každé hranici zrna. Útlum v látkách pevného skupenství se zvyšuje se stoupající teplotou. U kovů tato hodnota teploty je kolem 200°C.

Útlum ultrazvukových vln se nejčastěji vyjadřují v hodnotě  $dB^{-1}, mm^{-1}$ . Tyto hodnoty jsou v tomto případě funkcí frekvence. U pevných materiálů dochází k útlumu vlivem tření kmitajících částic, hysterezních ztrát, plastického tečení, magnetických, relaxačních únavových a tepelných jevů.

Nositelům informace o útlumu ultrazvuku je velikost echa. Ve většině případů se používá impulsní odrazová metoda s využitím ultrazvukových defektoskopů. Velikost útlumu se hodnotí pomocí koncových ech.

Velikosti ztrát jsou způsobeny vlivem:

- a) vlivem vzdálenosti
- b) přechody mezi povrchy
- c) ztráty způsobené nerovnoběžností povrchů
- d) konečného průřezu vzorku

### **3.5 Vyhodnocení velikosti zrna struktury a provozní třídění materiálů podle struktury [17]**

K vyhodnocení velikosti zrna materiálu je zapotřebí znát závislost součinitele rozptylu a velikost zrna. Součinitel rozptylu je závislý na oblasti Rayleighova rozptylu na střední velikosti zrn. Porovnáním dvou vzorků stejného materiálu je možné stanovit střední velikost zrna, pokud u jednoho byl zpracován metalografický výbrus.

$$\text{Z poměru } \frac{a_2}{a_{2x}} = \frac{D^3}{D_x^3},$$

Kde:  $a_2$  ztrátové číslo rozptylu vzorku se známou velikostí zrna  $D$

$a_{2x}$  ztrátové číslo rozptylu vzorku s hledanou velikostí zrna  $D_x$

Z tohoto vztahu je možné stanovit hledanou velikost zrna, ale tato metoda měření je závislá na geometrii vzorku. Tedy aby geometrie vzorků byla totožná.

### **3.6 Vyjádření modulu pružnosti v závislosti na rychlostech šíření ultrazvukových vln [21]**

Tato kapitola je jednou z nejdůležitějších a klíčových pro celou tuto práci. Je to dáno tím, že každý materiál se chová jinak v závislosti na kmitání ultrazvukových částic v materiálu.

Konstanty, které určují modul pružnosti v tahu, Poissonovu konstantu a pružnost ve smyku je možné stanovit z rychlosti šíření podélných a příčných vln v materiálu, ve kterém se pohybují. Do výpočtu je zapotřebí uvažovat i hustotu materiálu.

$$\text{Popis rychlosti šíření podélných vln } c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} * \frac{1-\nu}{(1+\nu)*(1-2\nu)}}$$

$c_L$  – rychlost podélné vlny

$E$  – Youngův modul pružnosti

$\rho$  – Poissonova konstanta

$$\text{Popis rychlosti šíření příčných vln } c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$c_T$  – rychlost šíření příčné vlny

$G$  – Modul pružnosti ve smyku

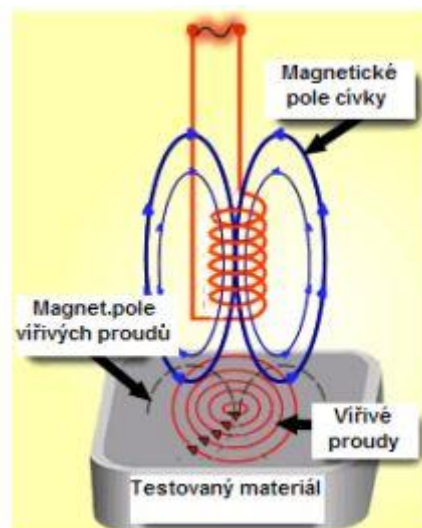
$\rho$  – Poissonova konstanta

Úpravou rovnice pro výpočet modulu pružnosti  $\frac{E}{G} = 2 * (1 + \nu)$  s dosazenými rovnicemi rychlostí získáme vztah popisující výpočet Poissonovy konstanty. Následnou úpravou rovnice získáme rovnici pro výpočet modulu pružnosti závislé na rychlosti šíření podélných a příčných vln.

$$E = \rho * c_L^2 * \frac{(1 + \nu) * (1 - 2\nu)}{1 - \nu}$$

#### 4 Metoda vířivých proudů [24],[25]

Vířivé proudy jsou založeny na principech které, jsou tvořeny sestavou, která obsahuje jednu nebo více cívek. Tvar cívek a jejich zapojení je důležité uvažovat pro danou aplikaci vířivých proudů. Cívky jsou napájeny střídavým proudem se známou frekvencí. Hustota vířivých proudů je největší na povrchu a klesá s hloubkou. Při rozdílném kmitočtu budícího pole snímače pronikají vířivé proudy do rozdílných hloubek.

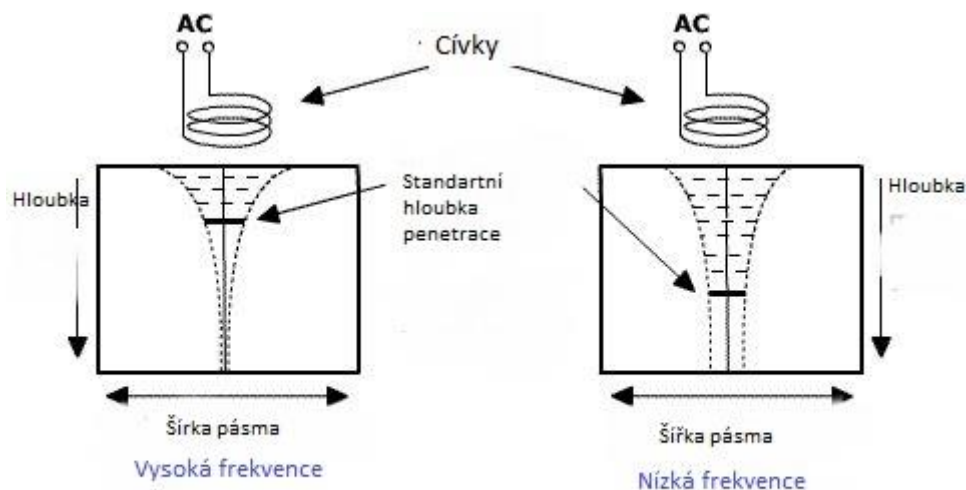


Obr. 5 Metoda vířivých proudů (princip) [23]

Jelikož je magnetické pole vyvoláno střídavým proudem, je princip popsán na obr. 5. provázen povrchovým jevem, který se nazývá „skin efekt“. Tento jev se projevuje snížením hustoty vířivých proudů s hloubkou vniku. Hustota se snižuje exponenciálně. Důležitým faktorem je hloubka, do které vnikají vířivé proudy, jenž se následně označuje jako standardní hloubka vniku  $\delta$ . Jestliže se hustota vířivých proudů snižuje na hodnotu kolem 37 %, .

Hloubka vniku vířivých proudů závisí na konduktivitě a permeabilitě materiálu. Zároveň však také závisí na frekvenci budícího proudu cívky, protože tu lze jako jedinou ovlivnit (nastavit).

Pokud je potřeba detekovat vady hlouběji v materiálu, je zapotřebí nižší frekvence budícího proudu. Ovšem snížením frekvence se snižuje hustotu vířivých proudů, čímž dojde i ke snížení citlivosti metody pro detekci malých vad. Vzhledem k těmto parametrům je tedy tato metoda zaměřena na detekci povrchových nebo těsně podpovrchových vad, které nejsou umístěny rovnoběžně k magnetickému toku. Na Obr. 6. je znázorněno, jaké parametry ovlivňují hloubku vniku vířivých proudů do materiálu.



Obr. 6 Parametry ovlivňující hloubku vniku vířivých proudů [26]

#### 4.1 Metody pro detekci a vyhodnocení vířivých proudů [1],[2]

V současné době pro hodnocení vířivých proudů rozeznáváme dvě metody. A to impedanční a odesílací přijímací metodu.

Impedanční metoda pouze monitoruje hnací cívku. Toho se využívá z důvodu, že změny napětí nebo proudu v cívce nám pomohou zjistit významné parametry. Těmito parametry jsme schopni zjistit změny impedance, které nám generují vířivé proudy. Tato metoda využívá změny úbytku napětí na cívce.

Odesílací a přijímací metoda využívá indukované napětí přímo na primární cívce, kde dochází následně k měření tohoto napětí. Tato metoda je ovlivněna teplotním driftem ve zkoumaném materiálu. Vířivé proudy jsou sledovány účinkem přidružených elektromagnetických polí.

#### 4.2 Sondy využívané u metody vířivých proudů [26], [23]

Sondy, které využívá metoda vířivých proudů, pracují obecně na principu popsaném v předchozích kapitolách. Obecně lze říci, že existuje mnoho druhů a metod jejich zapojení. Toto zapojení se dělí podle vnitřního zapojení cívek, které se dá rozdělit na absolutní a diferenční. Pokud se jedná o průchozí sondy, tak je lze rozdělit na vnitřní a vnější. Jestliže je používána sonda průchozí, pak materiál prochází přímo středem cívky. Vnitřní sonda se používá při aplikacích, kde je zapotřebí kontrola objektů, jako například trubek.

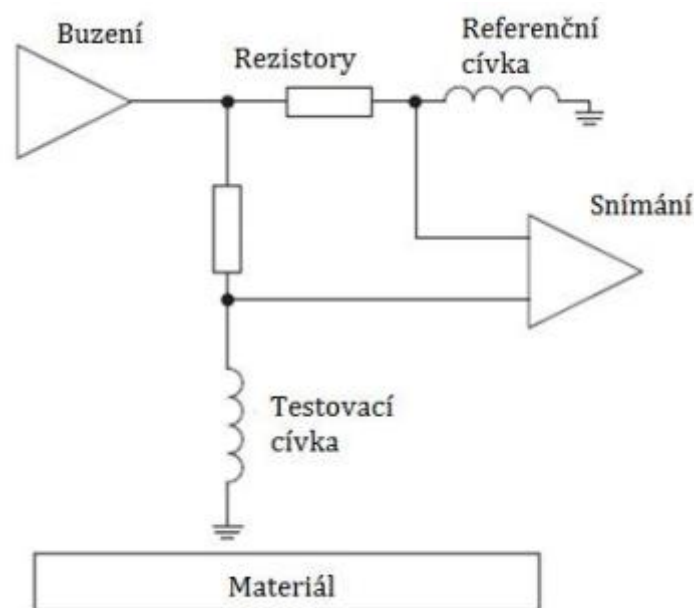
Absolutní sonda patří k těm nejjednodušším snímačům disponujícím pouze jednou cívkou. Proto tato cívka zastává funkci vysílače i přijímače. Střídavý proud prochází cívkou a kolem cívky se generuje magnetické pole. Když dojde k přiblížení magnetického pole



k feromagnetickému materiálu dochází ke generování vířivých proudů uvnitř materiálu. Vytváření vířivých proudů se projeví jako úbytek energie na cívce a následně se projeví jako vzrůst elektrického odporu cívky.

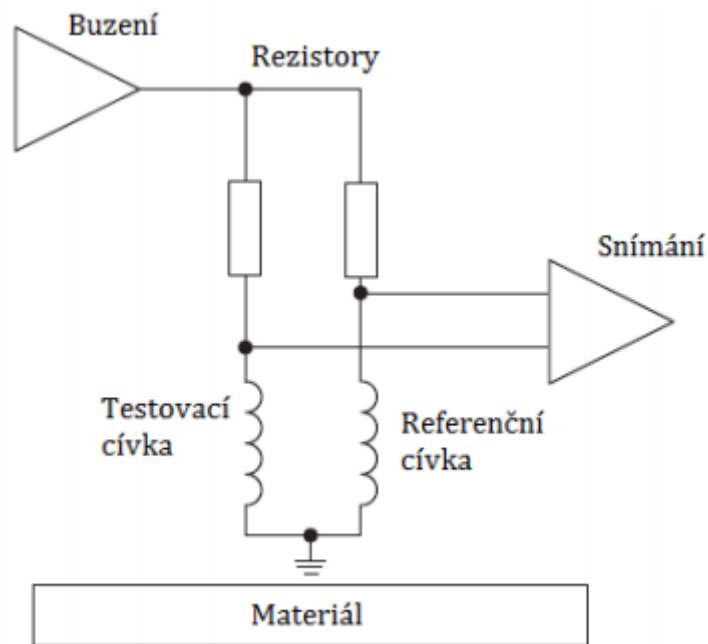
Dále vířivé proudy generují vlastní magnetické pole, které má opačnou orientaci než magnetické pole cívky. To ovlivňuje indukční reaktanci cívky. Měřením absolutní změny v impedanci zkušební cívky získáme informace o zkoumaném materiálu.

Tyto sondy jsou aplikovatelné pro zjišťování vad materiálu, dále k měření vodivosti a například i k měření tloušťky nátěru. Sondy absolutní jsou náchylné na teplotu, permeabilitu a na vodivosti materiálu.



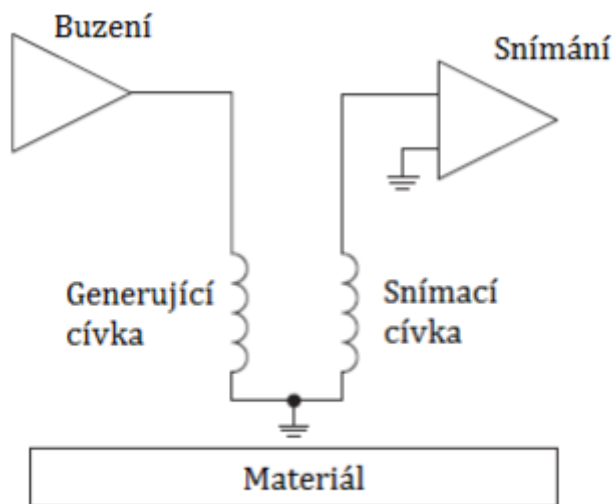
Obr. 7 Schéma absolutní sondy [3]

Sondy diferenciální využívají dvě činné cívky, které jsou vinuté v protifázi. Pokud se cívky nacházejí nad materiálem, který nemá vady, tak se neprojevuje rozdíl mezi signály vyvolanými cívkami. Jestliže se cívky dostanou nad vadu, kde jedna cívka je nad vadou a druhá nad materiálem bez vad, je patrný rozdíl v signálech. Jednoznačnou výhodou této sondy je citlivost k defektům. Naproti tomu jsou méně náchylné na měnící parametry jako je například teplota. Nevýhodou je poměrně složitá interpretace signálů (např. pokud je vada dlouhá, tak se projeví pouze na čele vady).



Obr. 8 Schéma diferenční sondy [3]

Metoda reflexní sondy využívá dvou cívek podobně jako diferenční metoda, ale s tím rozdílem, že jedna cívka je používána jako generátor vířivých proudů a druhá se využívá jako zachycovač změn ve zkoušeném materiálu. Výhoda těchto sond je, že sonda, která je primární, je udělána, aby indukovala silné pole v nejbližším okolí cívky. Tato indukční cívka může být nastavena na vysokou citlivost.



Obr. 9 Schéma reflexní sondy [3]



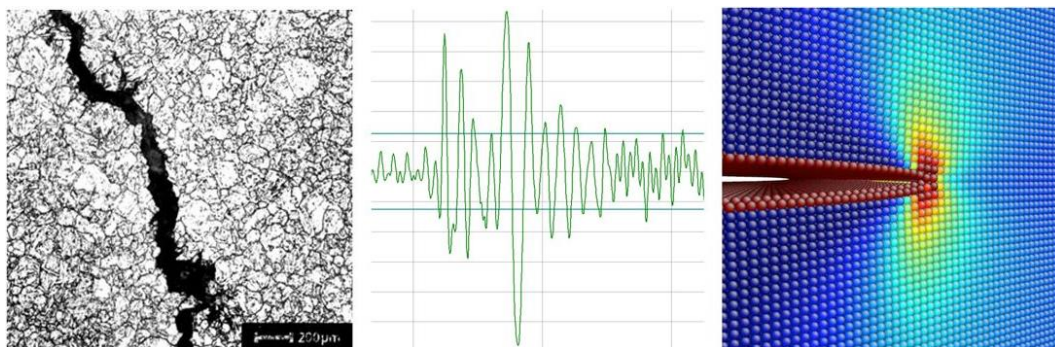
## 5 Akustická emise a její využití v aplikacích měření chemicko- tepelného zpracování [4]

Požadavky, které jsou stále náročnější nutí, celou výrobní sféru k hledání nových metod pro hodnocení kvality výroby. Jednou z takových metod je i metoda akustické emise. Metoda spadá do nejmodernějších metod testování výrobků a konstrukcí. Je založena na principu snímání elastického vlnění, které vzniká v důsledku dynamických procesů uvnitř materiálu. Metoda sleduje kumulaci poškození a dále i průběh plastické deformace, iniciaci a šíření trhlin, fázové transformace, korozní děje, ale dokonce i proudění tekutin.

Materiál je sledován na povrchu, kde za pomoci různých typů snímačů hodnotíme výše popsané jevy. Mechanické hodnoty materiálu jsou pomocí snímačů převáděny na elektrické veličiny. Akustická emise se měří pomocí piezoelektrické snímače, které pracují ve frekvenční oblasti 100 kHz až do 2MHz. Snímače snímají povrchové vlny a společně se zesilovači vytvářejí elektrický signál. Emise je zobrazena jako silně tlumený soubor sinusových kmitů. Takovýto soubor se nazývá emisní událost.

Vyhodnocuje se počet takovýchto událostí nebo počet překmitů-tedy počet překmitů, kde amplituda překročila předem stanovenou hranici takzvaný „counts“. Dále se k hodnocení využívá časová závislost počtu „countů“ na čase. Z tvaru signálu je možné vyhodnotit místo vzniku akustické emise a frekvenční spektrum definující podstatu zdroje.

Další charakteristiky je možné získat ze stupně deformace tvaru signálu, amplitudové distribuce signálu, kvadratické úrovně detekovaného signálu. Nespojitý signál je projevem trhlin anebo probíhajících korozních jevů.



Obr. 10 akustické emise [5]

### 5.1 Praktické využití akustické emise [4]

V současné době, kdy technika zaznamenává velký rozvoj v oblasti informatiky, se metoda akustické emise stává více využívanou pro hodnocení různých materiálových charakteristik. Metoda akustické emise je dobře použitelná v oblasti hodnocení materiálových

charakteristik pro hodnocení rozvoje plastické deformace, iniciace trhlin a podobně. Akustická emise umožňuje iniciaci trhlin s velkou přesností s vysokou citlivostí.

Základním úkolem pro hodnocení pomocí akustické emise je zjištění, lokace a lokalizace emisních zdrojů. Velkou výhodou této metody je to, že se jedná o integrální metodu, která umožňuje aplikaci několika snímačů najednou rozmístěných po velkých konstrukcích. Akustická emise se používá pro takzvané vytipování míst.

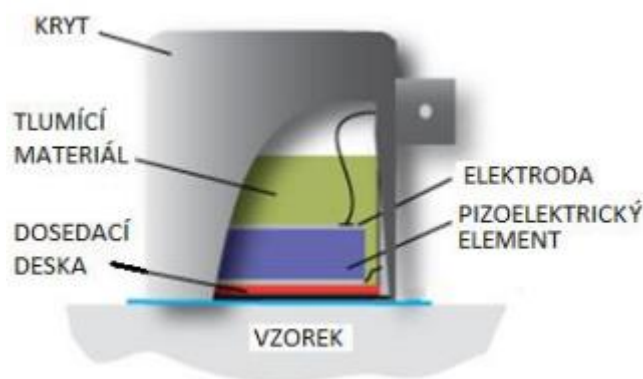
Metoda nachází své uplatnění v oblastech jako je letectví, výzkumu lomové mechaniky, korozních vlastností, převodových soukolí, monitorování jaderného zařízení, kontrola tlakových lahví, a dokonce i při kontrole výroby, tváření nebo svařování. V současnosti se objevují i aplikace jako kontinuální měření ložisek a ložiskových pánví.

Akustická emise nalézá své uplatnění i ve stavebnictví a geologickém inženýrství. Velkou výhodou je aplikace za běžného provozu.

## 5.2 Snímače pro akustickou emisi [11], [12]

Akustická emise je rázová vlna uvnitř namáhaného materiálu. U sledovaného materiálu se na povrch umístí snímací sondy. Pokud je materiál horký, umísťuje se na povrch tzv. vlnovod, který prochází skrz izolaci a sondy se umísťují na konce vlnovodu. Sondy se připojují přes zesilovač signálu k analyzátoru a řídicí počítač vyhodnocuje signál.

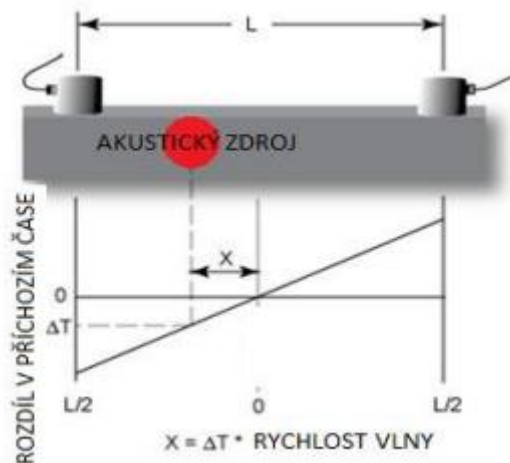
Snímač je základním prostředkem pro snímání vln akustické emise. V tomto případě se jedná o vlny šířící se o frekvenci od 20kHz do 2MHz. Konstrukce daného snímače se přizpůsobuje vždy dané aplikaci.



Obr. 11 Snímač akustické emise [11]

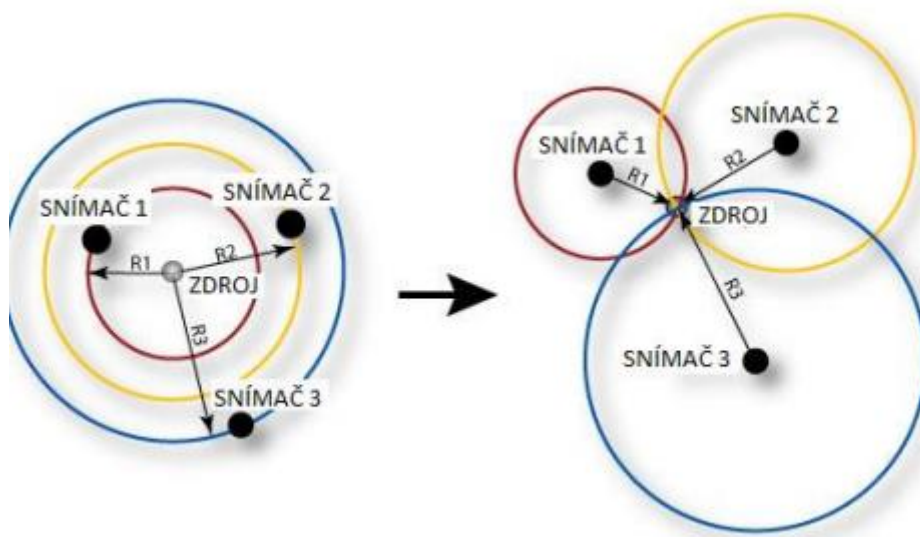
Snímač dokáže určit, z kterého místa signál vychází. Toto místo se dá lokalizovat na principu časového rozdílu elastických vln emisní události do různých snímačů sítě.

Rozlišujeme několik druhů lokalizace. První je lineární lokalizace, kde se k určení místa využívá dvou snímačů. Zdroj akustické emise se v tomto případě nachází na spojnici dvou bodů.



Obr. 12 Lineární lokalizace AE [11]

Další lokalizací je lokalizace plošná, která vyžaduje příchod elastických vln do několika snímačů. Pokud známe časové rozdíly příchodu vln do snímačů, dokážeme přesně určit místo zdroje akustické emise.



Obr. 13 Plošná lokalizace zdroje AE [11]

K doplňkovým zařízením pro hodnocení akustické emise se často používají osciloskopy dále přechodové záznamníky a analyzátoři spektra, voltmetry a speciální kalibrační nástroje.

Jako vhodný simulátor zdroje akustické emise se používá grafitový nebo olověný zlomový zdroj, který využívá modifikovanou tužku jako zdroj akustické emise v okamžiku, kdy se grafit láme proti testovací struktuře.

### **5.3 Vyhodnocování akustické emise [11]**

Jako vyhodnocení akustické emise rozumíme odhalení zdrojů těchto emisí. Základní princip je vyhodnocování akustických zdrojů při měření. Měřicí přístroje vyhodnocují odezvu měřené struktury a vnější zátěž.

Výsledkem je signál, který je následně digitalizován a zpracováván. Existují různé druhy výsledného signálu. Jednou z úrovní vyhodnocení je informativní, která pouze udává přítomnost. Tato hodnota ve většině měření dostačuje. Dále rozeznáváme standardní úroveň, která hodnotí základní parametry elektrického signálu akustické emise a zároveň vyhodnocení v časové reprezentaci. Poslední úroveň vyhodnocení je pokročilá úroveň, která vyhodnocuje celý digitalizovaný signál akustické emise.

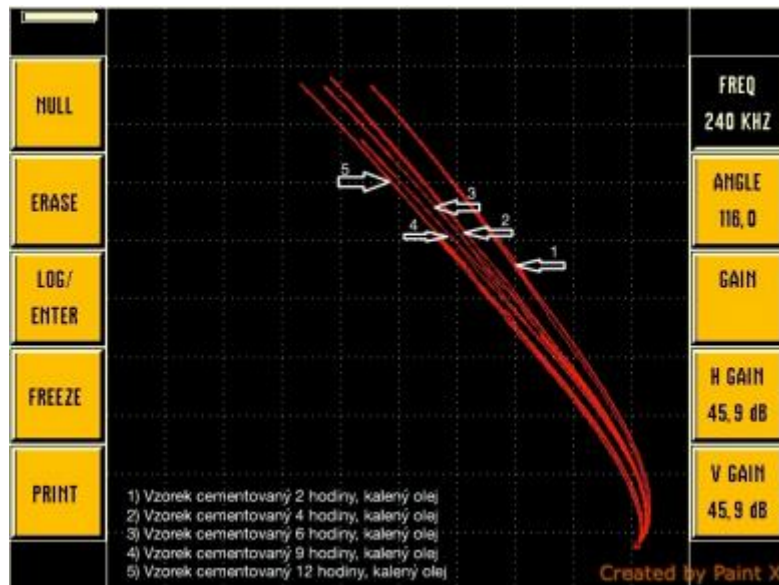
Základním parametrem vyhodnocování je efektivní hodnota, která charakterizuje výkon signálu, dále se hodnotí frekvenční spektrum signálu a jako poslední počet překmitů přes nastavenou úroveň překmitu, tedy signálu přes danou úroveň.

### **5.4 Experimentální metody ověřování CHTZ**

Vzhledem k tomu, že ověřování chemicko-tepelného zpracování (CHTZ) je velmi důležitou záležitostí, tak bylo vyvinuto mnoho metod pro jeho hodnocení. Mezi tyto metody patří konvenční metody, které jsou destruktivní. Mezi konvenční metody patří především metalografické zkoušky, dále zkoušky pro hodnocení mechanických vlastností materiálu, jako zkouška rázem v ohybu nebo tahová zkouška. Velmi často se také kvalita provedení CHTZ hodnotí pomocí měření tvrdostí.

Všechny výše popsané zkoušky jsou zkoušky, které určitým způsobem porušují zkoumaný vzorek. Z toho důvodu bylo vyvinuto mnoho metod pro hodnocení CHTZ, které není destruktivní. Jednou z metod je i metoda hodnocení pomocí vířivých proudů.

Metoda vířivých proudů v této aplikaci je založena na principu porovnávání. Porovnává se etalon se vzorkem. Výhodou této metody je její aplikovatelnost. Dá se aplikovat nejen pro hodnocení chemicko-tepelného zpracování, ale i v oblasti NDT, nebo pro měření tloušťky. Nevýhodou je zhotovení etalonů, které je nákladné vyrobit.



Obr. 14 Hodnocení CHTZ metodou vířivých proudů [6]

Na obr 12. je zaznamenáno hodnocení kvality CHTZ pomocí této metody. Vzorky byly zpracovávány cementováním a následným kalením. Je patrné, že vzorky cementované delší dobu mají jinou křivku, než ty cementované pouze dvě hodiny.

Výsledkem je možnost hodnocení CHTZ metodou vířivých proudů, což usnadňuje hodnocení a kontrolu kvality zpracování oceli.



## 6 Chemicko-tepelné zpracování ocelí [6]

Chemicko-tepelné zpracování se odlišuje od zpracování tepelného tím, že dojde k použití změny chemického složení povrchu materiálu. Tato změna je zapříčiněna sycením povrchu prvkem a následnou difuzí do tohoto materiálu. CHTZ metoda je používána hlavně v souvislosti se zvýšením tvrdosti povrchu, čímž se docílí vyšší únosnosti povrchu proti otěru, cyklické námaze apod.

Prostředí pro sycení povrchu mohou být různá pouze pod podmínkou, že musí být prostředí s vysokou koncentrací prvku, který má difundovat do materiálu. Tedy prostředí může být plynné, kapalně nebo pevné.

### 6.1 Dělení metod CHTZ [6]

Povrch součásti je záměrně ovlivňován změnami chemického složení a vrstvy vznikají následovně:

- 1) základem každého chemicko-tepelného zpracování je difuze prvků do povrchové vrstvy při teplotách, které přesahují hodnotu  $A_{c3}$ . Po difuzi následuje fázová transformace oceli. Povrch je vytvrzen díky vysokouhlíkovému martenzitu.
- 2) difuzí vhodného prvku při teplotách nad  $A_{c3}$ . Povrch je vytvrzen vznikem tvrdých povrchových fází.
- 3) difuzí vhodných prvků do povrchové vrstvy oceli bez tepelného zpracování. Tento způsob využívá nitridace nebo karbonitridace.
- 4) depoziční procesy - tehdy se na povrch materiálu nanáší vrstva, která má jiné chemické složení. Tyto vrstvy jsou velmi tvrdé a se substrátem jsou spojeny pouze difuzní vrstvou.

### 6.2 Druhy CHTZ

Metody, které se používají pro chemicko-tepelné zpracování, vytvářejí na povrchu vrstvu odlišného chemického složení, než má základní materiál. Mezi druhy CHTZ patří: cementace, nitridace, nitrocementace, karbonitridace atd.

#### 6.2.1 Cementace [6]

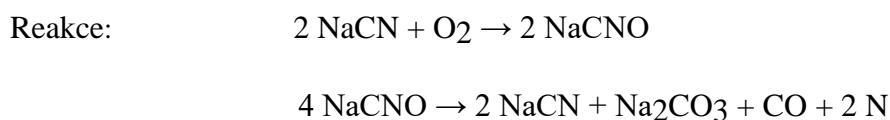
Nejčastějším používaným postupem je sycení povrchu uhlíkem. Toto sycení se provádí při teplotě nad  $A_{c3}$ . Účelem této operace je nasycení koncentrace uhlíku v povrchové vrstvě u ocelí s nízkým obsahem uhlíku (obsah uhlíku do 0,3 %) podeutektoidní nebo mírně nadeutektoidní koncentrace. Takto vzniklá povrchová vrstva, která má vysokou tvrdost, vysokou otěruvzdornost a zvýšenou odolnost proti únavě. Tloušťka vrstvy je nejčastěji do 1 mm, někdy ve výjimečných případech 2 i více milimetrů.

Podmětem ohřívání materiálu nad křivku  $A_{c3}$  je, že jeho struktura je tvořena austenitem, ve kterém se uhlík rozpouští rychleji. Povrch, který odpovídá parametrům má mít obsah uhlíku 0,85%. Vyšší obsah uhlíku na cementované vrstvě má za následek vyloučení nadeutektoidních karbidů. Tyto karbidy jsou nežádoucí, pokud jsou umístěny na hranicích zrn, protože velmi snižují houževnatost cementované vrstvy. Kvalita cementované vrstvy závisí na mnoha faktorech jako je cementační prostředí, cementační teplota, výdrž na ní a na chemické složení cementovaného materiálu, především pak na obsahu uhlíku a karbidotvorných prvků.

Cementační prostředí používáme pevné, kapalně a plynné. Cementování v sypkém prostředí (prášku) je nejstarší způsob. V současné době se cementování v sypkém prostředí moc nepoužívá pro dlouhé trvání operace. Kvůli nutnosti vyhřátí materiálu a velké masy zásypu, který se skládá z dřevěného uhlí s přídavkem koksu a aktivátoru (nejčastěji  $BaCO_3$ ), na cementační teplotu 880 až 920 °C, jsou náklady na operaci vysoké. Nejčastější využití je v kusové výrobě, díky vlastnosti prostředí cementovat výrobek jakéhokoliv tvaru a velikosti.

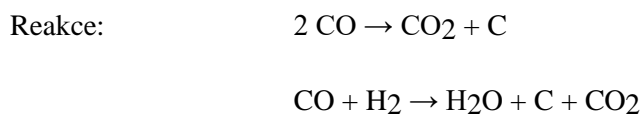


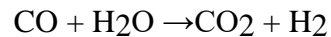
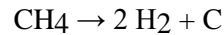
Cementace v kapalném prostředí se využívá hlavně pro malé až střední výrobky, u kterých není požadavek na silnou cementační vrstvu. Tento způsob je velmi rychlý, ale kvůli používání kyanidů je neekologický. Z toho důvodu se tento způsob moc nepoužívá.



Dnes nejčastěji používaný způsob je v plynném prostředí. Složení plynné atmosféry bývá 20 %  $CO$ , do 40 %  $N_2$ , do 40 %  $H_2$ , 0,4 %  $CO_2$  a 3 až 15 %  $CH_4$ .

Teplota při cementaci se pohybují mezi 850 a 1050 °C. Tato teplota závisí na druhu oceli, cementačním prostředí a velikosti výrobku. U většiny ocelí se pohybuje mezi 900 a 950 °C. Vyšší teplota podporuje difúzi, takže rychlost cementace roste. Vysoký koncentrační spád má za následek vyšší obsah uhlíku, a tím vyloučení křehkého sekundárního cementitu. Tento cementit znehodnocuje vrstvu.





Jestliže je potřeba proces urychlit, rozdělí se vše na dvě části. První etapa, sytící, koncentraci uhlíku v povrchové vrstvě zvýší až na 1,2 % a při následné etapě, difúzní, se snižuje na požadovaných 0,85%. Čas cementace můžeme zkrátit vakuovým cementováním při tlaku 1 až 10 Pa. Nauhličuje se pomocí toku uhlovodíků ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ) 30 až 60 minut. Difúzní stádium, trvá 10 až 20 minut. Při difúzním stádiu se uhlovodíky evakuují z prostředí. Metoda je časově nenáročná a navíc je i ekologická. Vyžaduje ale vyšší počáteční investice do zařízení.

Další rychlou metodou je cementace v doutnavém výboji. Mezi výrobkem (katodou) a anodou je potenciálový rozdíl několik kilovoltů. Uhlíkový potenciál v plazmatu je vysoký, takže postačí krátké nauhličující stádium (10 minut), následované difúzním stádiem (30 minut). Výhodou je mimořádná rovnoměrnost vrstvy a malá spotřeba plynu.

Cementované předměty je nutné zpracovat tepelně. To je z důvodu získání potřebné tvrdosti povrchu, pevnosti a houževnatosti jádra. Rozdílný obsah uhlíku má za následek nepříznivé rozložení vnitřního pnutí, které může vést až k deformacím.

Nejjednodušší a nejpoužívanější způsob tepelného zpracování je kalení přímo z cementační teploty. Ovšem tato metoda má za následek hrubnutí austenitického zrna. Teplota cementace je pro nacementovanou vrstvu příliš vysoká a dlouhou výdrž na této teplotě hrubne austenitické zrno, takže výsledná struktura martenzitu má vysoký podíl nerovnovázné struktury zbytkového austenitu.

Materiál má vzhledem k vysokému rozdílu teplot vyšší vnitřní pnutí, která ovlivňuje únavovou pevnost, a následná vrstva je méně odolná a má menší tvrdost. Lepší způsob je kalení s přichlazením, kdy je kaleno z teplot nad  $A_{c1}$ , což zrno nezjemňuje, ale sníží vnitřní pnutí. Nejpoužívanější postup je kalení s podchlazením pod teplotu  $A_{c1}$  a následný ohřev nad tuto teplotu. Dojde k překristalizaci, a tím pádem výsledná struktura je jemnější. Vnitřní pnutí se sníží. Další možnost je kalit po ochlazení na pokojovou teplotu a opětovném ohřátí nad  $A_{c3}$  (kalení na jádro). Výsledkem je houževnaté a pevné jádro.

Pro cementační vrstvu je nejvhodnější kalit z teplot nad  $A_{c1}$  (kalení na vrstvu), ale jádro je podkaleno. Poté následuje popuštění, které je při nízkých teplotách (150 až 220 °C) ke snížení vnitřního pnutí. Tvrdost vrstvy po cementaci by neměla klesnout pod 58 HRC. Výsledkem cementace uhlíkových ocelí ve vakuu je tvrdost 63 HRC. Nejvyšší tvrdosti vrstvy je po nauhličování v plazmatu – 66 HRC. Pevnost a houževnatost jádra výrobku ovšem závisí



vnitřních pnutí v povrchových vrstvách. Tato pnutí zvyšují otěruvzdornost a odolnost proti únavě. Obecně platí, že po aplikaci nitridování se materiál dále nezpracovává.

### **6.2.3 Nitrocementace [6], [7], [8]**

Nitrocementace je sycení povrchu výrobku uhlíkem a dusíkem při teplotách nižších než cementačních, ale nad  $A_{c3}$  (840 – 860 °C), kdy se dusík a uhlík rozpouští v austenitu. Vrstva je tvořena současně difuzí dusíku a uhlíku v austenitu.

Tyto vrstvy jsou obdobou vrstev cementovaných. Dusík ovšem podporuje difúzi uhlíku, z čehož vyplývá, že je potřebná teplota nižší než u cementace. Celý proces je kratší a výhodnější než cementace. Deformace způsobené teplem jsou nižší a tento způsob je vhodný i pro oceli, které jsou náchylné na hrubnutí zrna při austenitizaci. Prokalitelnost je oproti cementačním vrstvám díky dusíku vyšší.

Prostředí pro nitrocementaci je plynné a doba procesu je pro nástroje asi 10 až 20 minut. Po operaci je potřeba výrobek kalit (kalení může být přímo z nitrocementační teploty) a následně popouštět při teplotě kolem 150 °C. Výsledná ochlazená struktura obsahuje zbytkový austenit v takovém množství, aby byla zaručena požadovaná tvrdost, která je dána nitridy a martenzitem. Austenit však zvyšuje únavovou pevnost, plasticitu a rázovou houževnatost. Jako optimální tloušťka vrstvy je považováno 0,25 až 0,5 mm. Podobné vlastnosti a struktura jako u nitrocementace vznikne při nitridaci uhlíkových ocelí

### **6.2.4 Karbonitridace [6], [7], [8]**

Podstatou tohoto procesu je sycení povrchu oceli uhlíkem a dusíkem při teplotách pod  $A_{c1}$  (většinou 560 – 620 °C). Na povrchu se vytváří tenká bílá vrstva s tvrdostí až 1000 HM, která je dána oxikarbonitridem, a s tloušťkou 10-50  $\mu\text{m}$ . Vrstva je odolná vůči otěru a zadírání. Pod bílou vrstvou je tzv. difúzní vrstva o tloušťce asi 1 mm a tvrdosti 300 až 400 HV, kde dusík proniká do feritu.

Difúzní vrstva zvyšuje únavovou pevnost a zlepšuje vlastnosti vrstvy. Mez únavy se zároveň zvyšuje ochlazováním do oleje. Chlazení v oleji je nutné při teplotách karbonitridace nad 590 °C (eutektoidní teplota v diagramu Fe–N). Proces je možno provádět v prostředí pevném (kyanid + aktivátor), v solné lázni nebo i v plynném prostředí. Dnes je nejvíce využíváno plynné prostředí, kde není potřeba využití jedovatého kyanidu.

Výhodou karbonitridování je rychlost operace, která se pohybuje mezi 2 a 4 hodinami. Nárůst rozměrů je velice malý a deformace výrobků jsou zanedbatelné. Další výhodou je, že není nutné následné tepelné zpracování výrobku.

## 7 Chyby při CHTZ [6]

V celé technologické praxi se setkáváme s řadou případů, kdy ve výrobku vznikají vnitřní napětí-pnutí. Někdy jsou tato vnitřní napětí tak značná, že může dojít ke vzniku mikrotrhlin. Jindy, je-li úroveň vnitřního napětí srovnatelná s pevností, i k porušení celého výrobku. Vedle tepelného a chemicko-tepelného zpracování jde i o důsledky intenzivního tváření za studena, hrubovacích, ale i dokončovacích metod obrábění, svařování, pájení, odlévání, povlakování kovy, plasty a především keramikou.

### 7.1 Napětí v materiálech

Z hlediska časového působení vnitřních pnutí rozeznáváme:

- a) dočasná vnitřní napětí
- b) zbytková vnitřní napětí

Dočasná vnitřní napětí působí, dokud trvá příčina, která je vyvolala. Touto příčinou nejčastěji bývá nerovnoměrné teplotní pole mezi povrchovými a vnitřními partiemi výrobku. Poté pružná deformace vzniklá lokální rozdílnou dilatací vytváří dočasné vnitřní napětí, které trvá, dokud se nevyrovnají teploty v celém objemu výrobku. Stejně dočasný charakter může mít i vnitřní pnutí vznikající během ohřevu nebo ochlazování kovu, ve němž dochází k nehomogenní deformaci z důvodu nerovnoměrného průběhu fázové transformace.

Pokud i po odstranění vnějšího impulsu (externího silového působení či nemechanické příčina) část vnitřních napětí ve výrobku přetrvává, hovoříme o zbytkových napětích či pnutích. Zbytkové pnutí je tedy jedním z mnoha druhů vnitřních napětí, vznikajících v důsledku nehomogenní deformace a můžeme je obecně definovat jako vícesé napětí, působící ve výrobku po velmi dlouhou dobu, přestože všechny jeho části mají stejnou teplotu a na výrobek již nepůsobí žádné vnější síly.

Tepelná zbytková napětí - jsou vyvolaná různými teplotními gradienty uvnitř výrobku či rozdílnými teplotními koeficienty roztažnosti jednotlivých částí výrobku nebo strukturálních složek

Deformační zbytková napětí - např. obráběním jsou povrchové vrstvy deformovány intenzivněji než vnitřní části výrobku. Po odstranění vnějších tlakových sil vzniká na povrchu tahová a uvnitř tlaková pnutí či napětí.

Strukturální zbytková pnutí - nehomogenní strukturální transformace je doprovázena objemovými změnami (např. transformace austenitu na ferit nebo objemově rozdílnější transformace austenitu na martenzit). Co je společnou podstatou všech výše uvedených pnutí, je zřejmé z Hookeova zákona:  $\sigma = E \cdot \varepsilon$

Úroveň pnutí je určována velikostí elastické deformace vyvolané objemovými změnami ve výrobku. Pojem vnitřního pnutí či napětí tedy plně odpovídá pojmu vnitřní elastické deformace, neboť ona tento jev zcela kontroluje. Dále je pak pnutí funkcí modulu pružnosti E.

Vnitřní pnutí se obvykle rozděluje podle velikosti objemů, v kterých působí na:

- a. Pnutí I. druhu - mikropnutí - Zasahují celý objem výrobku a jejich orientace je určena především jeho geometrií. Vznikají jako důsledek výrobních operací. Například hrubování nevyžehnaného odlitku odstraní povrchovou vrstvu, stav napjatosti se změní a výrobek se deformuje. Vznikají v každém ohřivaném nebo ochlazovaném výrobku (bez ohledu na průběh fázových přeměn) v důsledku nerovnoměrnosti jak vnějšího, tak i vnitřního přenosu tepla. U plastických ocelí se toto mikropnutí snižuje postupnou plastickou deformací. Tento proces se označuje relaxace.
- b. Pnutí II. druhu - mikropnutí - Působí v oblastech srovnatelných s velikostí zrna nebo několika subzrn. Vznikají fázovou transformací nebo deformací kovu, když různá zrna či subzrna vykazují rozdílné elastické napěťové stavy. Orientace těchto pnutí se neváže ke geometrii výrobku. V celém objemu se pnutí II. druhu mohou vzájemně vyrovnat. Někdy se tato pnutí označují také jako homogenní mikroskopická pnutí.
- c. Pnutí III. druhu - submikroskopická - Také tato pnutí nemají žádný vztah k tvaru výrobku. Zasahují nepatrné objemy řádově velikosti elementární buňky krystalové mřížky. Tato nehomogenní pnutí jsou důsledkem elastické distorze mřížky při rozměrech od zlomku nanometru do hodnoty mřížkového parametru. Charakteristickými příklady jsou bodové mřížkové poruchy (vakance, intersticiální nebo substituční atomy). Také napjatost vyvolaná hranovou dislokací či koherentním rozhraním matrice a vyloučeného precipitátu způsobuje submikroskopická pnutí.

U reálných výrobků se nesetkáváme s výše uvedenými druhy pnutí jednotlivě. Obecně vzniklá vnitřní napjatost je výsledkem superpozice pnutí I. až III. druhu. Pnutí jednotlivých druhů se vzájemně ovlivňují. Např. nárůst mikropnutí může vést až ke vzniku makropnutí.

### **7.1.1 Deformace při CHTZ [6]**

Změny tvaru a rozměru výrobku jsou průvodními jevy při tepelném zpracování. Ve své podstatě se jedná o jevy negativní, ale nelze je zcela odstranit, ale pouze je eliminovat. Tyto vady se dají rozdělit do dvou skupin na:

- a) změny objemové
- b) změny tvaru

Objemové změny jsou víceméně zákonité, jsou vyvolány zvětšením nebo zmenšením objemu v důsledku fázových změn. Z měrných objemů strukturních složek je zřejmé, že

austenitizace je spojena s objemovým smrštěním, zatímco martenzitická přeměna s objemovým nárůstem. Velikost rozměrových změn tedy souvisí s obsahem uhlíku v martenzitu (s jeho rostoucím obsahem rozměrové změny vzrůstají) a s podílem zbytkového austenitu po kalení (s rostoucím obsahem jsou objemové přírůstky menší). Přírůstek rozměrů po kalení se zmenšuje popouštěním. U vysokolegovaných ocelí (vykazujících sekundární tvrdost) může dojít k dalšímu zvětšení rozměrů vlivem rozpadu zbytkového austenitu. Důsledky objemových změn možno částečně kompenzovat vhodně volenými přísadkami před tepelným zpracováním.

Tvarové změny působí mnohem větší potíže. Tyto změny jsou způsobeny nerovnoměrným rozložením tepelným a transformačních pnutí. Velikost změny geometrického tvaru a její výskyt je ovlivněn řadou faktorů od samotného návrhu až po tepelné zpracování. Výskyt deformací je vnějším projevem rozložení a velikosti pnutí. Nejedná se pouze o pnutí tepelná či strukturní, ale na úroveň deformací po tepelném zpracování působí i zbytková pnutí ve výrobku před vlastním zpracováním způsobená například tvářecí texturou, různým stupněm zpevněním povrchu při třískovém obrábění. Je tedy snahou tato vstupní pnutí před tepelným zpracováním odstranit použitím žíhaní. Eliminace změn tvaru je velmi náročná jednak z hlediska odhadu jejich velikosti a umístění, jednak tkví v problematice odstraňování.

K největším tvarovým změnám dochází samozřejmě při uplatnění nejvyšších strukturních změn i nejvyšších rychlostí ochlazování. Podobně jako při ohřevu v kalených výrobcích vnitřní pnutí a tím deformace závisí především na:

- druhu a vlastnostech oceli
- podmínkách austenitizace
- podmínkách kalení
- velikosti a tvaru výrobku

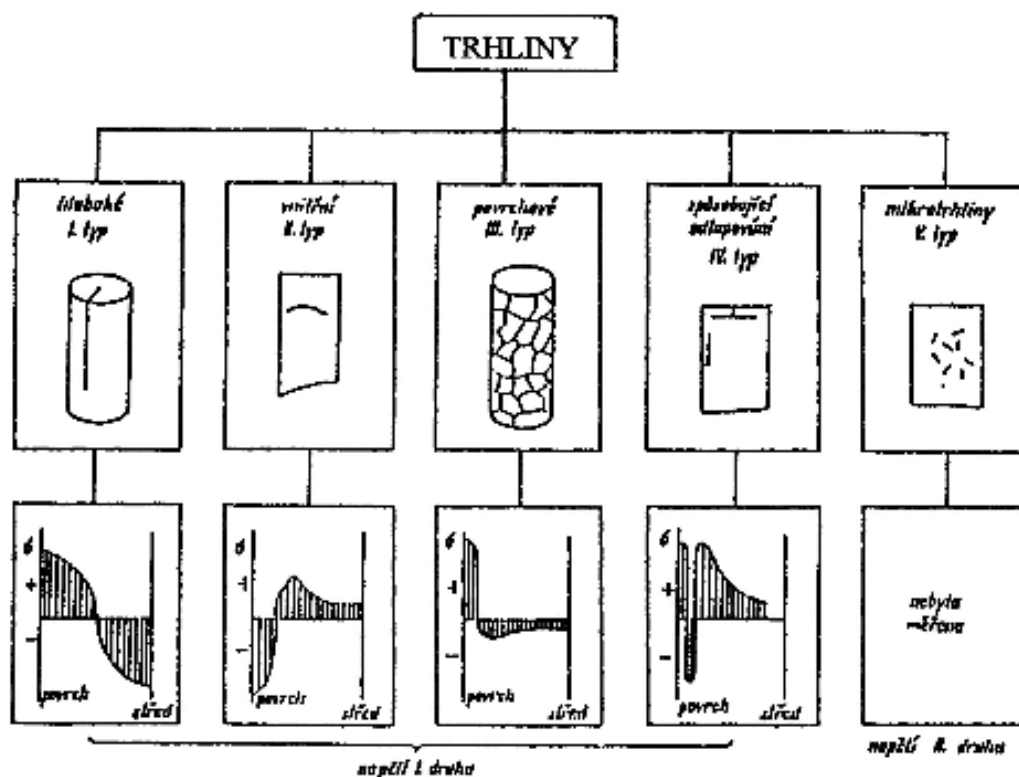
Vnitřní pnutí u oceli je tím větší, čím je menší tepelná vodivost, čím je větší tepelná roztažnost, čím je menší prokalitelnost, tvárnost a čím jsou větší objemové změny při tvoření martenzitu. Vnitřní pnutí jsou tím větší, čím byla nedokonalejší austenitizace a prohřátí výrobku. Vzrůstá, zvětšuje-li se rozdíl teplot mezi kalenou součástí a kalícím prostředím a zvyšuje-li se rychlost ochlazování v kalícím prostředí.

Výsledkem vnitřních pnutí mohou být nejen poruchy velikosti vrstvy, ale může docházet i k trhlinám. Samotné trhliny podporují i vady povrchové i vnitřní. Trhliny vznikají na povrchu i uvnitř materiálu. Vzhledem k tomu, že se tepelné zpracování ve většině případech provádí jako konečná operace, může být výrobek znehodnocen trhlinou. Metodou pro zabránění



trhlin je správná volba technologického postupu a zařazení mezioperací, které zamezují vzniku trhlin.

Obecně trhliny dělíme na pět základních vad. Dané trhliny dělíme dle Obr 13.



Obr. 15 Popis trhlin po tepelném zpracování [6]

## 7.2 Hodnocení hloubky cementační a nitridační vrstvy [10]

Hloubka vrstvy, ať už cementace nebo nitridace, je základním faktorem hodnocení kvality CHTZ.

Průběh nasycení povrchu je dán křivkou, která určuje obsah sytícího prvku ve struktuře povrchu. Křivka může být strmá nebo plochá. Tyto křivky ovlivňují do určité míry vlastnosti vzniklé struktury. Pokud je ve struktuře vysoký pokles sytícího prvku směrem od povrchu k jádru, dochází ke vzniku vysokého pnutí uvnitř struktury.

Hloubka vrstvy se dá hodnotit různými metodami. V současné době kalírný hodnotí kvalitu podle propočtu času sycení a tvrdosti povrchu výrobku. Pokud to případný zákazník požaduje, je spolu s materiálem vložen vzorek, který je následně hodnocen destruktivně.

Jednou ze základních metod je měření tvrdosti, kde se hodnotí velikost vrstvy pomocí metody HV1. Tato metoda je nej přesnější metoda, ale zároveň se jedná o destruktivní metody.

U měření tvrdosti je důležité zhotovení metalografického výbrusu. Tato operace je časově hodně náročná.

Další metodou je chemický rozbor. Pro chemický rozbor se dají použít spektrografické analyzátoři. Využívá dopadajícího elektromagnetického záření, které předává elektronův v materiálu.

Mezi méně používané metody patří metody lomových zkoušek. Tato zkouška pro hodnocení takovýchto parametrů je rychlá, ale méně přesná.

Jako poslední metody se dají zařadit zkoušky magnetických a elektrických vlastností. Tyto metody spadají do metod nedestruktivních. V takovém případě se hodnotí změny elektrických vlastností struktury. Elektrické vlastnosti se mění v závislosti na obsahu uhlíku potažmo dusíku v materiálu.

### **7.3 Velikost zrna materiálu [18]**

Velikost zrna je jedním ze základních faktorů, které ovlivňují mechanické vlastnosti, plastické vlastnosti, odolnost proti nárazu a také kalitelnost. Velikost zrna se vyznačuje velikostí austenitického zrna a je na něm závislé různé faktory. Mezi tyto faktory patří deoxidace, stupeň chlazení apod. Růst zrna je ovlivňován teplotou. Velikost zrna se zvyšuje s teplotou a časem při teplotě.

Jako ochrana proti růstu austenitického zrna se používá přísada hliníku. Dále se používají prvky jako nikl, nebo molybden, které taky poskytují ochranu proti růstu zrna. Hrubnutí zrna není problém u teplot kolem 925 °C, ale při teplotách vyšších než 1000°C dochází ke hrubnutí zrna.

Velikost zrna, jak je zmíněno, dříve ovlivňuje i kalitelnost, kdy jemnozrné oceli jsou méně kalitelné než oceli hrubozrné. Obvykle se pro zamezení růstu zrna používají hliníkové částice, které je ale spojeno s růstem nežádoucí tvorbou AlN nebo částic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, které poskytují nukleační místa pro růst hrubozrnných karbidů.

Velikost zrna se dá kontrolovat při výrobě oceli. Samotná kontrola se provádí pomocí regulace teploty. Zahřívání oceli na teplotě Ac<sub>1</sub>, bude produkovat průměrnou velikost zrna, ale pokud teplota bude vyšší, bude zrno oceli hrubnout. Jedná-li se o kalení z teploty Ac<sub>1</sub> je struktura jemnozrná, ale pokud by kalení probíhalo z teploty vyšší je jasné že i zrno materiálu bude větší.

Samotná velikost austenitu bude při kalení ovlivňovat i růst martenzitu. Samotná velikost zrna má v případě kontroly tepelného zpracování pomocí metod NDT veliký vliv. Velikost zrna ovlivňuje rychlost šíření např. ultrazvuku, který se šíří materiálem.

## **7.4 Strukturní nestejnorodost [13]**

Mezi další chyby při CHTZ jsou strukturní nestejnorodosti se rozumí nestejnorodost zastoupení určitého chemického prvku ve struktuře materiálu. K takové nestejnorodosti může dojít vlivem záměny materiálu nebo chybnou tavbou.

Současným způsobem hodnocení struktury je zhotovení metalografického výbrusu a provést rozbor, a i chemickou analýzu.

## **7.5 Nedodržení technologického postupu CHTZ [13]**

Nedodržení technologického postupu je jednou z nejčastějších vad výrobku. V takovém případě dochází k velkým finančním ztrátám hlavně v případě sériové výroby. Proto kontrola technologického postupu je nezbytnou součástí výroby. Aspekty, díky kterým mohou vznikat vady nedodržením technologického postupu popisuje následující kapitoly.

### **7.5.1 Volba času sycení [13]**

Čas u tepelného zpracování hraje velkou roli. Doba sycení, musí být dostatečně dlouhá, aby proběhly všechny požadované změny struktury, které jsou spojeny s difuzními pochody. Jestliže by byla doba dlouhá může docházet k růstu zrna, což je negativní.

Pokud nebude dodržena doba sycení materiálu, může dojít k nedostatečnému množství uhlíku na povrchu materiálu (v případě cementace), nebo dusíku (v případě nitridace), což má za následek snížení povrchové tvrdosti materiálu, necelistvosti této vrstvy a menší hloubku vrstvy.

Správná volba času je tedy velice důležitá s ohledem na použití výrobku a samozřejmě také z ekonomického hlediska.

### **7.5.2 Ochranná atmosféra [13]**

Pro účel ohřevu na kalící teplotu je nutné použití ochranné atmosféry. Funkcí ochranné atmosféry je chránit součást před oduhličením a okujením. Vzhledem k obsahu uhlíku v oceli, musí atmosféra mít velký uhlíkový potenciál, aby nedocházelo k oduhličování.

### **7.5.3 Teplota ohřevu a rychlost ochlazování [13], [15]**

Součástí některých typů CHTZ je kalení, kdy až po tomto procesu získává materiál požadované vlastnosti. Důležitým faktorem je zde volba teploty pro kalení.

Cementované výrobky je možné kalit několika způsoby. Tyto způsoby se volí podle typu materiálu, použití výrobku a podle požadavků konstruktérů.

Jedním způsobem je kalení přímo z cementační teploty, což je nejjednodušší a zároveň neekonomičtější způsob kalení. Tímto způsobem vzniká hrubá struktura s velkým podílem

zbytkového austenitu. Touto metodou také vznikají velká vnitřní pnutí a dochází ke značným deformacím. Vrstva vyrobená touto metodou je také náchylnější na praskliny.

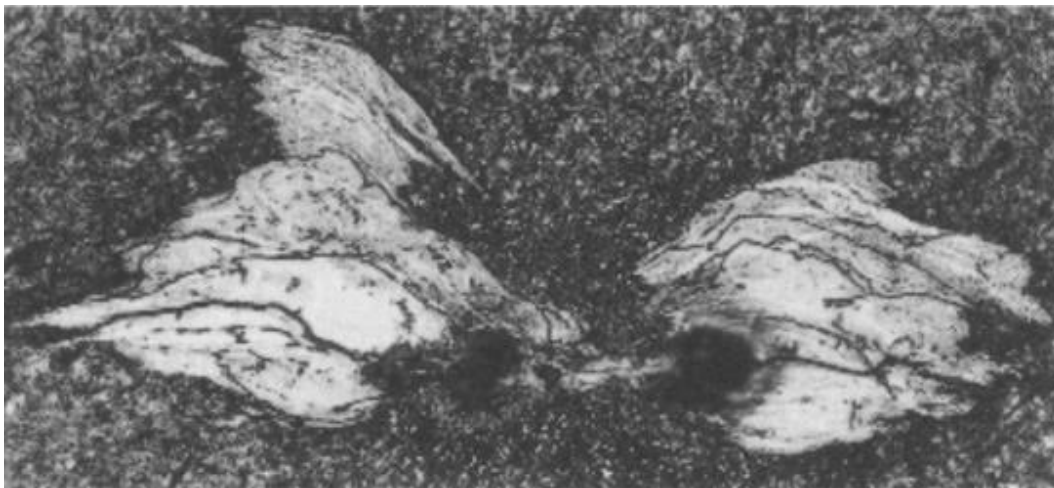
Dalším aspektem, pro tepelné zpracování po nasycení je ochlazovací prostředí, které ovlivňuje rychlost ochlazení. Rychlost ochlazování se uvádí ve °C/s, a měla by být nadkritická. Nejrychlejším ochlazovacím médiem je voda.

Jemnost struktury je závislá na rychlosti ochlazování. Čím rychlejší ochlazování tím jemnější struktura vzniká.

Při kalení může dojít k nerovnoměrnému ochlazování z důvodu nestejného přestupu tepla v různých místech vsázky. Další příčinou mohou být geometrické tvary materiálu a velikost materiálu.

Pokud dojde k porušení materiálu křehkým lomem, je příčina vzniku takového porušení v tzv. překalení, tedy dosažení velmi vysoké tvrdosti na úkor houževnatosti. Vysokou rychlostí ochlazování se do materiálu také vnášejí napětí, která mají za následek vznik trhlin (viz obr 16). Rychlost ochlazování je součástí většiny tepelného zpracování a zároveň jedním z nejdůležitějších aspektů.

Naopak, pokud rychlost ochlazování bude malá, uhlík se může uvolnit a nemusí se získat požadovaná tvrdost struktury.

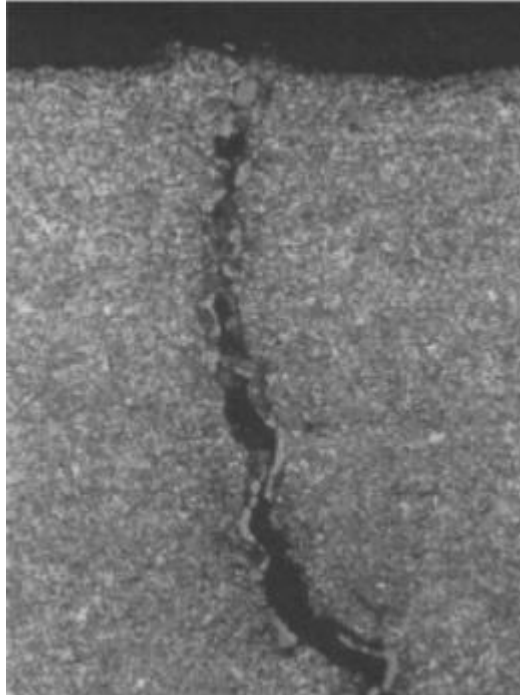


Obr. 16 Trhliny vzniklé po nadkritickém ochlazení [15]

#### 7.5.4 Rovnoměrnost ochlazování a ochlazovací media

Rovnoměrné ochlazování je důležitým faktorem z hlediska vzniku trhlin. Nerovnoměrné ochlazení vede k nerovnoměrnému přenosu tepla během kalení a dochází k velkým teplotním gradientům mezi povrchem a jádrem součásti. Trhlinu vzniklou nerovnoměrným ochlazením lze vidět na obr. 17. Na tomto obrázku je patrný temperovaný

martenzit společně s perlitem a bainitem. Na rovnoměrnost ochlazování má samozřejmě vliv ochlazovací prostředí. Pokud je pro ochlazování zvoleno kalící prostředí, u kterého dochází ke změně skupenství je charakterizováno třemi údobími. Prvním z nich je vznik parního polštáře, vznikající po vložení materiálu do kalícího prostředí. Z toho důvodu se do kalící lázně přidávají přísady, které eliminují tento polštář.



Obr. 17 Trhlina vzniklá nerovnoměrným ochlazením [15]

Při tepelném zpracování je také zásadní správná volba kalícího prostředí, která má vliv na jakost výrobku. Pokud se jedná o oceli uhlíkové je jako správné medium volena voda nebo vodní roztoky. Jestliže se jedná o oceli legované, postačí použití jako ochlazovacího media olej. Na samotný výběr ochlazovacího media má vliv nejen samotný materiál, ale i jeho tvar a velikost. Příliš velká rychlost ochlazování není žádoucí což je prokázáno již v minulé podkapitole. Příčinou vzniku deformací je velký rozdíl teplot mezi jádrem a povrchem materiálu.

## **7.6 Vnitřní oxidace [18]**

Vnitřní oxidace je dalším ze zásadních parametrů, které ovlivňují mechanické vlastnosti materiálů. Hloubka vnitřní oxidace se může lišit ve velikosti od 1mm do 30mm. Vnitřní oxidace se skládá z kontinuální oxidické vrstvy na povrchu, řádově 0,01mm. Tato malá vrstva vzniká v důsledku kontaktu povrchu s kyslíkem.

Během procesu nauhličování plynem se oxidy vytvářejí nejen na povrchu, ale i uvnitř materiálu. Je to způsobené difuzním procesem, kdy hloubka a rozsah penetrace je závislá na druhé odmocnině celkového času nauhličování.

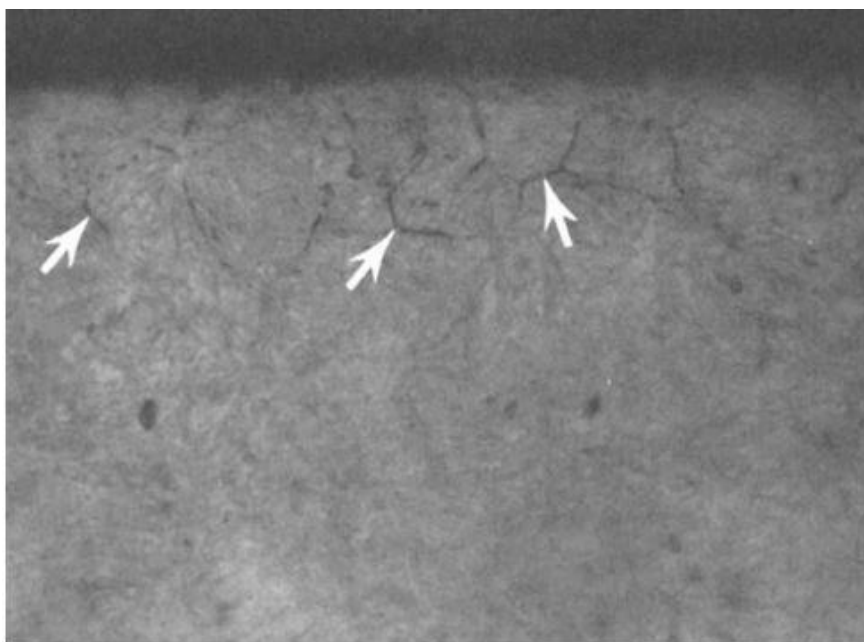
Pravděpodobnost oxidace uvnitř zrna materiálu stoupá podle velikosti zrna. Oxidaci uvnitř zrna je patrná na obr 18. Na tomto příkladu je patrná oxidace na povrchu i na hranicích zrn, kde je doprovázena i nemartenzitickými transformačními produkty.

*Obr. 18 Oxidy u materiálu 20MnCr5 [16]*



K oxidaci uvnitř materiálu dochází ve dvou fázích. Vnitřní a vnější zóně. Oxidy chrom-manganu se obvykle tvoří ve vnější zóně na hranicích zrn, ale i uvnitř zrn. Co se týká vnitřní zóny, tak zde se tvoří křemíkové oxidy, které vytvářejí hranice výhradně uvnitř zrn.

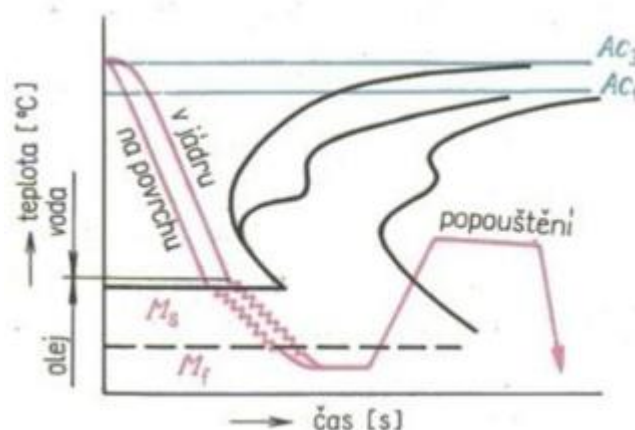
Oxidy, které se nacházejí na povrchu mají kulovitý tvar. Intergranulární oxidy se vytvářejí dále z povrchu. Příkladem může být chrom-manganová ocel, kde se globulární oxidy vytvářejí blíže k povrchu a intergranulární oxidy v oblasti dále od povrchu, což je patrné na obr 19.



Obr. 19 Intergranulární oxidy [16]

## 7.7 Zbytkový austenit

Zbytkový austenit, který zůstává v materiálu po kalení závisí na hodnotách  $M_s$  (martenzit start) a  $M_f$  (martenzit finish). Pokud je požadavkem úplná transformace, je důležité chladit kalený materiál dusíkem podchlazeným na teplotu  $-196^{\circ}\text{C}$ . Při tomto ochlazování se docílí úplné transformace, kdy je důležité co nejrychleji dosáhnout stavu  $M_f$  (martenzit finish), což je patrné na ara diagramu oceli. Zbytkový austenit v oceli je důvodem zmetkovitosti, neboť výrobek s vysokým obsahem zbytkového austenitu není stálý a výsledkem není dosažení takové tvrdosti. Zároveň dochází ke snižování pevnosti v tahu a meze kluzu se zvyšujícím se množstvím zbytkového austenitu. Dále dochází ke snížení povrchového tlaku na součást, snižuje se odolnost proti únavě a klesá odolnost proti opotřebení.







## 8 Praktická část

Praktická část této diplomové práce se zabývá zhotovením a navržením programu hodnocení materiálu po CHTZ pomocí nedestruktivního hodnocení. Diplomová práce je zpracovávána na podnět firmy MKV ozubená kola s.r.o., která dodala materiál na výrobu vzorků. Firma chce využít poznatky z diplomové práce v procesu výroby strojních součástí, tak aby se snížili náklady na výrobu jejich zakázek. Experiment byl prováděn na třech typech ocelí. Jedná se o oceli ČSN EN 14220 (EN 16MnCr5), ČSN 16323 (EN 18CrNiMo7-6) a ČSN 15330 (EN 31CrMoV9). Tyto materiály se běžně v praxi používají na výrobu ozubených kol a velkých strojních zařízení. Závěry z této diplomové práce lze použít nejen pro zadávající firmu ale i v obecném strojírenství.

Z hlediska potřeb a požadavků vzešlých ze strany společnosti MKV ozubená kola, s.r.o. byla práce zaměřena na zhodnocení vhodnosti tradičních metod NDT pro aplikace kontroly chemicko-tepelného zpracování. Získané výsledky byly porovnávány s destruktivními klasickými metodami pro hodnocení.

Diplomová práce se zaměřuje na metody ultrazvukové kontroly, kontroly pomocí metody vířivých proudů a metody akustické emise. Základním teoretickým předpokladem pro kontrolu správnosti provedení CHTZ pomocí NDT je hypotéza, že chemicko-tepelným zpracováním dojde k ovlivnění plastických a elastických vlastností materiálu a tím k ovlivnění ultrazvukové vlny a vířivých proudů.

Výsledkem praktické části této diplomové práce by mělo být zjištění, které chemicko-tepelné zpracování má nejvýraznější vliv na ultrazvukové vlny, vířivé proudy a akustickou emisi.

### 8.1 Výroba vzorků

Vzorky požívané v diplomové práci byly vhodným způsobem chemicko-tepelně upraveny a byly v nich záměrně vytvářeny strukturní vady, které byly cílem měření a porovnání. V případě materiálu 16MnCr5 byl zvolen způsob tepelného zpracování cementace. Tento způsob byl využit, protože se jedná o cementační materiál, což znamená, že se jedná o materiál vhodný pro tento způsob TZ. Cementace byla prováděna v prášku s různou dobou cementace při stejné teplotě. Byla zvolena doba 3, 6, 12 hodin, kdy je porovnáván vliv tloušťky cementované vrstvy na mechanické vlastnosti materiálu.

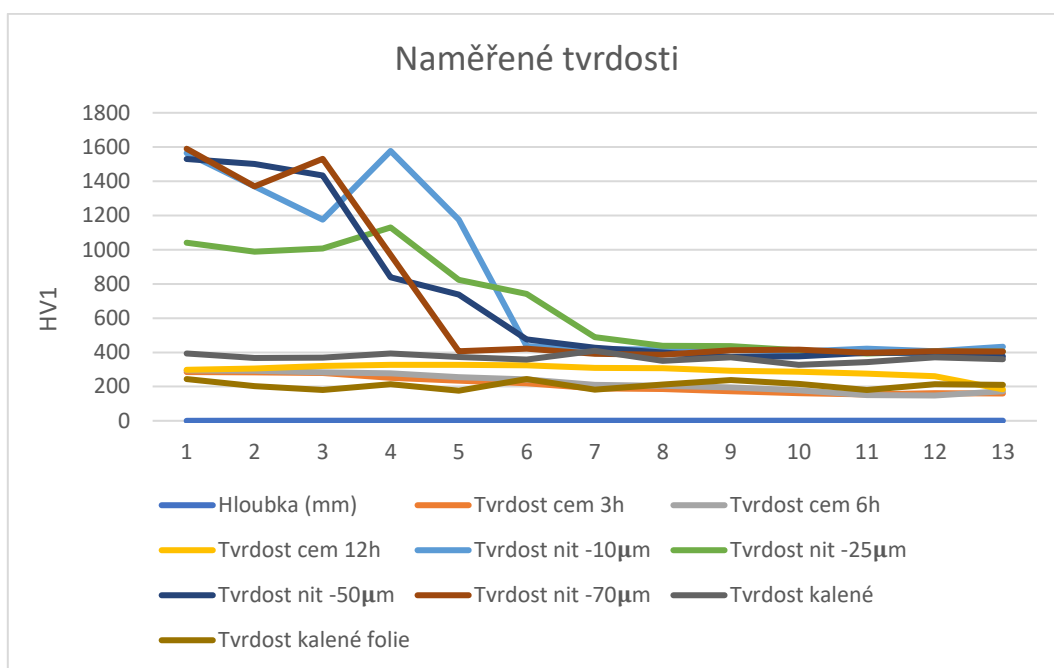
Dále byla zvolena jako vhodná chyba, která ovlivňuje NDT metody, chyba překalení. Tato chyba vzniká obvykle změnou rychlosti ochlazování při kalení. Této změny se docílilo



hloubky jednotlivých vrstev a jejich tvrdostí. V grafu 1 jsou patrné průběhy tvrdostí vzdalující se od povrchu materiálu směrem k jádru. Každá křivka znázorňuje materiál jinak zpracovaný nebo upravený.

Hloubka (mm)	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45
Tvrdość cem 3h	285	283	279	251	235	220	190	186	173
Tvrdość cem 6h	295	293	283	278	255	242	210	204	195
Tvrdość cem 12h	298	306	320	327	327	324	310	307	292
Tvrdość nit -10µm	1564	1370	1176	1577	1176	437	420	415	414
Tvrdość nit -25µm	1041	988	1008	1130	823	742	488	438	436
Tvrdość nit -50µm	1530	1501	1434	839	738	475	428	399	374
Tvrdość nit -70µm	1590	1370	1530	970	407	421	391	386	412
Tvrdość kalené	394	368	369	394	373	357	409	350	371
Tvrdość kalené folie	244	203	180	214	176	244	183	212	239

Tab. 1 Naměřené hodnoty tvrdostí HV1

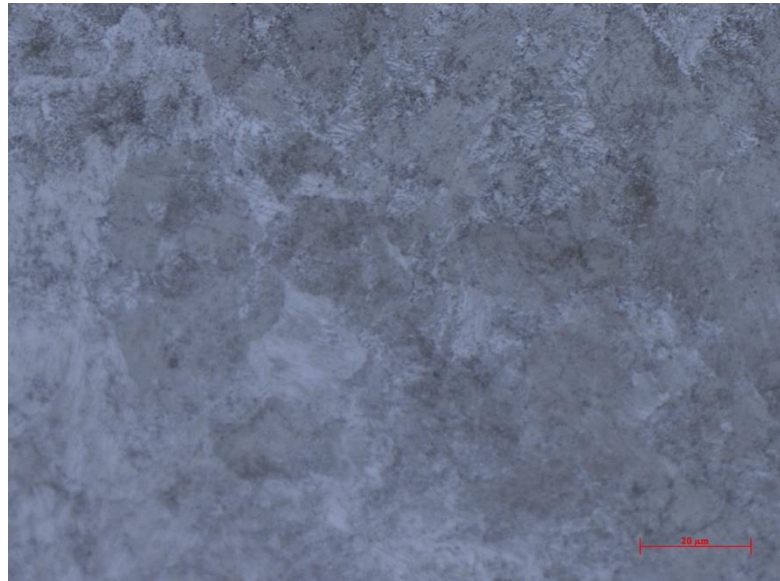


Graf 1 Naměřené hodnoty tvrdostí

Hlavním cílem diplomové práce bylo zhodnotit, zda chybně provedené CHTZ při cementaci vrstev cementace, nitridace a kalené vrstvy dokáže ovlivnit měření a zda je možné provést tento typ měření. Proto je důležité zhodnotit strukturu materiálu a jednotlivých vrstev. To bylo provedeno pomocí světelného mikroskopu na metalograficky připravených vzorcích. Metalografickou úpravou se rozumí naleptání materiálu a čímž dojde k rozlišení jednotlivých fází. Leptání bylo v tomto případě provedeno pomocí 1% nitalu (roztok kyseliny dusičné a alkoholu).

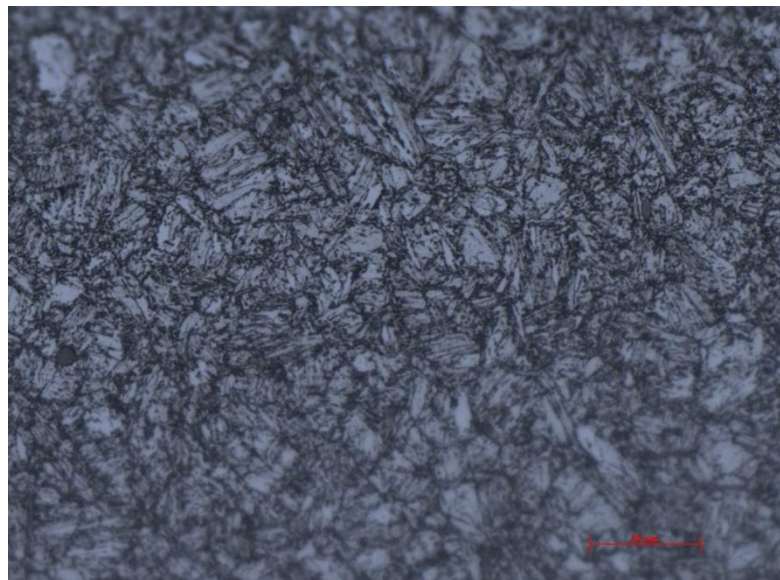
Nejprve byly hodnoceny vzorky cementované - tedy vzorky materiálu 16MnCr5. Tento materiál je běžným materiálem používaným na výrobu strojních součástí, jakou jsou ozubená kola, která se cementují, a tím dosahují vysoké tvrdosti povrchu a dobrých kluzných vlastností.





Obr. 23 Mikrostruktura cementované vrstvy: doba cementace 12hod.

Dalším krokem v rámci měření bylo hodnocení vrstvy nitridované vrstvy materiálu 31CrMoV9. Tento materiál je jedním z nejlépe dostupných nitridačních materiálů. Vyznačuje se vysokou pevností a houževnatostí jádra materiálu. Toho se v praxi hojně využívá. Klady tohoto materiálu spočívají v zachování houževnatosti jádra. Naopak záporom je vysoká pořizovací cena.



Obr. 24 Mikrostruktura nitridované vrstvy s úběrem 10μm

Nitridované vzorky jsou pro následné měření pomocí ultrazvuku upraveny a to tak, že z povrchu je odebrána určitá vrstva pomocí metalografické brusky. A to o velikosti 10, 25, 50

a 70 $\mu$ m. Úběr se prováděl za účelem přípravy vzorků pro měření a porovnání, jakým způsobem ovlivňuje nitridovaná vrstva a její tloušťka průchod NDT metod.

Na obr. 24 je viditelná patrná vrstva s úběrem 10  $\mu$ m, kde jsou patrné nitridy. Viditelné nitridy jen potvrzují fakt, že tepelné zpracování proběhlo správně a materiál dosahuje v praxi hodně využívaných mechanických vlastností.

Další snímky vzorků se nacházejí v příloze této diplomové práce.

### **8.3 Vyhodnocení ultrazvukové kontroly materiálu**

U každého materiálu je důležité zhodnotit parametry, které ovlivňují chování ultrazvuku. Mezi tyto parametry řadíme rychlost, směr a propustnost ultrazvukových vln materiálem. Cílem měření je stanovit, jakým způsobem se chová ultrazvuková vlna v materiálu, pokud u materiálu dojde ke změně mechanických vlastností. K těmto změnám dochází vlivem chemicko-tepelného a tepelného zpracování, kdy se ovlivňují parametry jako např. pružnost materiálu. Tímto měřením bylo zjištěno, které zpracování je možné vyhodnotit pomocí ultrazvuku.

Pro měření parametru materiálu bylo použito konvenčního ultrazvukového defektoskopu OLYMPUS EPOCH 1000i umožňující zjištění rychlosti průchodu ultrazvukové vlny materiálem. Tento defektoskop vyniká možností použití speciálních sond tzv. phased array.

Rychlost ultrazvukových vln může ovlivňovat mnoho faktorů. Příkladem těchto faktorů je struktura materiálu, chemické složení, trhliny v materiálu a mnoho dalších aspektů. V této diplomové práci je z výše uvedených faktorů zkoumán pouze vliv mikrostruktury vrstev vzniklých CHTZ či TZ zpracováním.

Využití v tomto případě nachází sondy pro měření podélných či příčných vln s různými hodnotami frekvencí. V následujících tabulkách 2-7 jsou uvedeny parametry daných vzorků. Těmito parametry jsou velikost vzorku, rychlost ultrazvuku, dále Poissonova konstanta reprezentující poměr relativního prodloužení a jako poslední modul pružnosti materiálu. Jak je patrné z tab. 2,3,4,5, byla zjištěna korelace mezi parametry prokazují vliv struktury na rychlost průchodu ultrazvukové vlny. Naměřené hodnoty vyplývající z tabulek jsou reprezentovány v tabulkách 2,3,4,5,6,7, kde se nachází i typ použité sondy. Jak je patrné, rychlost ultrazvukových vln se mění v závislosti na daném typu tepelného nebo chemicko-tepelného zpracování. Další hodnoty jako Poissonova konstanta a modul pružnosti E jsou hodnoty dopočítávané dle vzorců, které byly uvedeny v kapitole 3.6 této diplomové práce.

Poslední hodnotou, která je uvedena v následujících tabulkách je hodnota tloušťky vzorku. Tato hodnota se používá pro dopočítání hodnot Poissonovy konstanty a modulu pružnosti E, který se dopočítává z hodnot Poissonovy konstanty, tloušťky vzorku a rychlosti ultrazvuku příčných a podélných vln. Tloušťka vzorků byla měřena pomocí mikrometru.

### 8.3.1 Měření rychlostí ultrazvukem

Měření rychlostí ultrazvuku bylo provedeno s pomocí defektoskopu EPOCH 1000i využívající odrazové metody. U tohoto měření se hodnotila rychlost ultrazvuku v materiálu, který byl vhodným způsobem tepelně zpracován. Vyhodnocování se provádí měřením času a vzdálenosti mezi vstupním a kocovým echem.

Pro samotné měření je důležité vyhodnocovat nejen příčné ale i podélné ultrazvukové vlny. Tento fakt je důležitý pro další vyhodnocování a dopočítávání Poissonovy konstanty a modulu pružnosti E uvedených v tab. 2,3,4,5,6,7.

$$E = \rho * c_L^2 * \frac{(1 + \nu) * (1 - 2\nu)}{1 - \nu}$$

V dalších kapitolách budou uvedena jednotlivá měření rychlosti ultrazvukových vln.

#### 8.3.1.1 Naměřené hodnoty rychlosti ultrazvuku u cementovaných vzorků

Tato kapitola se bude věnovat měřením hodnotám rychlosti ultrazvuku u cementovaných vzorků. Na toto měření se soustředí tabulky 2 a 3, které jsou uvedené v závěru této kapitoly.

Z tabulek 2 a 3 vyplývá, že u naměřených hodnot u cementovaných vzorků je vidět patrný pokles rychlosti v závislosti na době cementace. Důležité je vždy zohlednit obě tabulky, kdy tabulka 2 zobrazuje hodnoty naměřené a vypočtené hodnoty při použití podélné sondy 10 MHz. Tabulka 3 pak zobrazuje hodnoty při měření za použití sondy příčné s frekvencí 5 MHz.

Z obou tabulek je pak zřejmé, že rychlost ultrazvuku je tedy ovlivněna cementovanou vrstvou. Rozdíl rychlosti je dle měření nejvýraznější u materiálu, který byl cementován 3 a 6 hodin. Doba cementace 12 hod. nemá významný vliv na rychlost ultrazvuku.

Podélná sonda 10 MHz	Tloušťka vzorku (mm)	Rychlost ultrazvuku (m*s <sup>-1</sup> )	Poissonova konstanta (-)	Modul pružnosti E (GPa)
Cementace 3h	12,003	6000	0,28	282,6
Cementace 6h	10,635	5900	0,33	327,03
Cementace 12h	10,375	5945,55	0,36	378,06

Tab. 2 Naměřené a vypočtené hodnoty ultrazvuku u cementovaných vzorků

Příčná sonda 5 MHz	Tloušťka vzorku (mm)	Rychlost ultrazvuku ( $m*s^{-1}$ )	Poissonova konstanta (-)	Modul pružnosti E (GPa)
Cementace 3h	12,003	3269,75	0,28	282,60
Cementace 6h	10,635	3232,00	0,33	327,03
Cementace 12h	10,375	3192,3	0,36	378,06

Tab. 3 Naměřené a vypočtené hodnoty ultrazvuku u cementovaných vzorků pro případ příčné vlny

### 8.3.1.2 Naměřené hodnoty rychlosti ultrazvuku u kalených vzorků

Další kapitola se zabývá hodnotami, naměřenými u kalených vzorků. Pro tyto hodnoty jsou důležité tabulky 4 a 5.

Hodnoty, které byly naměřeny u vzorků kalených, ukazují výrazný pokles rychlosti u materiálu kaleného a měřeného pomocí podélných vln. Naopak u měření příčných vln se rychlost mění a vlny ultrazvuku jsou rychlejší v materiálu kaleném. Stejně jako u předchozí kapitoly je i zde nutné brát v potaz obě tabulky, kdy tab.4 je měřena podélnou sondou a tab.5 příčnou sondou.

V případě tabulky 4 a 5 se prokázal výrazný vliv kalící folie na vzorek a to tak, že materiál nebyl prokalený v takové míře, aby znatelně ovlivňoval ultrazvukové vlny. Tím bylo prokázáno, že folie splnila svůj účel zamýšleným způsobem.

Podélná sonda 10 MHz	Tloušťka vzorku (mm)	Rychlost ultrazvuku ( $m*s^{-1}$ )	Poissonova konstanta (-)	Modul pružnosti E (GPa)
Kalené	10,876	6370,08	0,2	263,3
Kalené folie	11,498	6454,59	0,28	318,53

Tab. 4 Naměřené a vypočtené hodnoty ultrazvuku u kalených vzorků

Příčná sonda 5 MHz	Tloušťka vzorku (mm)	Rychlost ultrazvuku ( $m*s^{-1}$ )	Poissonova konstanta (-)	Modul pružnosti E (GPa)
Kalené	10,876	3543,24	0,2	263,3
Kalené folie	11,498	3236,9	0,28	318,53

Tab. 5 Naměřené a vypočtené hodnoty ultrazvuku u kalených vzorků

### 8.3.1.3 Naměřené hodnoty rychlosti ultrazvuku u nitrídaných vzorků

Posledním typem materiálu, který byl použit pro účely tohoto testování, je materiál nitrídaný. K tomuto měření se vztahuje tabulka 6 a 7, kde je uvedena rychlost ultrazvuku ovlivněná tloušťkou vrstvy. V tomto případě se ultrazvukové vlny pohybují rychleji v závislosti na tom, čím menší byla tloušťka nitrídané vrstvy. V tomto případě bylo měření nejprůkaznějších ze všech tří případů uvedených v kapitole 8.3 této práce.



Podélná sonda 10 MHz	Tloušťka vzorku (mm)	Rychlost ultrazvuku ( $m*s^{-1}$ )	Poissonova konstanta (-)	Modul pružnosti E (GPa)
Nitridace -10 $\mu$ m	10,1	5903	0,33	327,03
Nitridace -25 $\mu$ m	10,1	6000	0,28	282,60
Nitridace -50 $\mu$ m	10,1	6370	0,20	263,30
Nitridace -70 $\mu$ m	10,1	6453	0,19	318,53

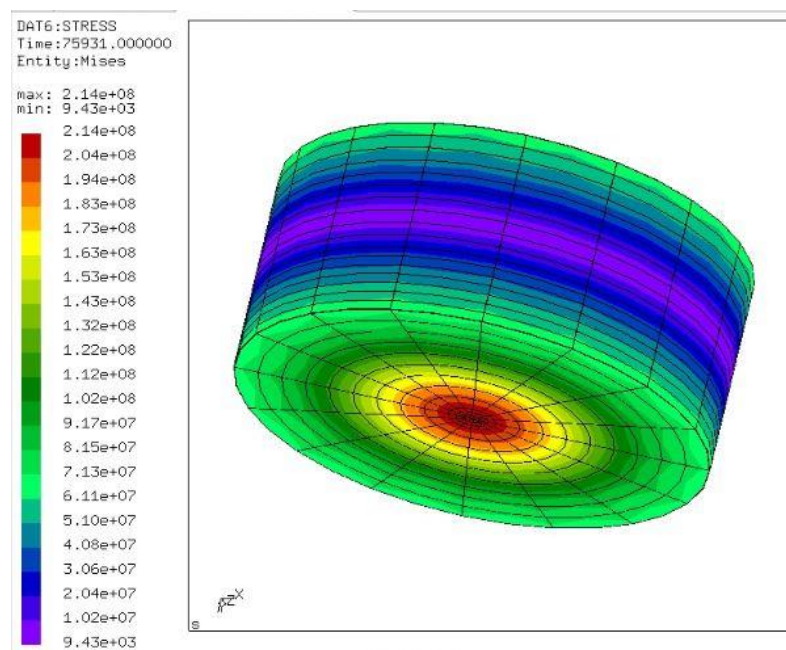
Tab. 6 Naměřené a vypočtené hodnoty ultrazvuku u nitridovaných vzorků

Podélná sonda 10 MHz	Tloušťka vzorku (mm)	Rychlost ultrazvuku ( $m*s^{-1}$ )	Poissonova konstanta (-)	Modul pružnosti E (GPa)
Nitridace -10 $\mu$ m	10,1	3232	0,33	327,03
Nitridace -25 $\mu$ m	10,1	3269	0,28	282,6
Nitridace -50 $\mu$ m	10,1	3543	0,2	263,3
Nitridace -70 $\mu$ m	10,1	3236	0,28	318,53

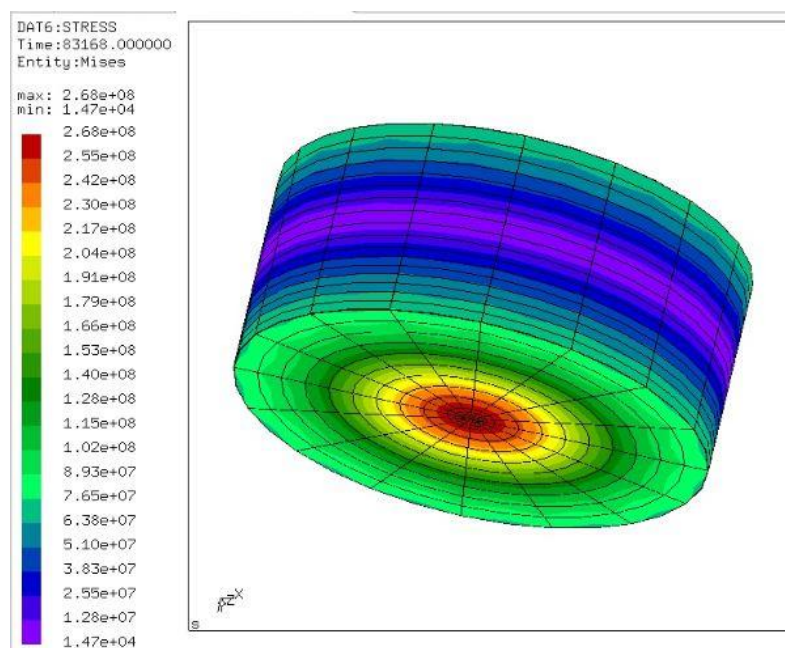
Tab. 7 Naměřené a vypočtené hodnoty rychlosti ultrazvuku u nitridovaných vzorků.

### 8.3.2 Simulace průběhu napětí v materiálu vlivem ultrazvukových vln

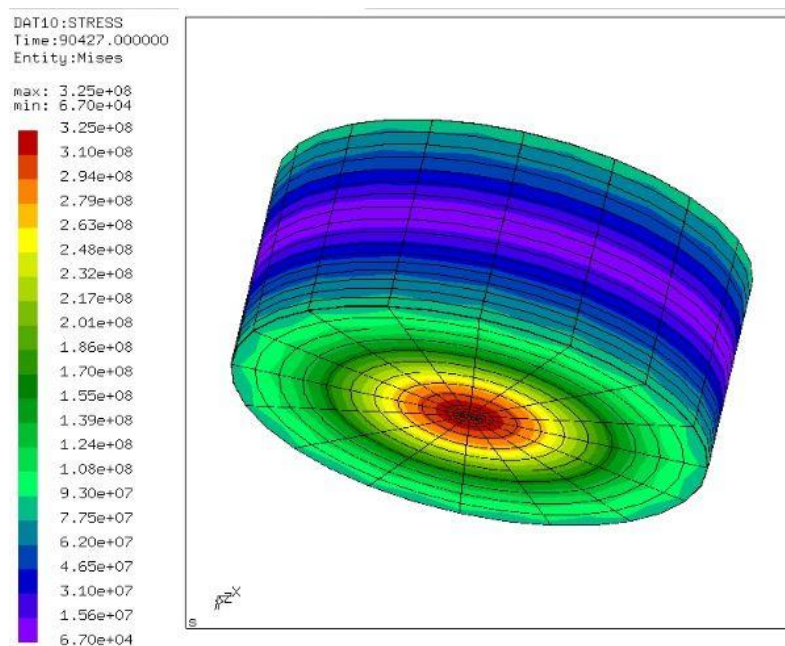
Ověření chování ultrazvuku ve vzorku, respektive popis ultrazvukového pole, lze simulovat pomocí softwaru Sonoanalyzér, který umožňuje simulaci kmitání částic ultrazvuku v materiálu. Dále tento software dopočítává hodnoty rychlosti ultrazvuku ze základních fyzikálních hodnot materiálu. Z tohoto softwaru byly získány hodnoty o umístění kmitny ultrazvuku a o parametrech napětí, které vznikly uvnitř materiálu vlivem ultrazvuku. V levé části obr. 25 je zaznamenáno napětí, které bylo vyvozeno ultrazvukem uvnitř materiálu. Obr. 25 popisuje simulaci průběhu napětí v materiálu cementovaném po dobu 3 hodin vlivem ultrazvuku. Obrázky 26 a 27 popisují stejnou situaci, pouze v rozdílu času cementace.



Obr. 25 Simulace cementovaného vzorku po dobu 3h v softwaru Sonoanalyzér



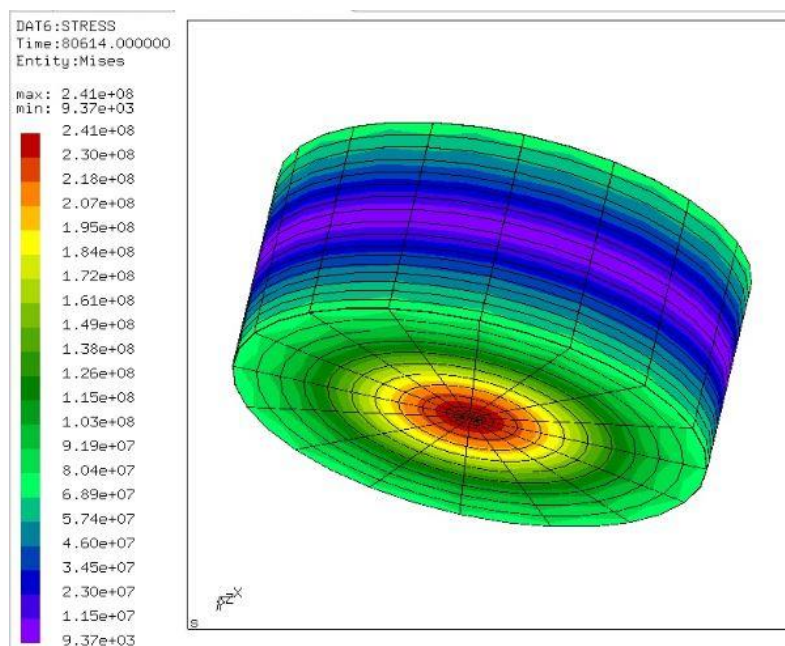
Obr. 26 Simulace cementovaného vzorku po dobu 6h v softwaru Sonoanalyzer



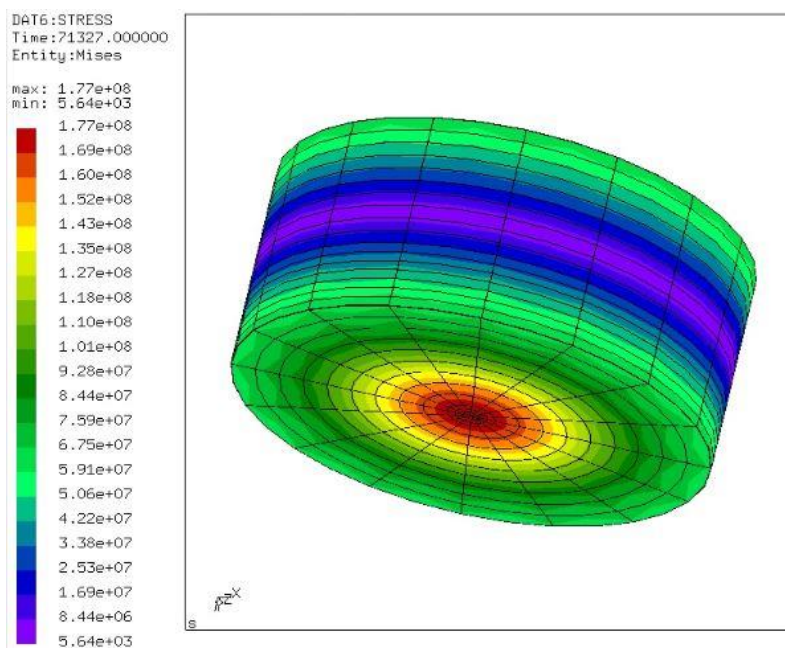
Obr. 27 Simulace cementovaného vzorku po dobu 12h v softwaru Sonoanalyzer

Z hodnot uvedených v obr. 25, 26 a 27 je patrné, jak vliv doby cementace ovlivňuje hodnotu napětí a posunutí kmitny. U vzorků cementovaných 12 h napětí dosahuje hodnoty 3,25 MPa, což je o třetinu vyšší než u vzorků cementovaných po dobu 3h. Z těchto hodnot je patrné, že hloubka cementované vrstvy ovlivňuje průchod a chování ultrazvuku v materiálu.

Další simulace je provedena u vzorků kalených, kde hodnota napětí dosahuje rozdílu také o třetinu větší jako u předchozí simulace. Zajímavé jsou i výsledky v případě, kdy byl kalen vzorek v ochranné folii. Hodnota napětí pak dosahuje 1,77 MPa, kdežto v případě, kdy byl vzorek kalen napřímo v oleji, tak je hodnota 2,41 MPa. Tyto hodnoty dokazují simulace na obrázcích 28 a 29. Tím jde jednoznačně říci, že kalený materiál byl více deformován průchodem ultrazvuku než materiál kalený ve folii.



Obr. 28 Simulace kaleného vzorku v softwaru Sonoanalyzér



Obr. 29 Simulace kaleného vzorku ve folii v softwaru Sonoanalyzér

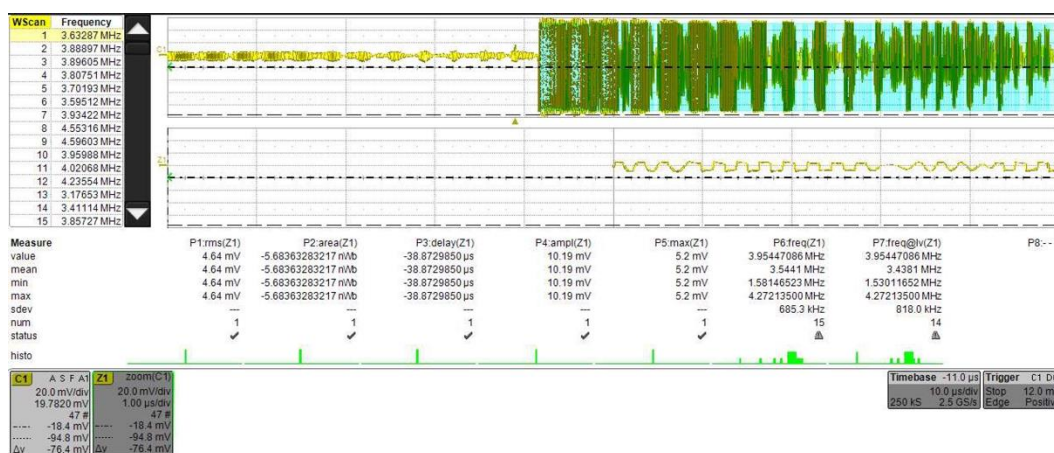
V této kapitole nebyly zhodnoceny vzorky nitrídané. V případě nitrídaných vzorků nelze provádět simulaci v softwaru Sonoanalyzér. To je způsobeno neumožněním nastavení hloubky nitrídané vrstvy v programu.

### 8.3.3 Porovnání materiálových charakteristik pomocí přesné analýzy ultrazvukového vlnění

Další částí měření pomocí ultrazvukové metody bylo porovnání materiálových charakteristik získaných pomocí osciloskopu, který umožňuje přesnou analýzu ultrazvukových vln materiálem. Jedná se o parametry jako frekvence, perioda obnovy vlny, zpoždění vlny, plocha pod křivkou a RMS (Root Mean Square). K tomuto měření bylo využito osciloskopu HDO 4022, který svými technickými parametry umožňuje analyzovat přesný průběh ultrazvukové vlny v celém jejím spektru, což je bezpochyby velkou výhodou, protože umožňuje sledovat průběh v celém rozsahu.

Měření probíhalo vytvářením ultrazvukové vlny pomocí přístroje Olympus Epoch 1000 napojeného na sondu o hodnotě 4MHz a tyto hodnoty následně zaznamenává osciloskop pomocí stejné sondy napojené opačným způsobem tedy jako přijímač signálu. Předpokladem je, že úpravou vrstvy CHTZ dojde k zásadnímu ovlivnění ultrazvukové vlny. Měření probíhalo na vzorcích připravených různými metodami CHTZ popsaných v kapitole 8.1. Měření je znázorněno na obr. 30, kde jsou i patrné rozdíly jednotlivých parametrů.

Cílem tohoto měření bylo prokázat vliv chemickotepelného zpracování na průchod ultrazvuku materiálem. Získané parametry jsou znázorněny na následujících tabulkách 8, 9, 10 a grafech 2, 3, 4. Pokus prokázal výrazný vliv chemickotepelného zpracování na ultrazvukové vlnění.



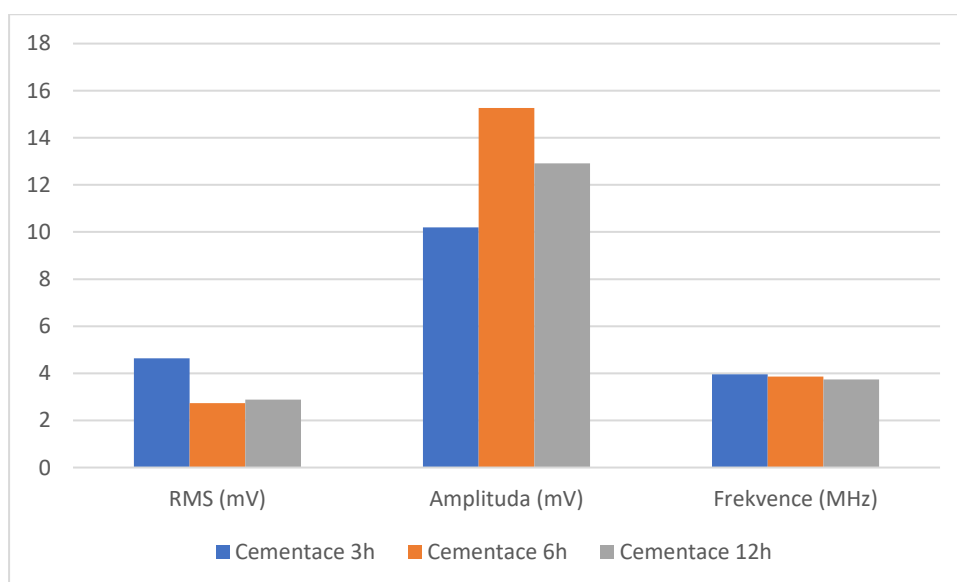
Obr. 30 Ukázka analýzy signálu 4 MHz ultrazvukové vlny pro případ cementovaného vzorku, doba cementace 4 hod.

Cementované vzorky	RMS (mV)	Zpoždění ( $\mu$ s)	Amplituda (mV)	Frekvence (MHz)	Maximum (mV)
Cementace 3h	4,64	-38,8729	10,19	3,9544	5,2
Cementace 6h	2,74	-38,9519	15,27	3,8591	7,4
Cementace 12h	2,88	-38,9012	12,92	3,743	5,4

Tab. 8 Vyhodnocení materiálových charakteristik u cementované vrstvy pomocí osciloskopu

Na obr. 30 je znázorněno měření pomocí osciloskopu a vyhodnocování měření. Celé měření cementovaných vzorků je znázorněno v tabulce 8. Při tomto měření se vyhodnocují parametry RMS, zpoždění, amplituda a frekvence. Tímto měřením se prokázalo, které parametry ultrazvukové vlny jsou nejvýrazněji ovlivňovány změnou chemickotepelného a tepelného zpracování.

Rozdíl mezi měřením vzorku cementovaného 3 h a 6 h je značný a je patrný už na jednotlivých křivkách samotného měření, což je vidět v tab. 7. Hlavní rozdíl je pozorovatelný u parametru průměru napěťových hodnot tedy RMS. Další parametry se od sebe odlišují také. Tyto parametry nejsou tak rozdílné, avšak dochází k jisté korelaci. Všechny nejdůležitější parametry a jejich rozdíly jsou patrné v grafu 2, kdy můžeme pozorovat, že hodnoty RMS jsou u vzorku cementovaného po dobu 3 hodin téměř dvojnásobně vyšší než u vzorků cementovaných po dobu 6 a 12 hodin. Dále se snižuje s nárůstem doby cementace i frekvence ultrazvuku.



Graf 2 Hodnocení materiálových charakteristik cementované vrstvy

Dá se říci, že největší vliv má na rychlost ultrazvuku u cementovaných vzorků vrstva získaná cementováním po dobu 3h a 6h. Dále lze potvrdit, že hodnoty uvedené v grafu 2, ukazují, že RMS jsou u vzorku cementovaného 3 hodiny téměř dvojnásobné oproti vzorku cementovanému 6 hodin. U vzorku cementovaného 12 hodin je tato hodnota téměř shodná s hodnotou u vzorku cementovaného 6 hodin.

Další technologií zvolenou pro tento typ hodnocení je nitridace. Vzorky nitridované byly připravovány ubíráním nitridované vrstvy o přesně definovanou hodnotu.

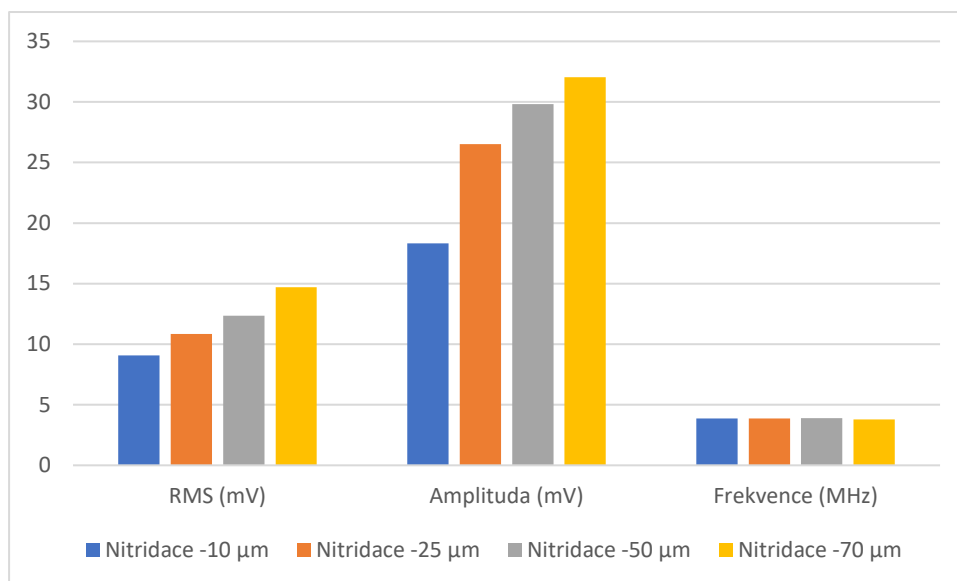
Měření nitridované vrstvy proběhlo stejnou metodou jako u cementovaných vrstev. Byl použit přístroj OLYMPUS, který slouží jako zdroj ultrazvukového signálu a tento signál se zachytává pomocí osciloskopu, kde se vyhodnocují parametry stejné jako u cementovaných vrstev.

Patrný rozdíl se pak také nachází u hodnot RMS, který narostl s menší nitridovanou vrstvou. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tab. 9.

Nitridované vzorky	RMS (mV)	Zpoždění ( $\mu$ s)	Amplituda (mV)	Frekvence (MHz)	Maximum (mV)
Nitridace -10 $\mu$ m	9,08	-38,8764	18,33	3,8734	15,2
Nitridace -25 $\mu$ m	10,84	-38,9591	26,51	3,877	17,1
Nitridace -50 $\mu$ m	12,34	-38,9146	29,81	3,8834	14,4
Nitridace -70 $\mu$ m	14,69	-38,8936	32,05	3,7833	19,2

Tab. 9 Vyhodnocení materiálových charakteristik u nitridované vrstvy pomocí osciloskopu

Měření nitridované vrstvy je nejlépe pozorovatelné v grafu 3. V tomto případě jsou hodnoty prokazatelné. V grafu 3, kde jsou znázorněny hodnoty RMS, amplitudy a frekvence. Hodnoty RMS narůstají narůstající tloušťkou nitridované vrstvy a narůstá i hodnota amplitudy. U žádného vzorku nebyla zjištěna změna frekvence. Z toho vyplývá, že tloušťka nitridace nemá vliv na frekvenční posun ultrazvukové vlny.

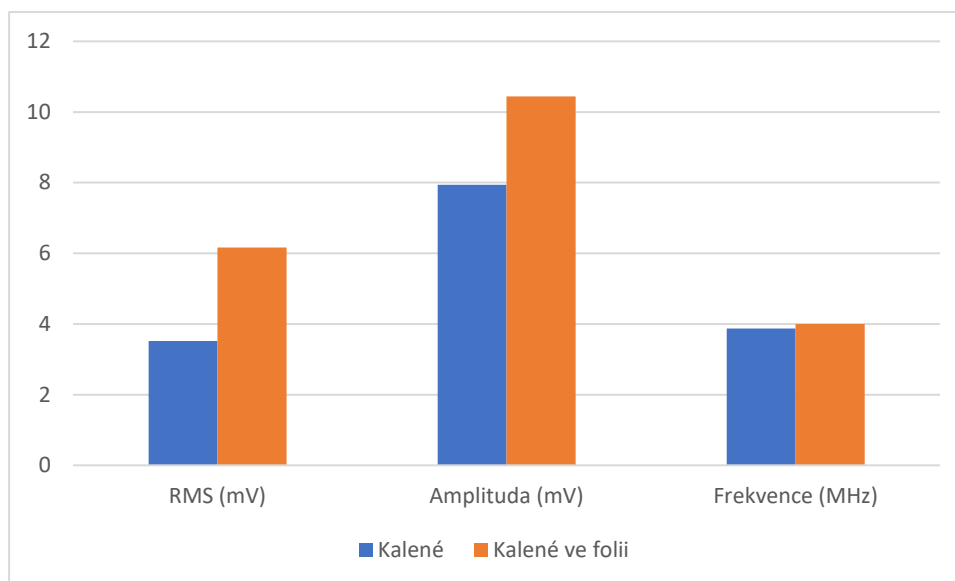


Graf 3 Hodnocení vlnových charakteristik nitridované vrstvy

Další úpravou vzorků, která se měřila touto metodou, byly vzorky kalené. V tomto případě je metoda průkazná. Parametry jednoznačně ukazují, že rozdíl v ultrazvukové vlně je patrný viz tab. 10. Dokonce je patrný výrazný pokles frekvence. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v grafu 4. Při tomto měření byl zjištěn výrazný nárůst hodnoty RMS u materiálu kaleného v kalící folii. Toto měření by se dalo použít v běžné praxi pro určení správného tepelného zpracování.

Kalené vzorky	RMS (mV)	Zpoždění (μs)	Amplituda (mV)	Frekvence (MHz)	Maximum (mV)
Kalené	3,52	-38,9325	7,94	3,8683	6,5
Kalené ve folii	6,16	-38,9584	10,44	4,0002	8,6

Tab. 10 Vyhodnocení materiálových charakteristik u nitridované vrstvy vzorků pomocí ultrazvuku



Graf 4 Vyhodnocení materiálových charakteristik u nitrídané vrstvy vzorků pomocí ultrazvuku

#### 8.4 Měření pomocí metody vířivých proudů

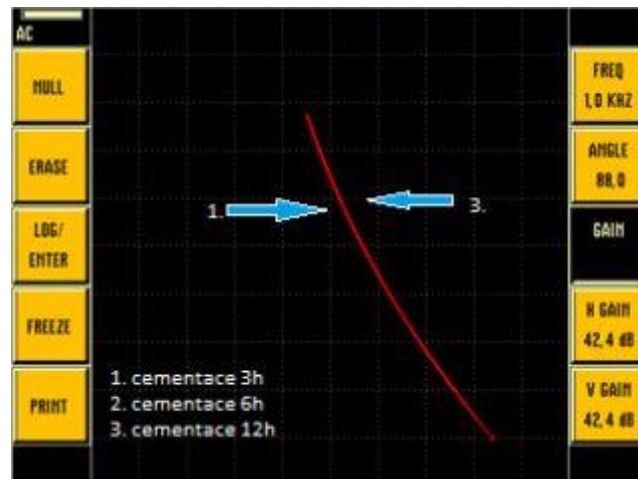
Metoda měření pomocí vířivých proudů je založena na principu elektromagnetické indukce, která se indukuje v okolí cívky. Vířivé proudy vznikají průchodem elektrického proudu vodičem. Výhoda této metody je značná. Tato výhoda spočívá v přesné detekce povrchových a podpovrchových vad. Zejména v oblasti nedestruktivního zkoušení a hledání vad na povrchu a těsně pod povrchem materiálu, kde je zapotřebí kontrolovat kvalitu povrchu materiálu. Mezi nevýhody metody patří omezenost pouze na vodivé materiály. Dále musí sonda mít dostatečný přístup k materiálu, aby byl zaručen dostatečný kontakt s povrchem materiálu, jinak nedojde ke správné detekci vad.

Metoda vířivých proudů je závislá na správném zvolení sondy pro danou aplikaci. Sonden se vyrábějí ve velké škále tvarů a rozměrů. Tyto sondy se dají používat na kontrolu složitých součástí, a dokonce i trubek. Sonden se volí podle předpokladů (např. tvaru výrobků, typu materiálu apod.).

Pro naši kontrolu byl použit přístroj OLYMPUS Nortec 500D. Pro měření bylo důležité správně zvolit sondu a najít parametry frekvence a zesílení pro konkrétní případ, jinak by mohlo dojít ke skreslení výsledků. Vzhledem k tomu, že frekvence nám udává hloubku vnikání vířivých proudů do materiálu, bylo důležité zvolit ji tak, aby pokryla celý rozsah chemicko-tepelného zpracování. Rozsah pracovní frekvence je dán použitou sondou. V případě tohoto měření byl použit rozsah 1KHz-50KHz, 100 Hz-2KHz a 300 Hz-10KHz. Měření je znázorněno na následujících obr. 31, 32, které znázorňují měření cementovaných vzorků.

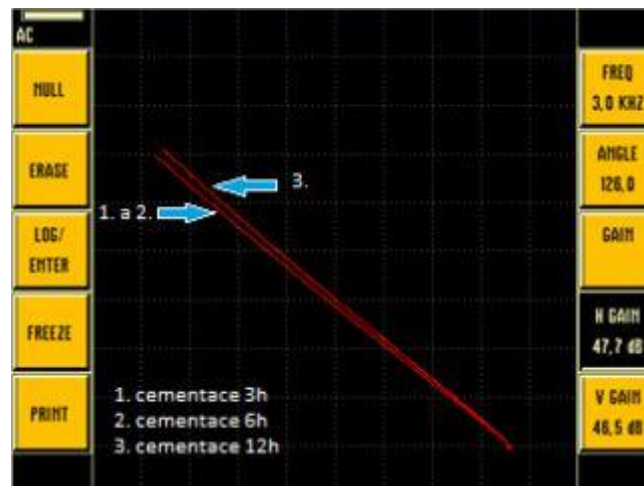


V případě měření cementovaných vzorků pomocí sondy 100 Hz až 2kHz není měření průkazné (viz obr. 31), protože nelze od sebe rozlišit cementované vzorky. Křivky, které znázorňují vířivé proudy se slévají do jedné. Nelze tedy správně vyhodnotit, o jakou křivku se jedná. V tomto případě nelze říci, zda byl materiál správně tepelně zpracovaný.



Obr. 31 Trajektorie pracovních bodů pro případ cementových vzorků

Na obrázku 32 je měření průkaznější. Je patrný drobný rozptyl křivek. V obou případech (viz obr. 31, 32) dochází k zakrývání křivek u vzorků cementovaných 3 a 6 hodin. U delší doby cementace je patrný posun křivky. Toto může být pozorováno na obr. 32, kde je tento posun znázorněn pozicí 3.

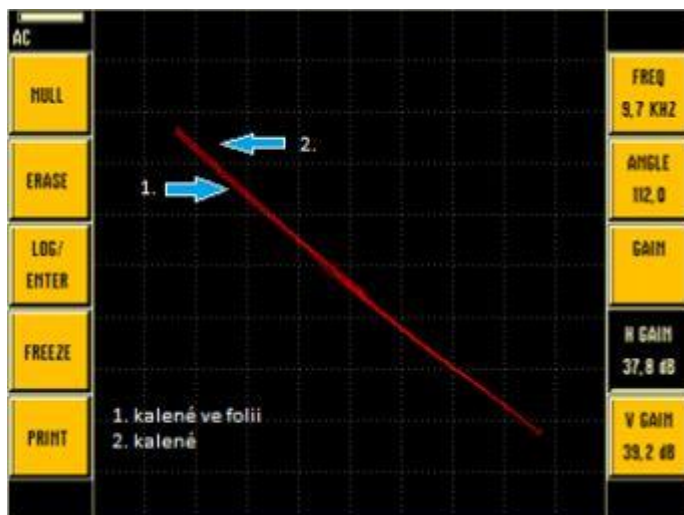


Obr. 32 Trajektorie pracovních bodů pro případ cementovaných vzorků 300 Hz-10kHz

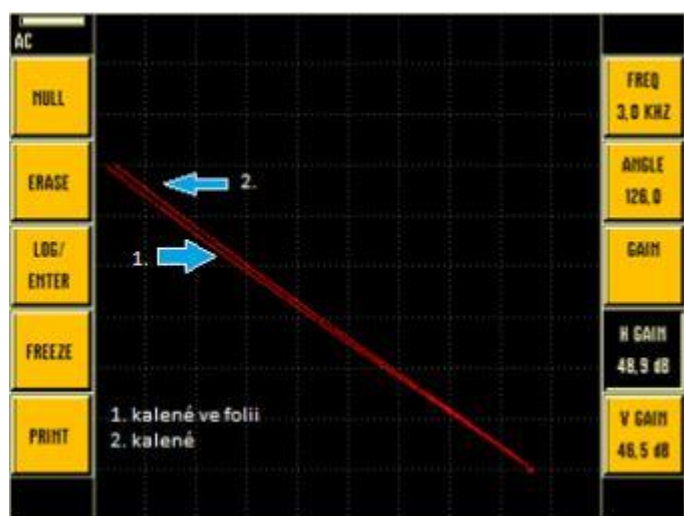
Pokud byl použit rozsah 300 Hz – 10 KHz je velký rozdíl mezi křivkami znázorňující cementaci 3 a 12 hodin. Opět v tomto případě došlo ke zakrývání křivek cementovaných 3 a 6

hodin. Jako nejvhodnější pro hodnocení se tedy jeví použití rozsahu 300 Hz – 10 kHz, kdy je nejvyšší rozdíl mezi křivkami.

Dále se touto metodou měřily vzorky kalené. U těchto vzorků byly použity stejné cívky a stejný rozsah frekvencí jako u vzorků cementovaných.



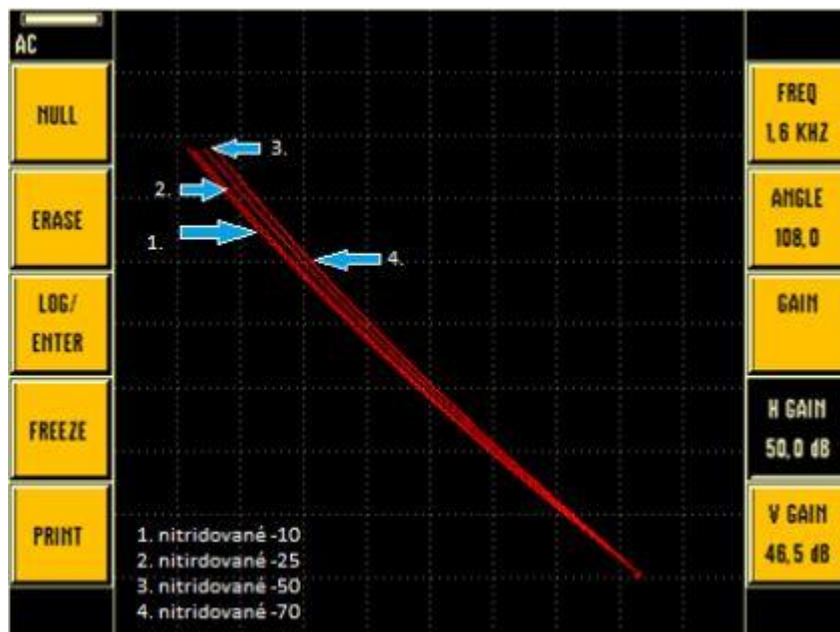
Obr. 33 Trajektorie pracovních bodů pro případ kalených vzorků 1KHz-50KHz



Obr. 34 Trajektorie pracovních bodů pro případ kalených vzorků 300 Hz-10KHz

Při měření kalených vzorků (viz obr. 33, 34) došlo ke zjištění, že hodnocení tohoto zpracování je možno provádět všemi testovanými rozsahy frekvencí. Ve všech použitých rozsazích je patrný rozdíl v pohybu pracovního bodu, což dokazuje rozdílnost tepelného zpracování.

Dále se provádělo měření na nitrídaných vzorcích. Toto měření ukázalo, že pro hodnocení nitrídaných vzorků je vhodné měření pomocí metody vířivých proudů. Zde je totiž patrný jednoznačný posun křivek a tím je snadnější vyhodnocení CHTZ.



Obr. 35 Trajektorie pracovních bodů pro případ nitridovaných vzorků

Křivky u obr. 35 se posouvají postupně. Zespona je naměřena křivka vzorku ubraného o 10 mikrometru a postupně nahoru, kde se nachází křivka vzorku ubraného 70 mikronů.

### 8.5 Měření materiálových charakteristik pomocí metody akustické emise

Jako poslední metoda, která byla použita pro měření kvality a velikosti chemicko-tepelného zpracování, je akustické emise. Tato metoda, jak již bylo popsáno v teoretické části, využívá hodnocení akustických signálů, které se zachycují pomocí zesilovačů a následně se vyhodnocují.

V našem případě bylo využito akustického signálu vyvolaného vtlačováním indentoru metody HRC do povrchu analyzovaného vzorku. Tento signál se zachycoval pomocí osciloskopu stejným způsobem jako u měření ultrazvuku, s tím že přijímací sonda byla umístěna z boku daného materiálu. Dalším způsobem bylo vyvolání akustické emise pomocí tvrdoměru, který je založen na odrazové metodě. Tvrdoměr, který se použil jako zdroj akustického signálu, byl Hardness tester KT-C umožňující měřit v několika metodách. Princip tohoto testu je založen na použití ocelové kuličky, která je definovanou silou vyslána proti materiálu.

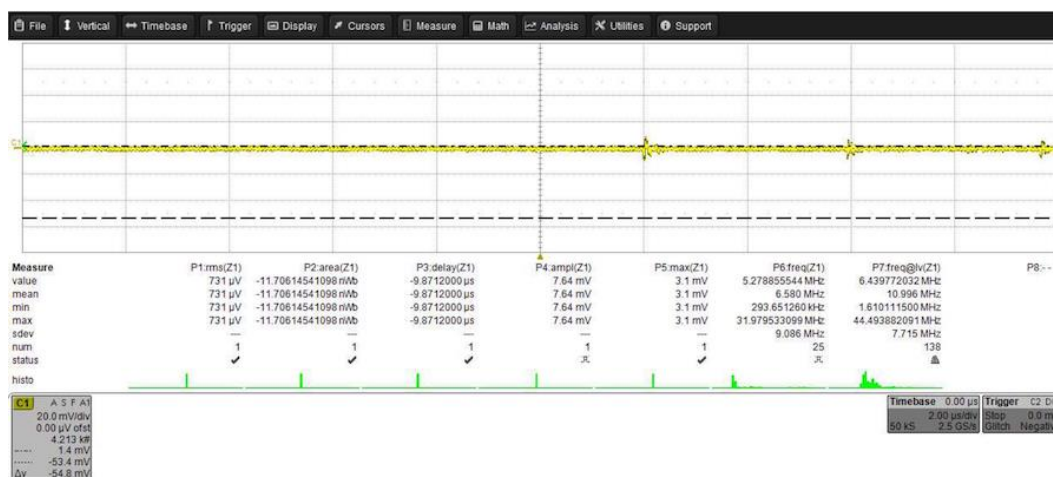
Rozdílem měření akustické emise oproti měření pomocí ultrazvuku bylo v použití sond. Sondy používané pro hodnocení akustické emise se vyznačují tím, že se jedná o širokopásmové sondy. Samotné měření proběhlo tak, že sonda byla v kontaktu se zkoušeným materiálem a na jeho povrch dopadá definovanou rychlostí inventar umístěna – viz obr. 36. Jedná se o metodu HLD.

Na obr. 36 je znázorněna konfigurace měření charakteristik pomocí metody akustické emise.



Obr. 36 Konfigurace měření ultrazvukových vlastností vzorků metodou akustické emise

Při vyhodnocování materiálových charakteristik se vyhodnocovaly stejné parametry jako u ultrazvuku, tj. frekvence, perioda obnovy vlny, zpoždění vlny, plocha pod křivkou.



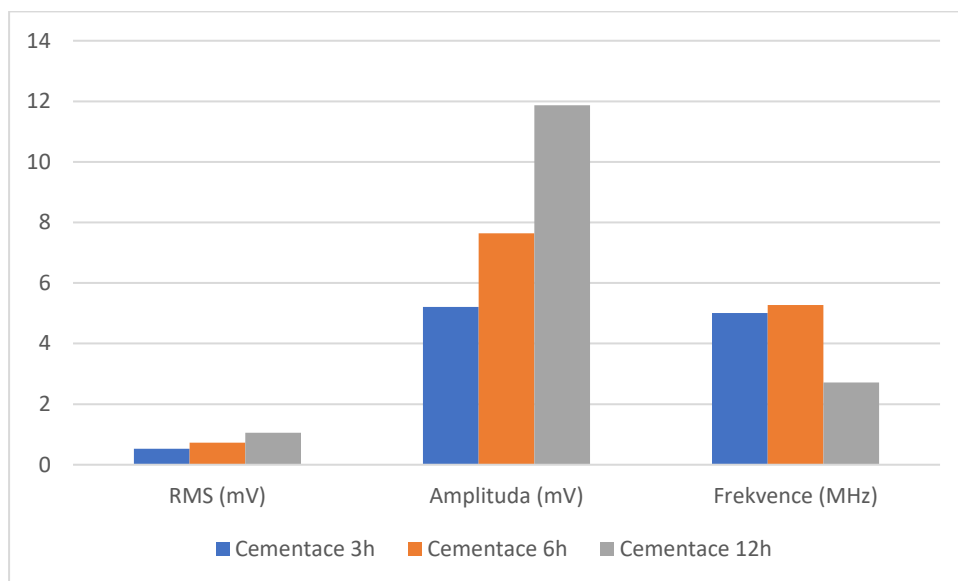
Obr. 37 ukázka analýzy signálu akustické emise pomocí osciloskopického měření

Měření prokázalo, že chemicko-tepelné zpracování významně ovlivňuje rychlost šíření akustického signálu v podobě širokopásmové ultrazvukové vlny materiálem. Toto je možné vidět na obr.37. Rychlost šíření je značně ovlivněna chemickotepelným zpracováním. To vyplývá z naměřených hodnot RMS a zpoždění. Vše je zaznamenáno v tabulkách 11, 12, 13. V tab. 11, 12, 13 jsou zaznamenány naměřené hodnoty parametrů materiálových charakteristik.

Nejvýznamnějšími parametry jsou ty naměřené u cementované vrstvy v porovnání s ostatními chemickotepelně zpracovanými vzorky.

Cementované vzorky	RMS ( $\mu\text{V}$ )	Zpoždění ( $\mu\text{s}$ )	Amplituda (mV)	Frekvence (MHz)	Maximum (mV)
Cementace 3h	527	-9,81	5,21	5,01	3
Cementace 6h	731	-9,87	7,64	5,27	3,1
Cementace 12h	1,51 (mV)	-9,95	11,87	2,712	6

Tab. 11 Vyhodnocení materiálových charakteristik u cementované vrstvy vzorků pomocí akustické emise



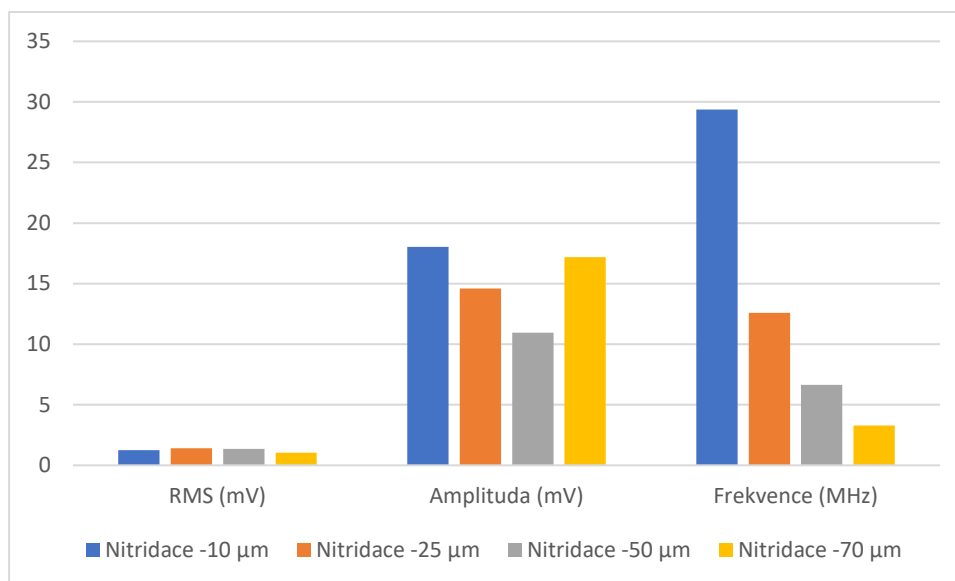
Graf 5 Hodnocení materiálových charakteristik pomocí AE u cementovaných vzorků metoda HL

U cementovaných vzorků je významná hodnota RMS, kde hodnota napětí vzrůstá s dobou cementace. Dále je znatelný pokles frekvence a dochází k nárůstu amplitudy. Z toho vyplývá, že chemickotepelné zpracování do značné míry ovlivňuje průchod širokopásmové vlny ultrazvuku materiálem.

V porovnání s nitridovanými vzorky je výrazný pokles frekvence s velikostí úběru vrstvy, přičemž hodnota RMS kolísá. V tomto případě se nedá jednoznačně určit vhodnost této metody pro aplikace kontroly nitridovaných vrstev viz tab. 12 a graf 6.

Nitridované vzorky	RMS (mV)	Zpoždění ( $\mu\text{s}$ )	Amplituda (mV)	Frekvence (MHz)	Maximum (mV)
Nitridace -10 $\mu\text{m}$	1,25	-9,95	18,04	29,38	8,5
Nitridace -25 $\mu\text{m}$	1,41	-9,98	14,59	12,59	8,2
Nitridace -50 $\mu\text{m}$	1,37	-9,96	10,96	6,63	5,5
Nitridace -70 $\mu\text{m}$	1,04	-9,98	17,19	3,28	8,1

Tab. 12 Vyhodnocení materiálových charakteristik u nitridované vrstvy vzorků pomocí akustické emise



Graf 6 Hodnocení akustická emise nitridovaná vrstva vrstva

Kalené vzorky	RMS (mV)	Zpoždění (μs)	Amplituda (mV)	Frekvence (MHz)	Maximum (mV)
Kalené	942	-9,98	7,46	14,66	3,6
Kalené ve folii	906	-9,98	7,32	6,94	3,1

Tab. 13 Vyhodnocení materiálových charakteristik u kalených vzorků pomocí akustické emise

Kalené vzorky vykazují značné rozdíly v hodnotách frekvence i RMS přičemž hodnota amplitudy zůstává stejná.

Tuto metodu lze zhodnotit jako použitelnou pro aplikaci hodnocení cementovaných vrstev. Co se týká vrstev nitridovaných je patrné, že pro tyto aplikace není vhodná. Dále tato metoda je náročná na zhotovení akustického signálu. Je totiž velmi složité správně nakonfigurovat osciloskop pro zachycení akustického signálu z důvodu pouze krátkodobého zobrazení jednotlivých signálů na osciloskopu. Pro celý postup je tedy vhodnější, aby se zúčastnilo více osob a mohli si při tomto kroku být nápomocni se zaznamenání signálu.

## 9 Diskuse výsledků

Měření provedená v této diplomové práci, měla za cíl určit a posoudit vhodnost klasických technik NDT pro ověřování správnosti provedení CHTZ a TZ. Jelikož se jedná o zcela inovativní přístup a jelikož v současné době není stanoven přesný postup pro vyhodnocování chemicko-tepelného zpracování pomocí NDT metod, z tohoto důvodu bylo nutné definovat vhodné parametry, které jsou jednoznačně ovlivnitelné metalografickou strukturou vzniklou během CHTZ a TZ.

Pro experimentální program byly vytvořeny sady vzorků s různě provedenou kvalitou CHTZ. Byly provedeny různé režimy nitridace a cementace, které vytvořily vzorky s různou velikostí tloušťek vrstev. Experimentální program byl také stanoven pro proces objemového kalení.

Pro ověřování kvality provedení CHTZ a TZ byly vybrány a ověřeny metody založené na ultrazvukových principech a dále metoda vířivých proudů.

U ultrazvukové techniky byly provedeny měření průchodovou a odrazovou metodou. U průchodové metody byl vlnový signál podroben hlubší analýze oscilografického záznamu. Generování ultrazvukové a zvukové vlny probíhalo jak piezoelektrickou sondou, tak i pomocí akustické emise uvolňované při plastické deformaci tělesa měřeného materiálu vtiskem či dopadem indentoru.

U oscilografického vyhodnocování probíhala charakterizace vln pomocí vhodných parametrů jako jsou RMS (Root Mean Square), zpoždění, amplituda, a frekvence signálu. Bylo zjištěno, že tloušťka a charakter vrstvy vzniklé chemicko tepelným zpracováním jakož i metalografická změna struktury materiálu silně ovlivňuje tyto vlnové veličiny.

Z hlediska ověřování a reprodukovatelnosti výsledků byla shledána ultrazvuková metoda jako nejprůkaznější pro kontrolu správnosti provedení CHTZ a TZ.

Kontrola pomocí akustické emise byla méně průkazná a vzhledem k tomu jí nelze doporučit jako kontrolní NDT metodu. Metoda akustické emise, je vzhledem ke složitému postupu nastavení z praktických důvodů nevhodná a je omezena pouze pro laboratorní účely.

Metoda vířivých proudů prokázala, že je také vhodná pro aplikaci kontroly CHTZ a TZ. Omezení této metody spočívá v tom, že oblast rozsahu měření zahrnuje pouze podpovrchové a povrchové oblasti materiálu, kdežto u ultrazvukového principu se jedná o kompletní kontrolu celého objemu.





## 11 Seznam použitých pramenů a literatury

### Literatura:

- [1] *Eddy Current Testing at Level 2* [online]. 2011, **2011**(48) [cit. 2019-12-08]. ISSN 1018-5518. Dostupné z: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-48\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-48_web.pdf)
- [2] Nedestruktivní defektoskopie v průmyslu. [online].2009 [cit. 28-11-2019]. Dostupné z: [http://www.ndt.cz/prilohy/33/principy\\_EC.pdf](http://www.ndt.cz/prilohy/33/principy_EC.pdf)
- [3] KOTRBA, Matěj. *Zjišťování a ověřování deformačních procesů u tvářených ocelí vybranými NDT metodami* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/20313/1/Bakalarska%20prace\\_Kotrba.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/20313/1/Bakalarska%20prace_Kotrba.pdf). Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [4] Diagnostika metodou akustické emise. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2002, **2002**(020640), 28-30 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/diagnostika-metodou-akusticke-emise.html>
- [5] SOLNÁŘ, Josef. Metoda akustické emise. *PTS-Josef Solnář* [online]. 2010, **2010**, 1-2 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <https://www.ptsndt.com/cs/prodej/at-zkouseni-akustickou-emisi>
- [6] VÍTOVEC, Vilém. *Hodnocení kvality ozubených kol vhodnými metodami NDT* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/27353>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [7] *Kurz tepelného zpracování: učební texty*. Praha: Ecosond, 2009. ISBN 978-80-904462-1-2.
- [8] KRAUS, V. Tepelné zpracování a slinování. (přednášky) [cit. 2019-11-23] Dostupné z: <http://tzs.kmm.zcu.cz/TZSprcelk.pdf>
- [9] Nitridování ocelí. *Tumlikovo.cz* [online]. Praha, 2010 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/nitridovani-oceli/>
- [10] SAMUHELOVÁ, Lenka. *Cementování ozubených kol* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/109265/KUB405\\_FMMI\\_B3923\\_3911R030\\_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/109265/KUB405_FMMI_B3923_3911R030_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Bakalářská práce. VŠT-TU Ostrava.
- [11] VAŠÍČEK, David. *Nedestruktivní zkoušky materiálu* [online]. Brno, 2008 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <https://is.mendelu.cz › lide › clovek › zalozka=13;id=27256;studium=8448...>. Bakalářská práce. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.
- [12] MILLER, Ronnie K., Eric v. K. HILL a Patrick O. MOORE. *Acoustic emission testing*. Columbus, OH: American Society for Nondestructive Testing, 2005. *Nondestructive testing handbook* (3rd ed.), v. 6. ISBN 1-57117-106-1.
- [13] SAMUHEL, Jindřich. *Odstranění nežádoucích vlivů při kalení po cementaci* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z:

[https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/109304/SAM027\\_FMMI\\_B3923\\_3911R030\\_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=n](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/109304/SAM027_FMMI_B3923_3911R030_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=n). Bakalářská práce. VŠT-TU Ostrava.

[15] G.E. Totten, G.E. Totten & Associates, LLC, M. Narazaki, Utsunomiya University (Japan a R.R. Blackwood and L.M. Jarvis, Tenaxol Inc. Failures Related to Heat Treating Operations. [Http://www.getottenassociates.com](http://www.getottenassociates.com) [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: [http://www.getottenassociates.com/pdf\\_files/6072\\_0192\\_224\\_web.pdf](http://www.getottenassociates.com/pdf_files/6072_0192_224_web.pdf)

[16] Baldev Raja, B.K. Choudharya a R.K. Singh Ramanb,\*. Mechanical properties and non-destructive evaluation of chromium– molybdenum ferritic steels for steam generator application. [Htpps://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308016103002217?via%3Dihub](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308016103002217?via%3Dihub) [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308016103002217?via%3Dihub>

[17] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.

[18] CANALE, Lauralice de Campos Franceschini, R. A. MESQUITA a George E. TOTTEN. *Failure analysis of heat treated steel components*. Materials Park, Ohio: ASM International, c2008. ISBN 978-0-87170-868-7.

[19] KRISTEK, Michal. *Ultrazvuk v diagnostice materiálů* [online]. BRNO, 2015 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=105598](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=105598). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Jirí Kazelle, CSc.

[20] *Zkoušky bez porušení materiálu- nedestruktivní zkoušky* [online]. , 4 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: [https://www.spszengrova.cz/texty/texty/KOM/KOM\\_3\\_5\\_SPU-zkousky\\_bez\\_poruseni\\_materialu.pdf](https://www.spszengrova.cz/texty/texty/KOM/KOM_3_5_SPU-zkousky_bez_poruseni_materialu.pdf)

[21] STACH, Ondřej. *Měření rychlosti šíření ultrazvuku ve vybraných materiálech v návaznosti na ultrazvukové svařování* [online]. Plzeň, 2018 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/31993/1/Mereni%20rychlosti%20sireni%20ultrazvuku%20ve%20vybranych%20materialech%20v%20navaznosti%20na%20ultrazvukove%20svaro-vani.pdf>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.

[22] OBRAZ, Jaroslav. *Zkoušení materiálu ultrazvukem*. Praha: SNTL, 1989. Redakce strojírenské a metalurgické literatury. ISBN 80-03-00097-1.

[23] JELÍNEK, Petr. Nedestruktivní zkoušení zařízení jaderných elektráren elektrickými metodami [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: [https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/3927/1/DP\\_JELINEK.pdf](https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/3927/1/DP_JELINEK.pdf). Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.

[24] DETEKCE POVRCHOVÝCH PRASKLIN A BRUSNÝCH POPÁLENIN POMOCÍ PMTF. *Consenta spol s.r.o.* [online]. Praha, , 2 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: [http://www.consenta.cz/ibg/ibg\\_crack.html?gclid=EAIaIQobChMI1b\\_Ahsmm5gIVxYbVCh0uTggdEAEYAIAAEgJm2fD\\_BwE](http://www.consenta.cz/ibg/ibg_crack.html?gclid=EAIaIQobChMI1b_Ahsmm5gIVxYbVCh0uTggdEAEYAIAAEgJm2fD_BwE)

[25] ET DEFEKTOSKOPIE – VÍŘIVÉ PROUDY [online]. [CIT. 2019-12-22], DOSTUPNÝ Z WWW: <http://www.ndt.cz/?mnu=17,0>

[26] ŠROUB, Jan. *Metoda vířivých proudů* [online]. 2004, 2004, **5**, 10 [cit. 2019-12-08].  
Dostupné z: <http://www.cdm.cas.cz/czech/hora/vyuka/tdk/sem2004/>

### Obrázky:

[3] KOTRBA, Matěj. *Zjišťování a ověřování deformačních procesů u tvářených ocelí vybranými NDT metodami* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/20313/1/Bakalarska%20prace\\_Kotrba.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/20313/1/Bakalarska%20prace_Kotrba.pdf). Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.

[5] SOLNÁŘ, Josef. *Metoda akustické emise. PTS-Josef Solnář* [online]. 2010, **2010**, 1-2 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <https://www.ptsndt.com/cs/prodej/at-zkouseni-akustickou-emisi>

[6] VÍTOVEC, Vilém. *Hodnocení kvality ozubených kol vhodnými metodami NDT* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/27353>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.

[11] VAŠÍČEK, David. *Nedestruktivní zkoušky materiálu* [online]. Brno, 2008 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <https://is.mendelu.cz › lide › clovek › zalozka=13;id=27256;studium=8448...> Bakalářská práce. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.

[12] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.

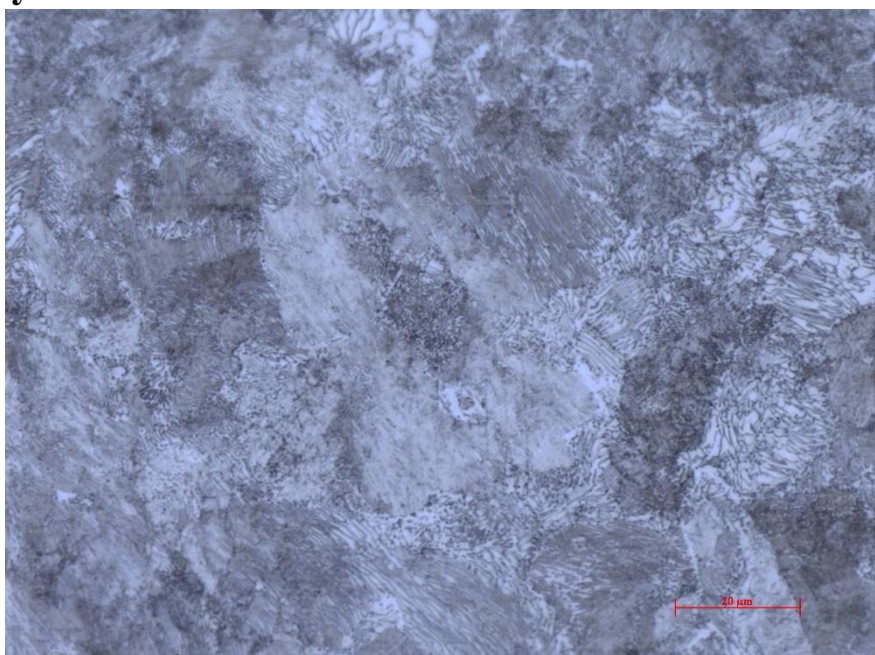
[19] KRISTEK, Michal. *Ultrazvuk v diagnostice materiálů* [online]. BRNO, 2015 [cit. 2019-12-08].  
Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=105598](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=105598). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Jirí Kazelle, CSc.

[20] *Zkoušky bez porušení materiálu- nedestruktivní zkoušky* [online]. , 4 [cit. 2019-12-08].  
Dostupné z: [https://www.spszengrova.cz/texty/texty/KOM/KOM\\_3\\_5\\_SPU-zkousky\\_bez\\_poruseni\\_materialu.pdf](https://www.spszengrova.cz/texty/texty/KOM/KOM_3_5_SPU-zkousky_bez_poruseni_materialu.pdf)

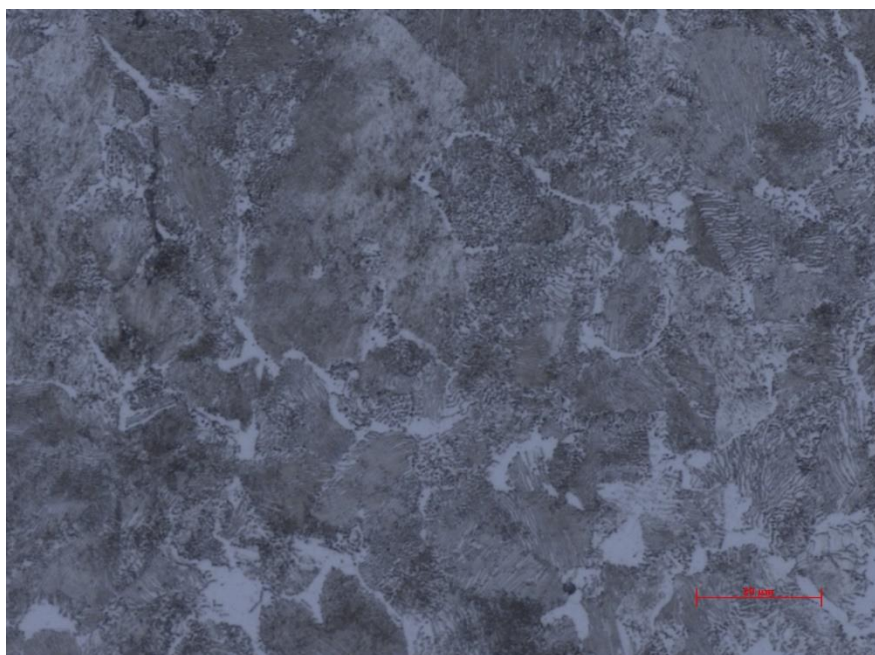
[23] JELÍNEK, Petr. *Nedestruktivní zkoušení zařízení jaderných elektráren elektrickými metodami* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: [https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/3927/1/DP\\_JELINEK.pdf](https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/3927/1/DP_JELINEK.pdf). Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.

[26] ŠROUB, Jan. *Metoda vířivých proudů* [online]. 2004, 2004, **5**, 10 [cit. 2019-12-08].  
Dostupné z: <http://www.cdm.cas.cz/czech/hora/vyuka/tdk/sem2004/>

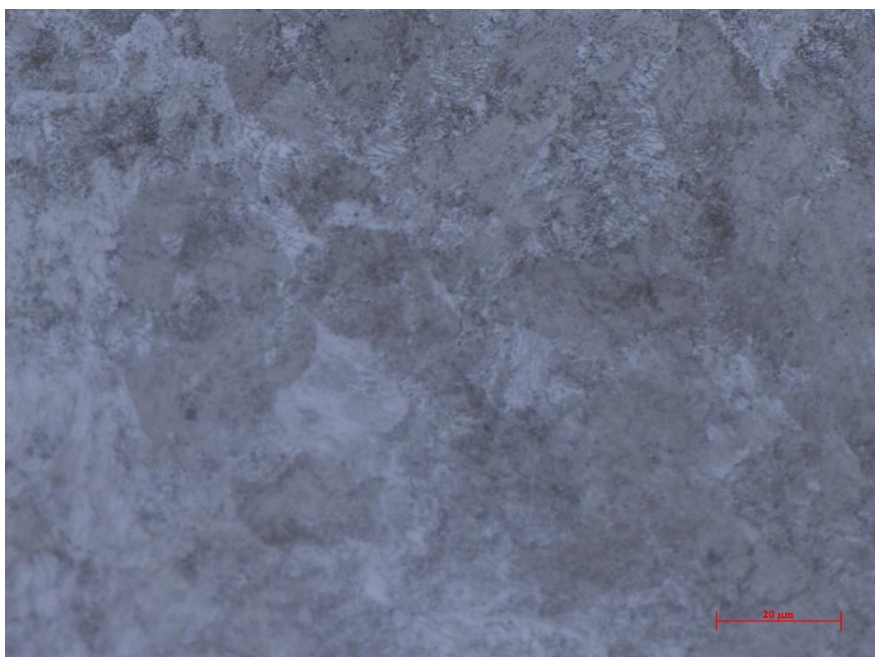
## 12 Přílohy



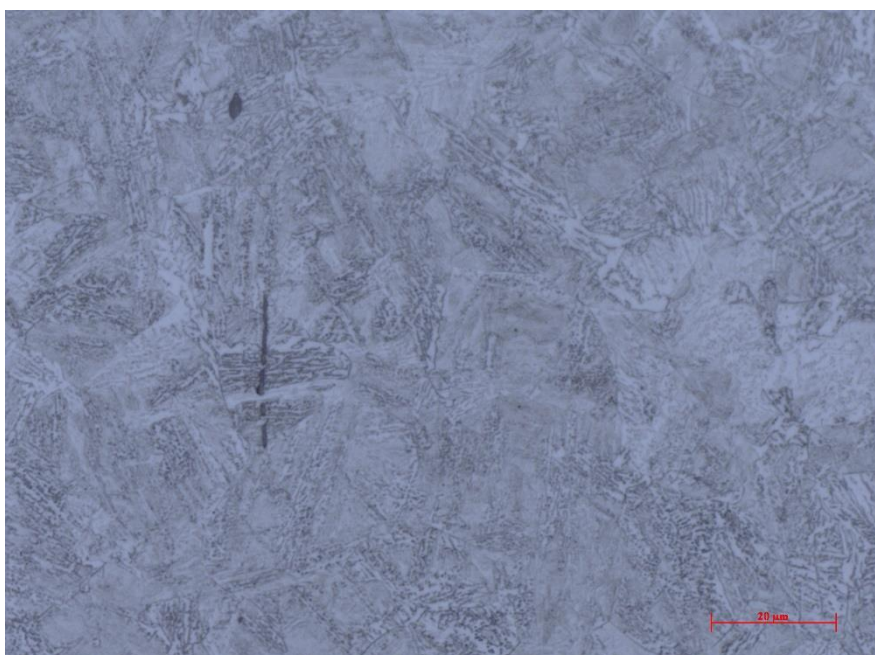
Obr. 38 struktura cementovaného vzorku po dobu 3h



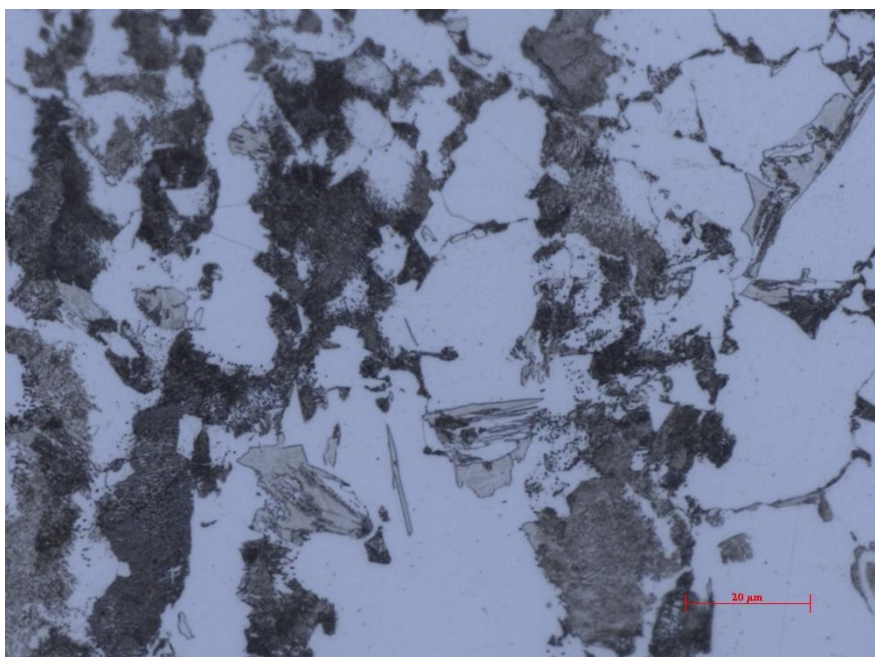
Obr. 39 struktura cementovaného vzorku po dobu 6h



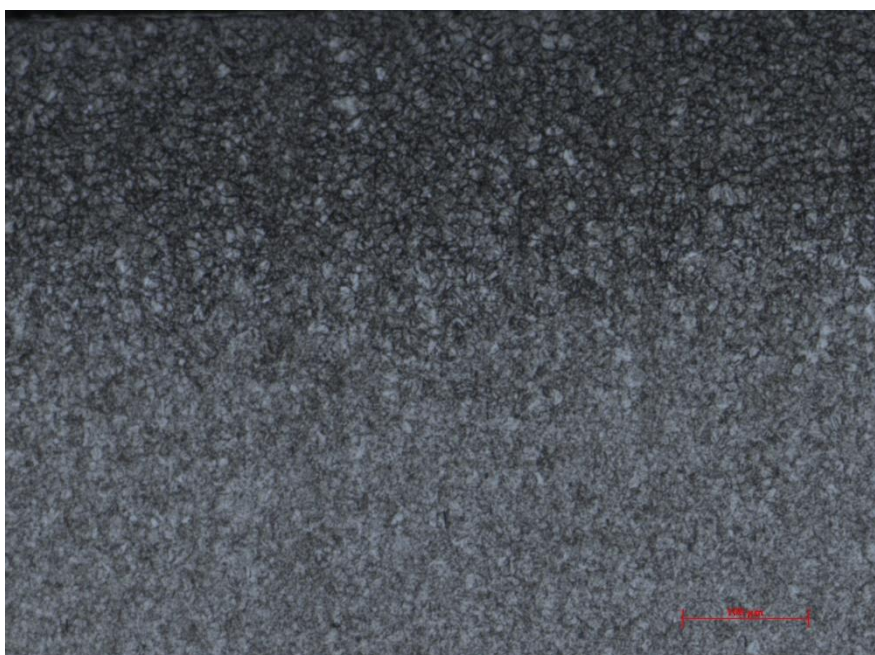
Obr. 40 struktura cementovaného vzorku po dobu 12h



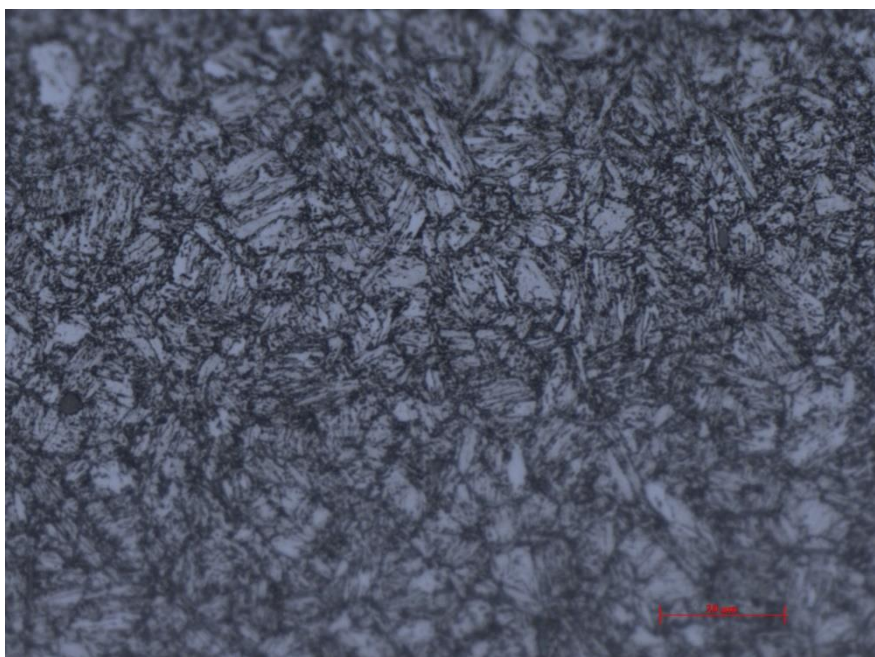
Obr. 41 struktura kaleného vzorku



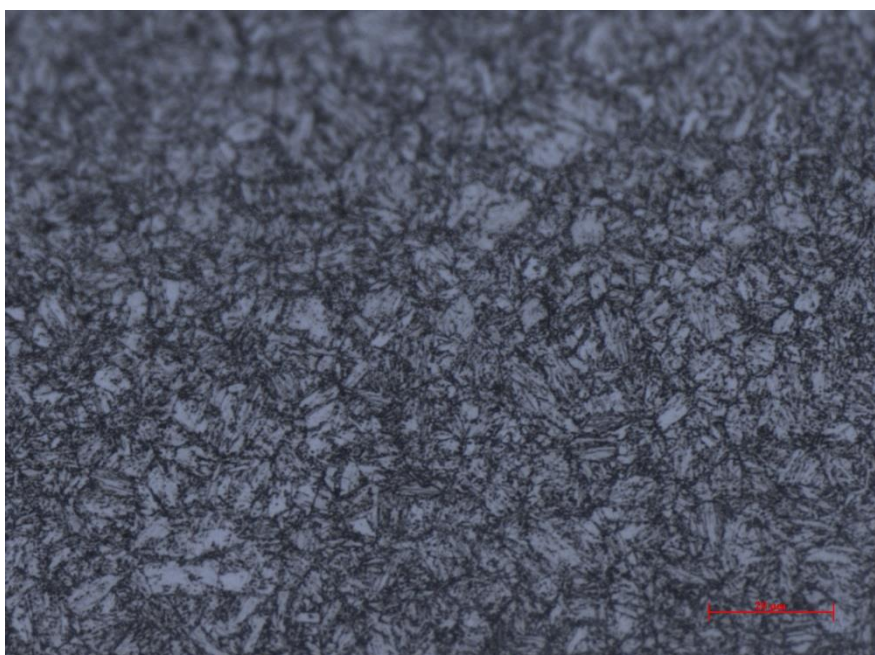
Obr. 42 struktura kaleného vzorku ve folii



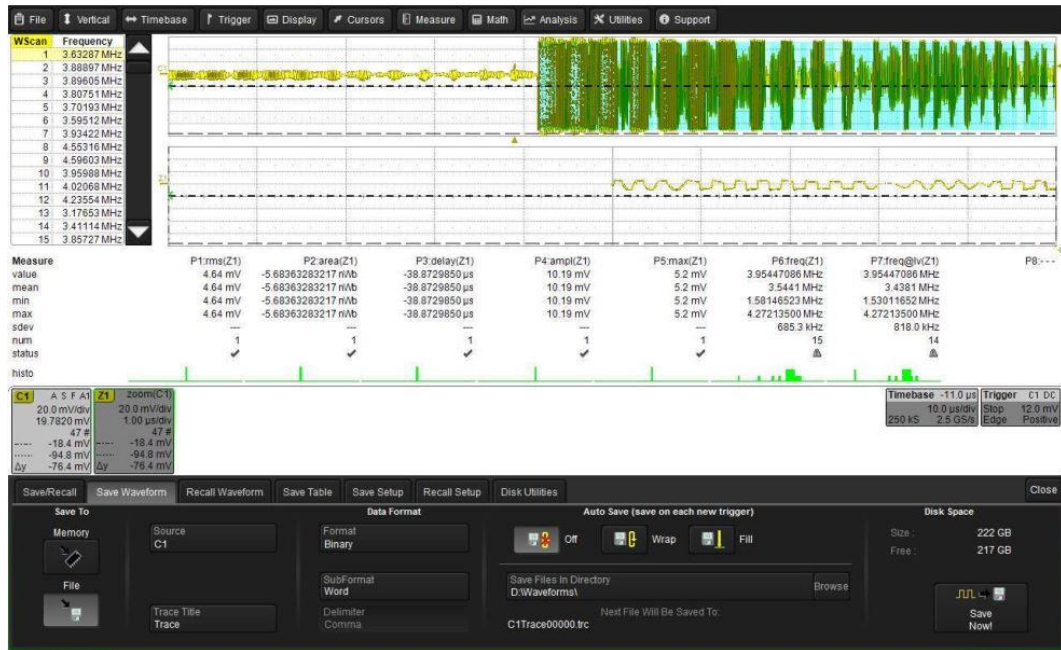
Obr. 43 struktura nitridovaného vzorku s úběrem 10



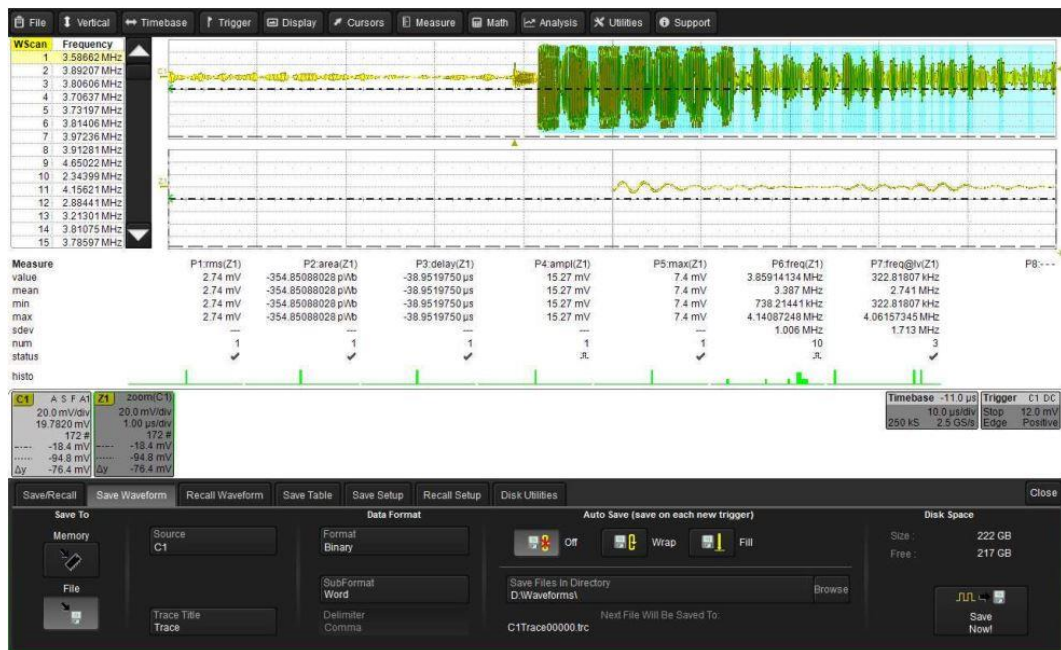
Obr. 44 struktura nitridovaného vzorku s úběrem 25



Obr. 45 struktura nitridovaného vzorku s úběrem 75

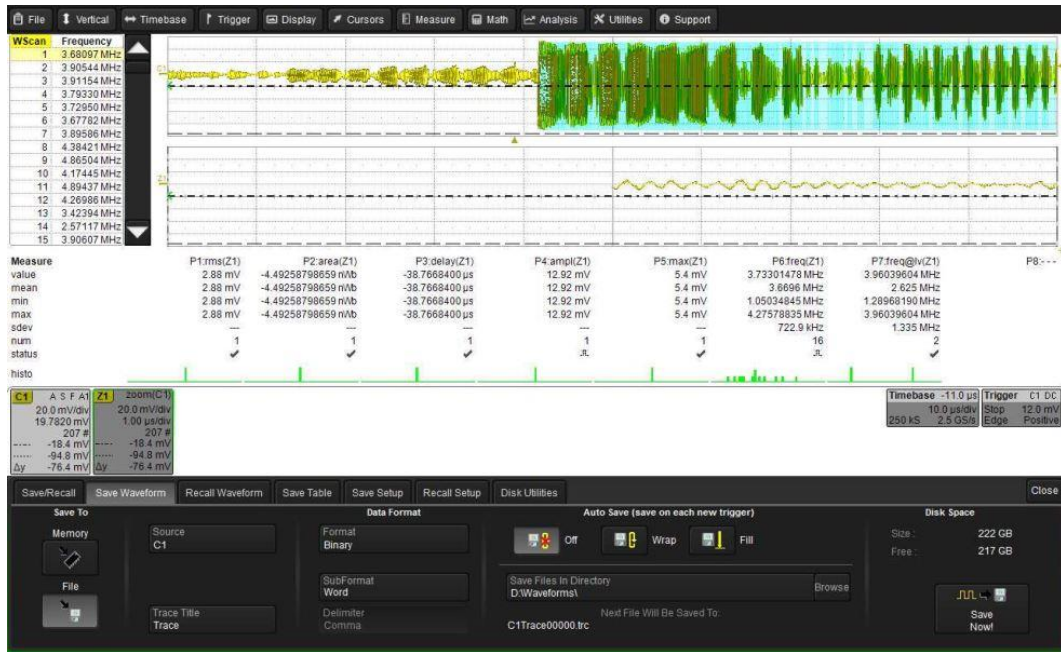


Obr. 46 hodnocení materiálových charakteristik u cementovaného vzorku po dobu 3h

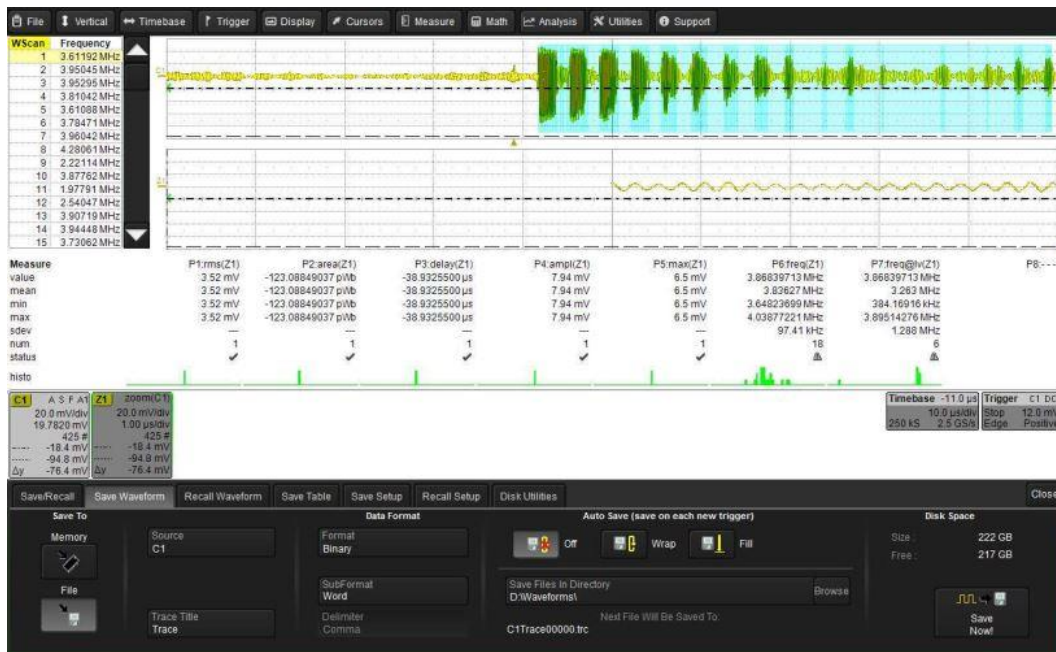


Obr. 47 hodnocení materiálových charakteristik u cementovaného vzorku po dobu 6h

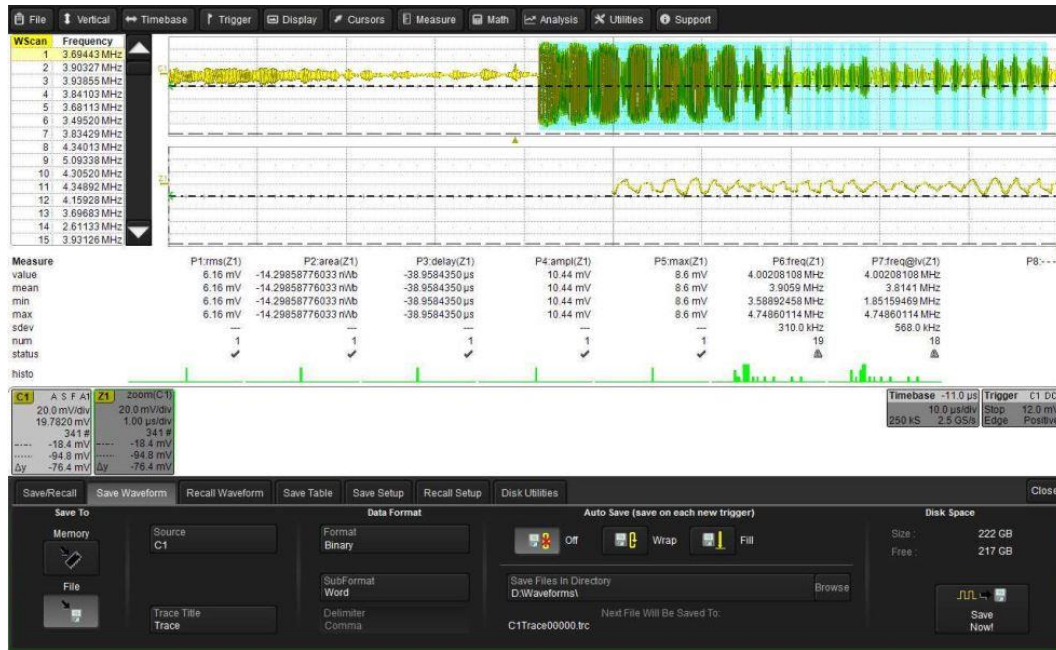




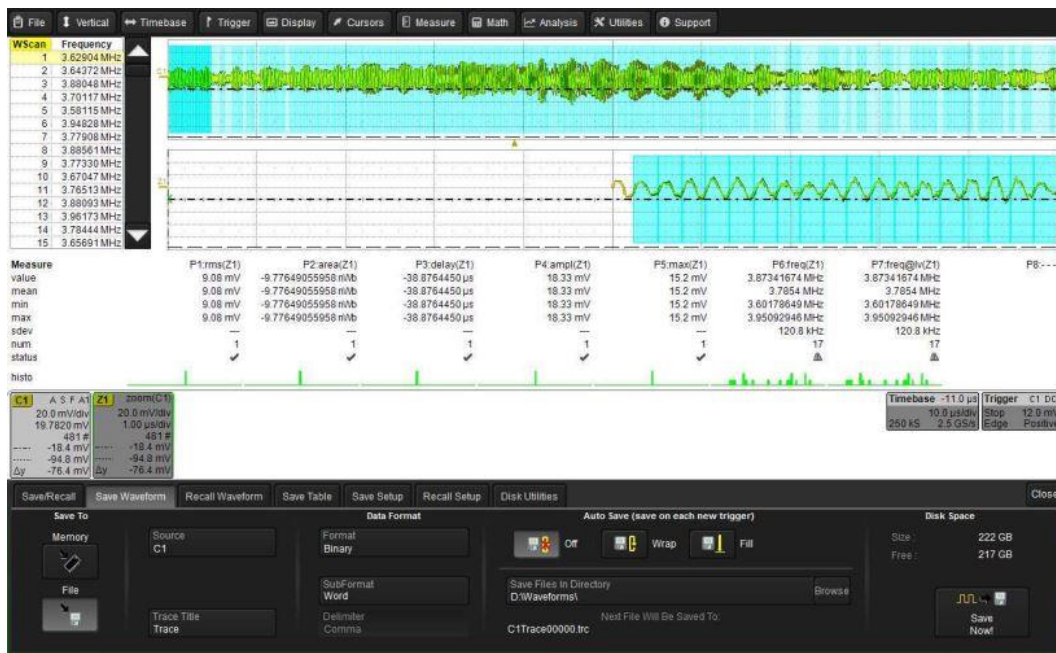
Obr. 48 hodnocení materiálových charakteristik u cementovaného vzorku po dobu 12h



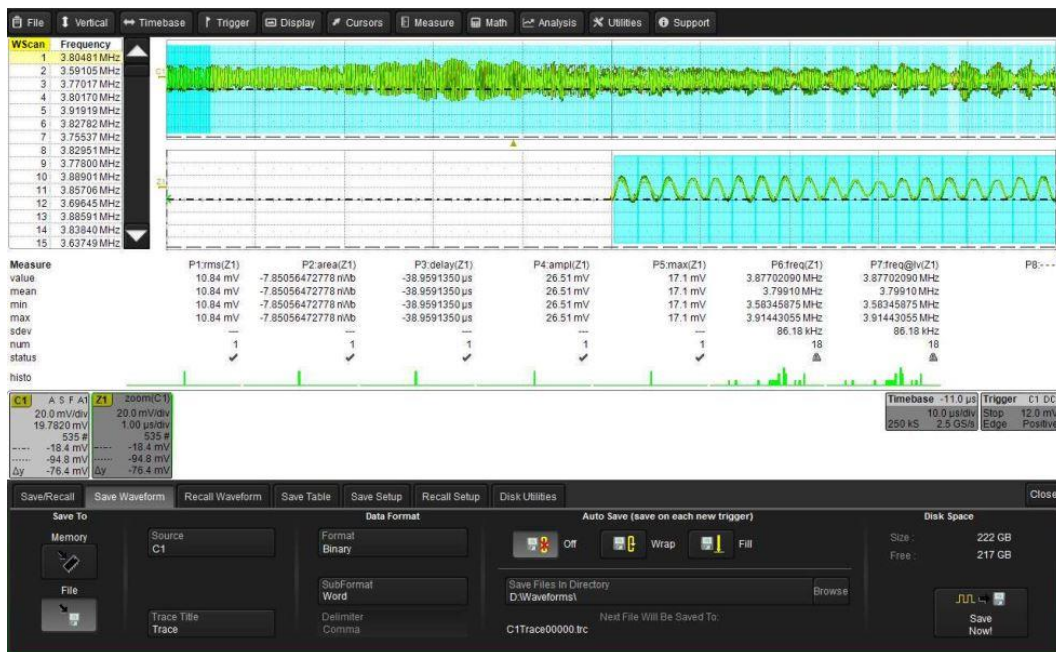
Obr. 49 hodnocení materiálových charakteristik u kaleného vzorku



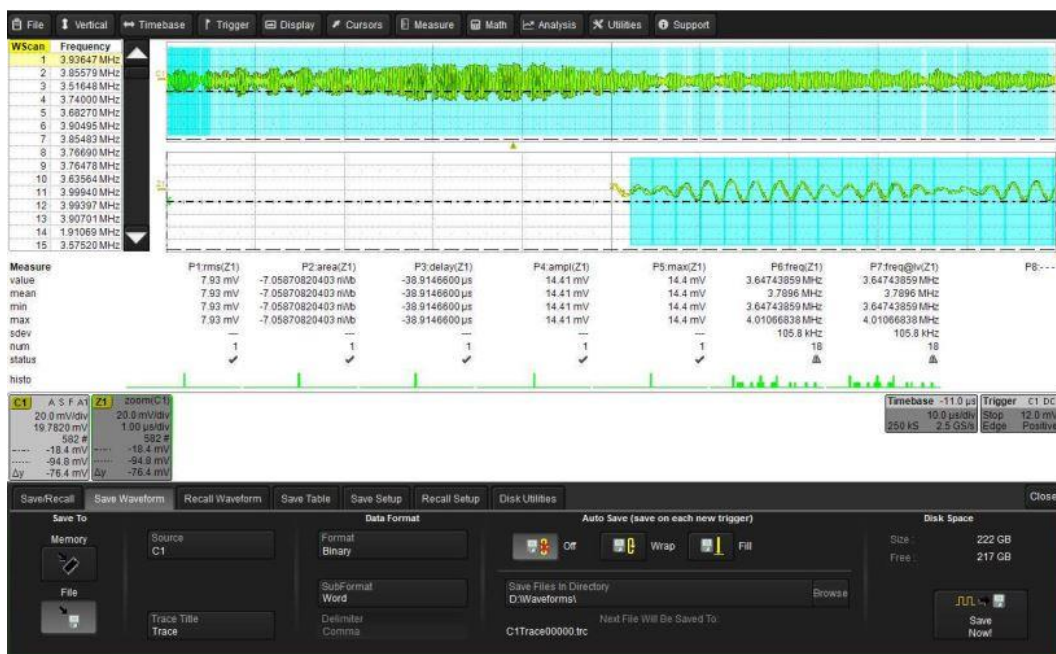
Obr. 50 hodnocení materiálových charakteristik u kaleného vzorku ve fólii



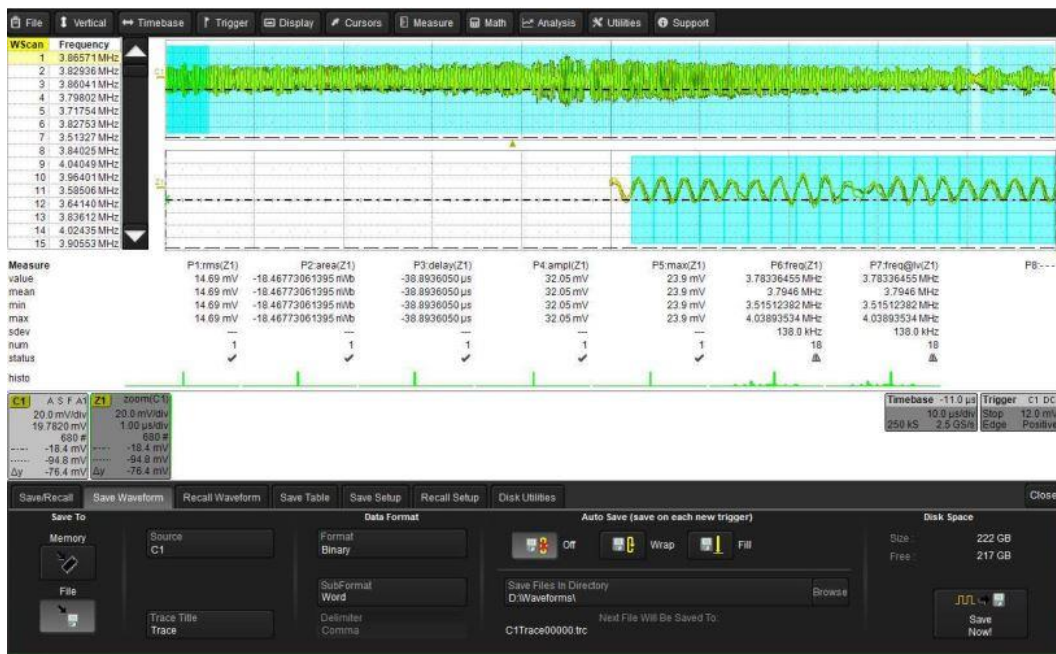
Obr. 51 hodnocení materiálových charakteristik u nitrídaného vzorku s úběrem 10



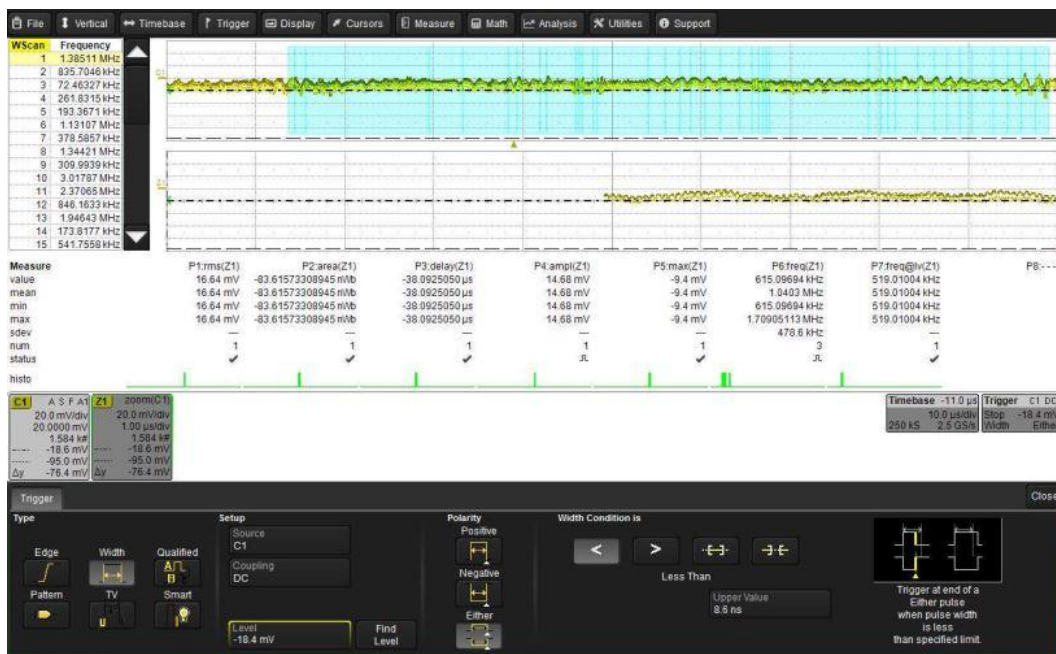
Obr. 52 hodnocení materiálových charakteristik u nitridovaného vzorku s úběrem 25



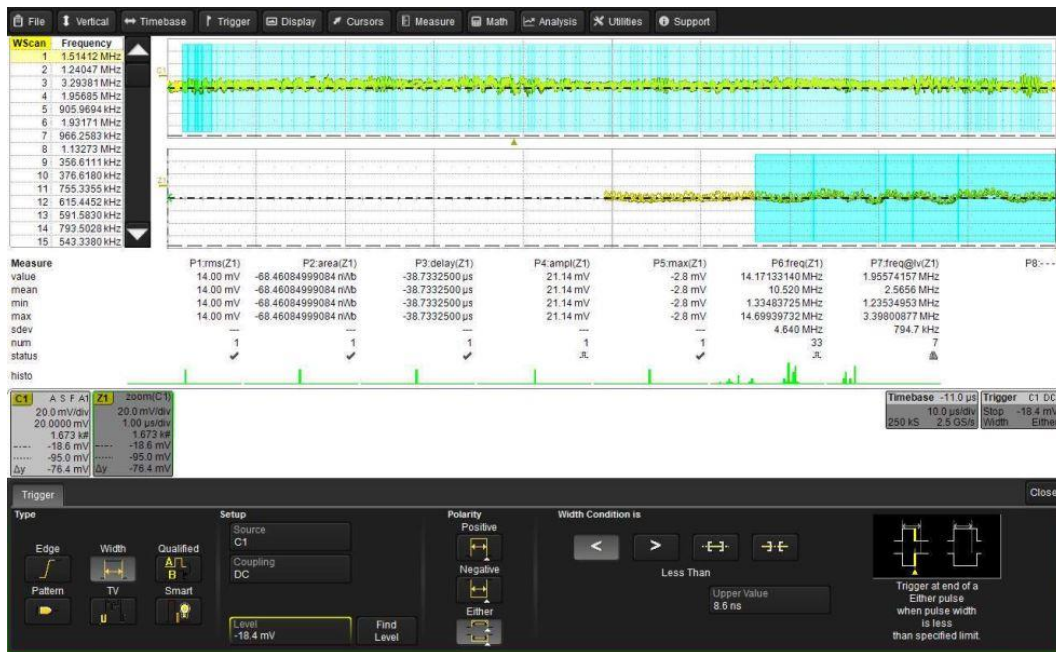
Obr. 53 hodnocení materiálových charakteristik u nitridovaného vzorku s úběrem 50



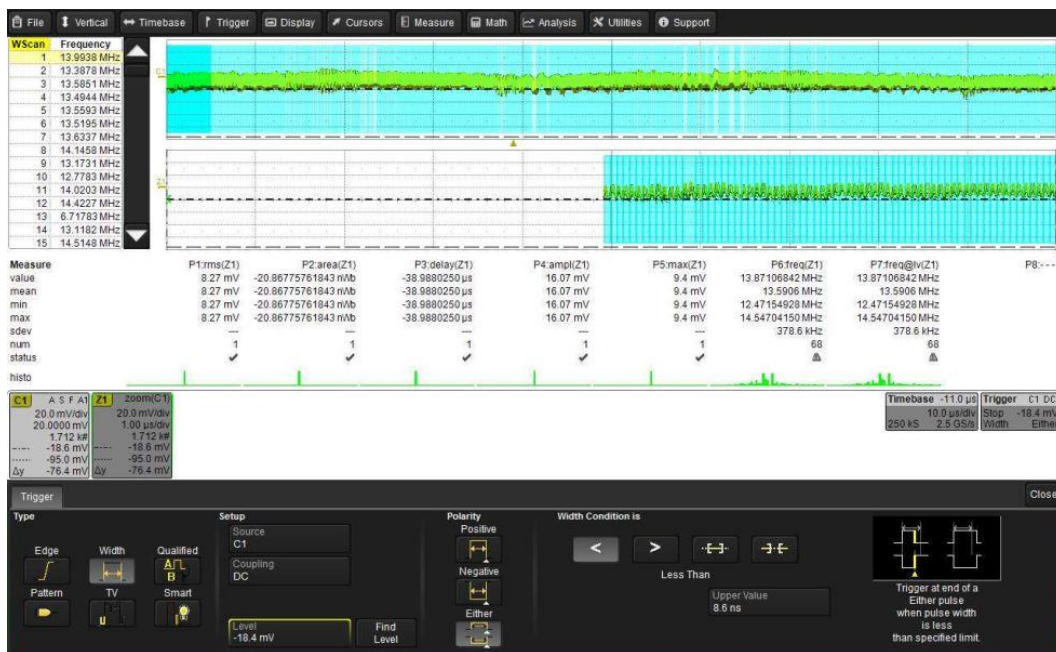
Obr. 54 hodnocení materiálových charakteristik u nitridovaného vzorku s úběrem 70



Obr. 55 hodnocení materiálových charakteristik pomocí akustické emise u cementovaného vzorku po dobu 3h



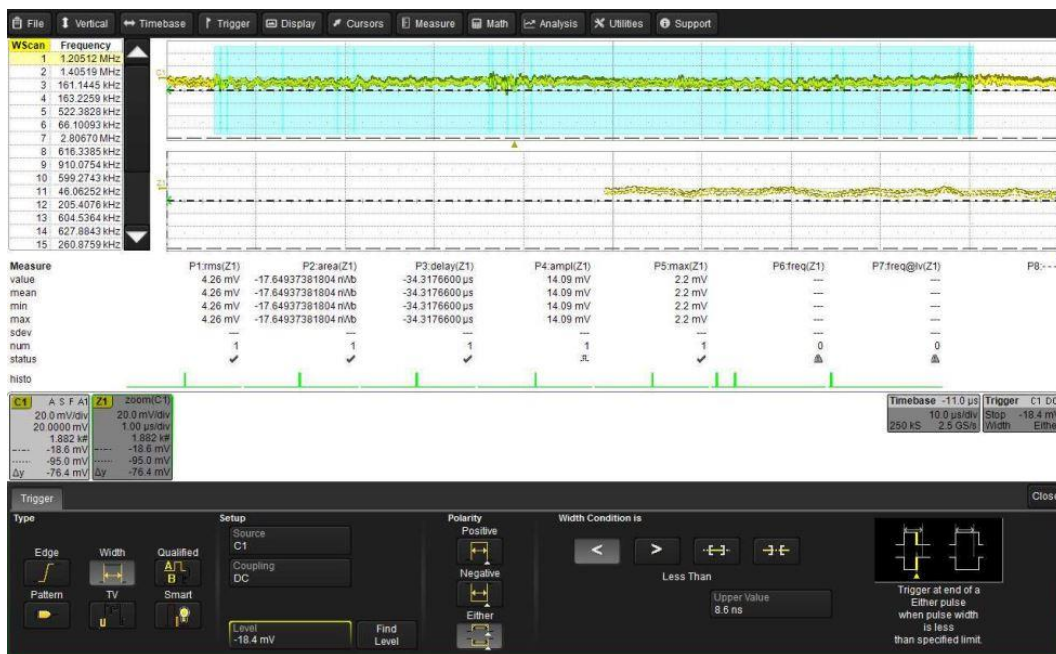
Obr. 56 hodnocení materiálových charakteristik pomocí akustické emise u cementovaného vzorku po dobu 6h



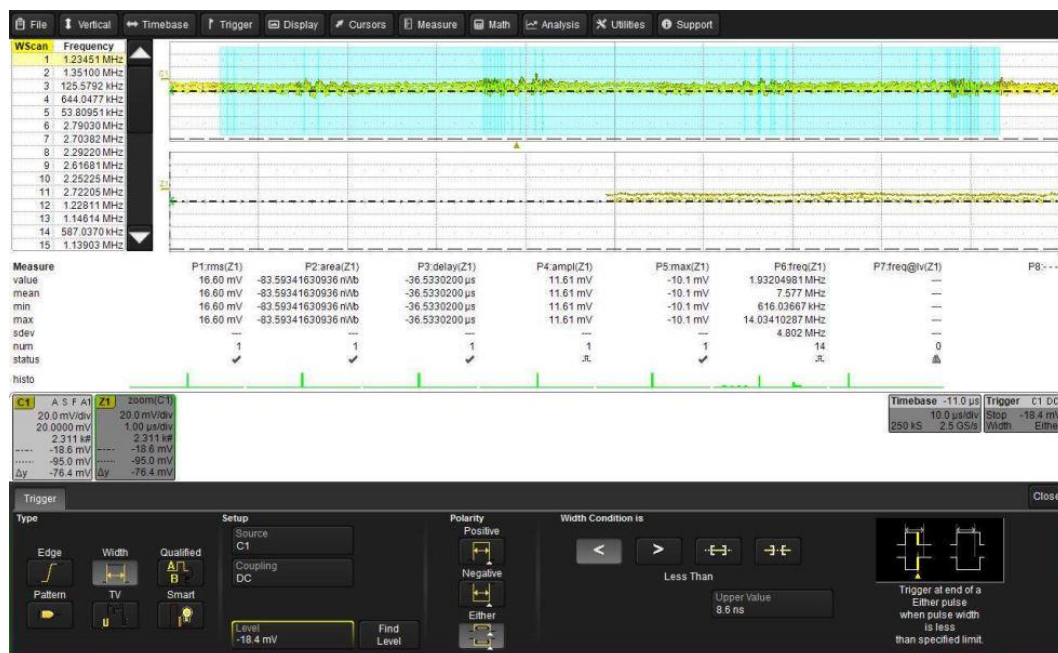
Obr. 57 hodnocení materiálových charakteristik pomocí akustické emise u cementovaného vzorku po dobu 12h



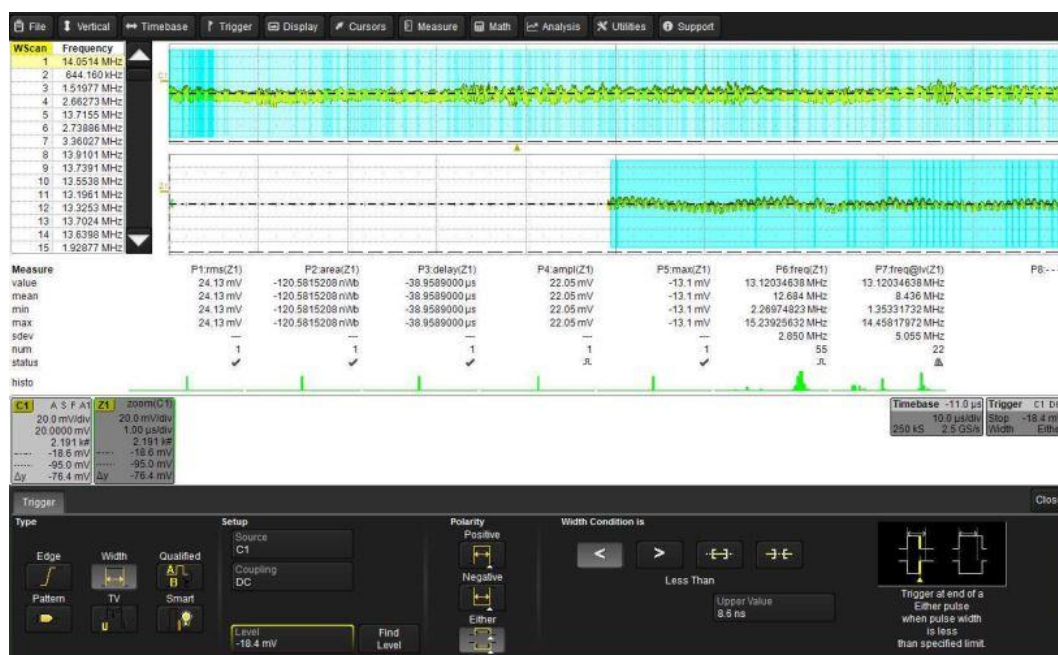
Obr. 58 hodnocení materiálových charakteristik pomocí akustické emise u kaleného vzorku



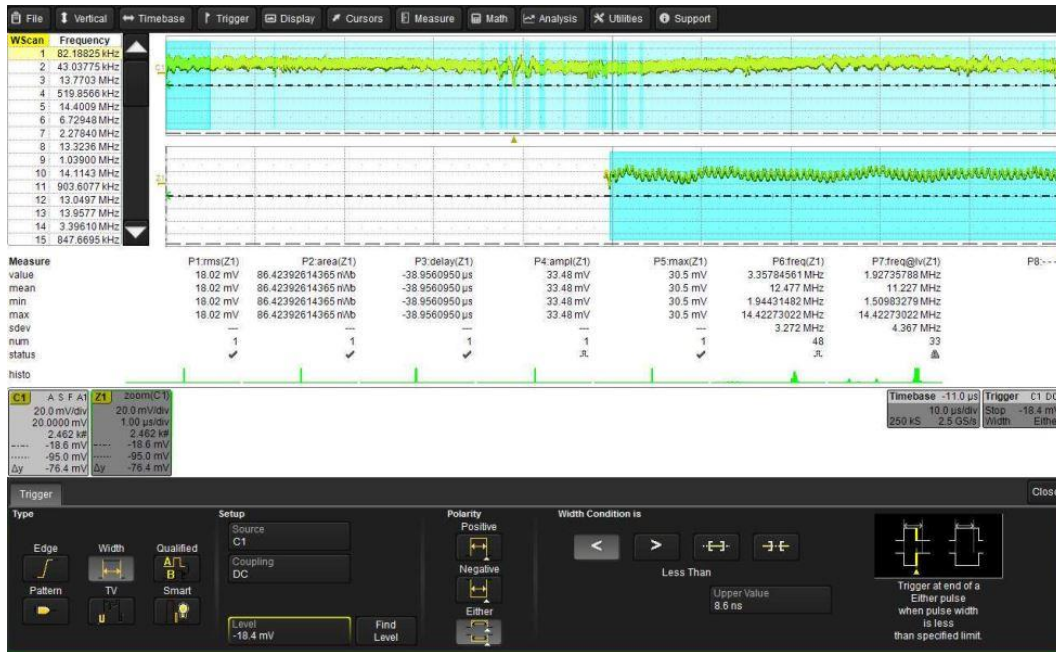
Obr. 59 hodnocení materiálových charakteristik pomocí akustické emise u kaleného vzorku ve fólii



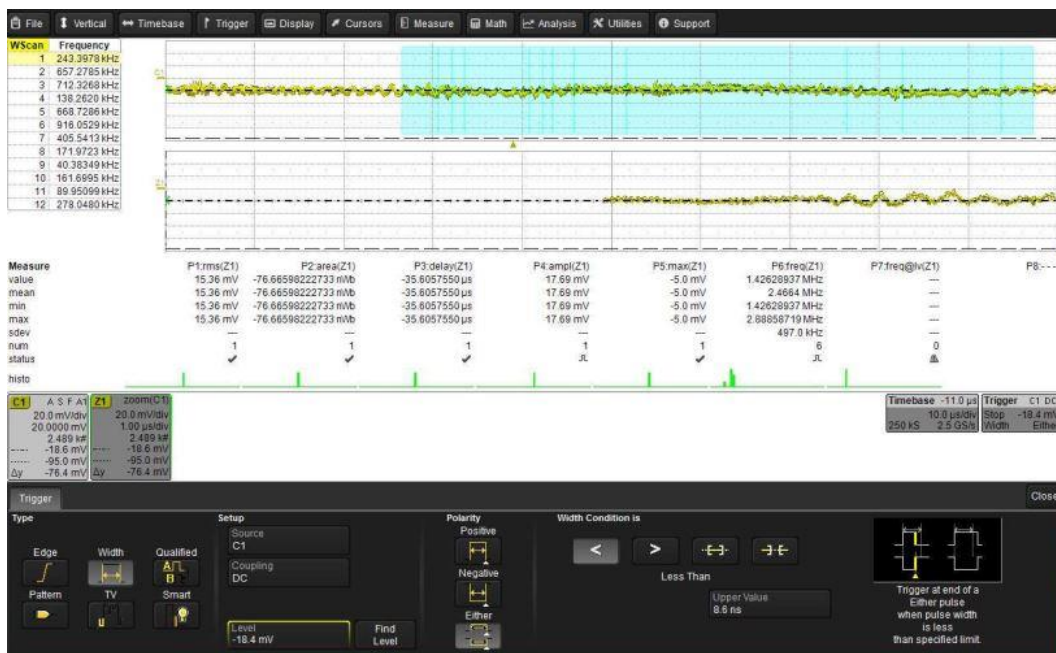
Obr. 60 hodnocení materiálových charakteristik pomocí akustické emise u nitridovaného vzorku s úběrem 10



Obr. 61 hodnocení materiálových charakteristik pomocí akustické emise u nitridovaného vzorku s úběrem 25



Obr. 62 hodnocení materiálových charakteristik pomocí akustické emise u nitridovaného vzorku s úběrem 50



Obr. 63 hodnocení materiálových charakteristik pomocí akustické emise u nitridovaného vzorku s úběrem 70