

Univerzita Hradec Králové
Přírodovědecká fakulta
Katedra Fyziky

Metody nedestruktivního zkoumání vad uvnitř materiálů
Bakalářská práce

Autor: František Lukášek
Studijní program: B1701 Fyzika
Studijní obor: Fyzikálně-technická měření a výpočetní technika

Vedoucí práce: RNDr. Jan Šlégr, Ph.D

Hradec Králové

květen 2017

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem v seznamu použité literatury uvedl všechny prameny, z kterých jsem vycházel.

V Hradci Králové dne 7. 6. 2017

Jméno a příjmení

Poděkování

Děkuji RNDr. Janu Šlégrovi, Ph.D. za jeho ochotu při vedení této bakalářské práce. Dále chci poděkovat panu Radku Kopeckému a celé firmě ND Scan Services s.r.o. za možnost provést měření a za pomoc při měření nedestructivních zkoušek.

Anotace

LUKÁŠEK, F. Metody nedestruktivního zkoumání vad uvnitř materiálů. Hradec Králové, 2017. Bakalářská práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Hradec Králové. Vedoucí bakalářské práce Jan Šlégr. 63 s.

Předmětem této práce je podrobné popsání metod nedestruktivních zkoušek vad uvnitř materiálu, konkrétně pak především zkoušek prozařováním a zkoušek ultrazvukem. Teoretická část popisuje základní fyzikální zákony a principy zkoušek. Praktická část následně obsahuje podrobné popsání provedení zkoušek ultrazvukem a prozařováním a následné vyhodnocení těchto zkoušek.

Klíčová slova

Defektoskopie, nedestruktivní zkoušky materiálu, zkoušky prozařováním, ultrazvuková zkouška

Annotation

LUKÁŠEK, F. Methods of non-destructive detection of inner defects within materials. Hradec Králové, 2017. Bachelor Thesis at the Faculty of Science, University of Hradec Králové. Bachelor Thesis supervisor: Jan Šlégr. 63 p.

The subject of the thesis is a detailed description of methods of non-destructive detection of inner defects within materials, namely radiation and ultrasound tests. The theoretical part describes basic physical laws and principles of testing. The practical part deals with a detailed description of ultrasonic and radiological tests carried out, and subsequently the evaluation of these tests.

Keywords

Defectoscopy, Non-Destructive Material Testing, Radiation Testing, Ultrasonic

1	Obsah	
2	Úvod.....	8
3	Defektoskopie	10
3.1	Vady materiálu a součástí	10
3.2	Metody nedestruktivních zkoušek.....	11
3.3	Vnitřní vady	11
4	Ultrazvuk	12
4.1	Základní pojmy	12
4.2	Akustický tlak	13
4.3	Druhy ultrazvukových vln.....	14
4.3.1	Podélné vlny (L – longitudinální).....	14
4.3.2	Příčné vlny (T – transverzální)	15
4.3.3	Povrchové vlny (R – Rayleighovy)	15
4.3.4	Deskové vlny (D – Lambovy)	15
4.3.5	Loveovy vlny	15
4.4	Rychlost šíření ultrazvuku.....	16
4.5	Interference vlnění	16
4.6	Odraz a lom ultrazvukových vln	17
4.6.1	Kolmý dopad na rozhraní	17
4.6.2	Šikmý dopad na rozhraní	18
4.7	Ohyb ultrazvukových vln.....	18
4.8	Útlum ultrazvukových vln.....	19
4.9	Metody ultrazvukové defektoskopie	20
4.9.1	Metoda průchodová	20
4.9.2	Metoda odrazová.....	21
4.9.3	Metoda Phased Array.....	22
4.9.4	Metoda TOFD.....	23

4.10	Popis principu a zařízení ultrazvukové defektoskopie	26
4.10.1	Princip impulsového defektoskopu.....	26
4.11	Popis jednotlivých částí	27
4.11.1	Sondy	27
5	Zkoušky prozařováním	30
5.1	Charakteristika záření.....	30
5.2	Odraz a lom	31
5.3	Ohyb (difrakce)	31
5.4	Rozptyl	31
5.5	Ionizace	31
5.6	Fluorescence.....	31
5.7	Rentgenové záření	32
5.7.1	Závislost změny intenzity ionizujícího záření	32
5.7.2	Vznik rentgenového záření	32
5.7.3	Rentgenka	33
5.8	Gama záření	34
5.8.1	Základní vlastnosti gama záření	34
5.8.2	Zařízení pro izotopový zářič	36
5.8.3	Interakce záření s hmotou	37
5.8.4	Zákon zeslabení záření.....	38
5.9	Postup při rentgenové zkoušce.....	39
5.9.1	Průběh zkoušky.....	39
5.9.2	Radiografická měřka.....	42
5.9.3	Provedení zkoušky	44
5.10	Popis postup při ultrazvukovém měření	46
5.10.1	Princip měření úhlovou sondou	46
5.10.2	Postup měření	46

5.10.3	Určení velikosti vývrtnu	47
5.10.4	Určení hloubky vývrtnu	48
5.10.5	Celková zkouška sváru	48
6	Závěr	49
7	Zdroje:.....	50
8	Příloha 1 Fotografie z realizace	54
9	Příloha 2 protokol pro rentgenovou zkoušku.....	62
	Příloha 3 protokol pro ultrazvukovou zkoušku.....	63

2 Úvod

Jedním ze základních problémů, při výrobě součástek, které vznikají svařováním, válcováním, odléváním nebo při tepelné úpravě, je zjistit, zda součástka není poškozena. Tedy jestli v ní nevznikly nějaké vady. Metod, které jsou schopny tento problém zjistit, je mnoho, ale při většině z nich je součást zničena nebo porušena. Tyto metody není vhodné využívat například u prototypů letadel či potrubí, jelikož je to velice finančně nákladné a nikdy nemáme stoprocentní jistotu, že je součástka v pořádku. A proto vznikly metody, které jsou schopny zjistit vadu v součástce, aniž by ji zničily nebo poškodily. Toto odvětví zkoušení materiálu se nazývá nedestruktivní zkoušky materiálu.

Nedestruktivní zkoušky materiálu se dále dělí na dva typy. Na zkoušky vnějších neboli povrchových vad a na zkoušky vnitřních vad. Pro zkoušky vnějších vad se převážně používají metody penetrační a magnetická. Princip penetrační zkoušky spočívá v tom, že se součástka natře určitou látkou, která se následně setře a poté se na součástku posvítí například UV světlem, na které reaguje daná penetrační látka, která zůstane pouze v pórech materiálu a v případných poškozených místech. V případě magnetické metody se místo penetrační látky využívá feromagnetický prášek. Tímto práškem se posype povrch součástky, následně se součástka vloží do magnetického pole a prášek se uspořádá ve směru siločar magnetického pole. V místě s vadou je siločára přerušena. Tato metoda se dá využít jen v případě, že je součástka kovová.

U zkoušek vnitřních vad se nejčastěji používají metody prozařováním a ultrazvukem. Obě tyto metody jsou velice rozšířeny a jsou využívány pro testování všech vnitřních vad. Díky těmto zkouškám můžeme vědět, že dané potrubí je dobře svařeno a že vydrží požadovaný tlak nebo že letadlo nemá žádné vady v konstrukci a že vydrží turbulence. Princip prozařovací zkoušky všichni dobře známe, je velice podobný tomu, jak lékaři zjišťují, zda máme zlomenou ruku či nikoliv, tedy pomocí Röntgenova záření, v průmyslové praxi se ještě používá jako zdroj záření gama. Hlavním rozdílem mezi zkoušením materiálu a lékařským rentgenem je ve velikosti dávky záření a času jakým jsme mu vystaveni.

Principem ultrazvukové zkoušky je změna vlastností vlny, když se šíří heterogenním prostředím. Jakmile daná vlna narazí na nesourodost, prasklinu či pór

dojde k jejímu lomu, odrazu nebo další změně. A proto jsme díky elektronice schopni vše zaznamenat a následně vyhodnotit, zda je v daném materiálu vada.

Cílem této práce je právě představení metod zkoumání vnitřních vad, a to pomocí již zmiňovaných zkoušek prozařováním a pomocí ultrazvukových vln. Obě tyto metody jdou zde nejprve popsány z fyzikálního hlediska pomocí základních fyzikálních zákonů. Dále je zde popsána samotná zkouška. A to tak, jak se nastavují měřicí přístroje a jak zjistíme konkrétní veličiny, které nastavujeme. V další části je již praktické provedení zkoušek, a to jak pomocí prozařování, zde konkrétně Röntgenovým zářením, tak i zkouška ultrazvukem. Obě tyto zkoušky jsou popsány a důkladně rozebrány krok po kroku.

3 Defektoskopie

Defektoskopie, nebo také nedestruktivní zkoušky materiálu, zahrnuje soubor metod, které jsou na základě měřitelných nebo sledovaných fyzikálních jevů schopny odhalit vady ve výrobku bez jeho porušení nebo poškození.

3.1 Vady materiálu a součástí

Pojmem vada rozumíme různorodé odchylky od předepsaných požadavků na výrobek, a to buď odchylky od rozměrů, tvaru, barvy a mnoha dalších. Pro použití nedestruktivních zkoušek rozumíme vady zejména v odchylce od chemického složení, sktruktury a necelistvosti materiálu.

Vady materiálu můžeme rozdělit do těchto hlavních skupin:

1. vnitřní a povrchové vady,
2. strukturální a chemická nehomogenita,
3. záměna materiálu,
4. rozměrová chyba materiálu.

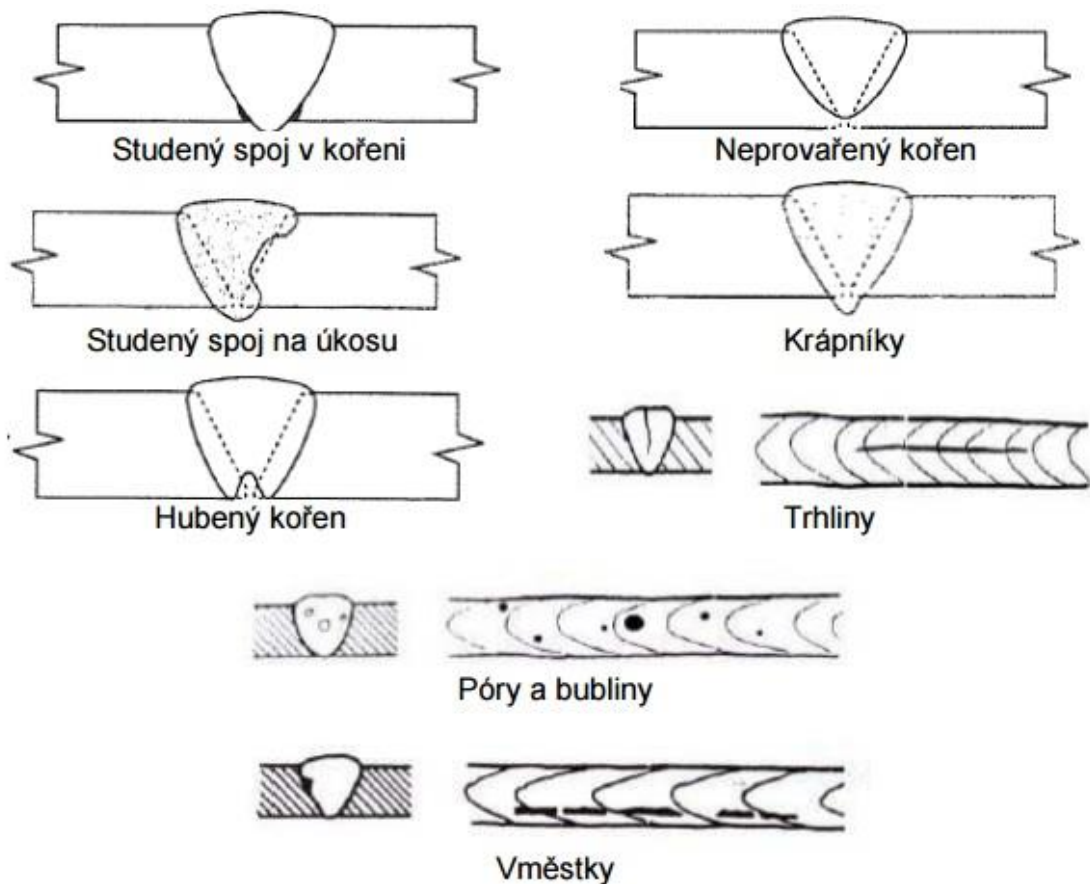
Chyby uvedené v bodech 1, 2 a 4 můžou vzniknout při výrobě nebo po čase používání výrobku, chyba uvedená v bodě 3 vzniká ve výrobě nebo při montáži.

Ve výrobě se podle druhu výrobku a technologie výroby může vyskytovat možná chyba [3]:

- odlitky: dutiny, staženiny, pórovitosti, vměstky, trhliny,
- výkovky: osově dutiny a trhliny, nehomogenita,
- plechy: zdvojení a trhliny,
- válcovaný nebo tažený tyčový materiál: trhliny, dutiny, vměstky, povrchové trhliny a převalky,
- trubky bezešvé a válcované: zdvojení, podélné a příčné trhliny,
- svary: vměstky, póry, studené spoje, neprovařená místa v kořenech, vruby na okraji svaru, trhliny.

Po čase používání výrobku může v materiálu nastat:

- změna struktury a vlastnosti vlivem stárnutí,
- vznik a šíření trhlín,
- změna tvaru a rozměrů způsobených korozí a opotřebením.



Obrázek 1 vady vzniklé při svářování [10]

3.2 Metody nedestruktivních zkoušek

Jednotlivé metody nedestruktivních zkoušek můžeme dělit z hledisku typu vady, kterou chceme hledat, tedy zda chceme nalézt vadu na povrchu, nebo vadu skrytou uvnitř součásti. Podle toho dělíme metody do dvou skupin:

- a) Povrchové vady: zde se používají nejčastěji penetrační a magnetické zkoušky
- b) Vnitřní vady: zde se používají zkoušky ultrazvukem a prozářením

3.3 Vnitřní vady

Vnitřní vady se dříve velice těžko zkoumaly bez porušení zkoumaného materiálu, a proto je defektoskopie vnitřních vad velmi důležitá a velice často se používá pro kontrolu potrubí, svarů a mnoha dalších. Mezi nejvýznamnější metody patří metoda ultrazvukem a metoda prozářením [3], [7].

4 Ultrazvuk

Ultrazvukem se rozumí mechanické kmitání částic prostředí s frekvencí nad 20000 Hz. Pro nedestruktivní zkoušky se využívají ultrazvukové vlny o frekvenci až do 30 MHz v laboratorních podmínkách a přibližně do 15 MHz v průmyslové praxi. Na myšlenku praktického použití ultrazvuku pro zkoušení materiálu upozornil koncem dvacátých let sovětský fyzik Sokolov. Avšak plně realizovat ultrazvukovou metodu v běžné technice v praxi umožnil až rozvoj elektroniky v padesátých letech [7].

4.1 Základní pojmy

Ultrazvuk je možno chápat jako zvukovou vlnu o určité frekvenci šířící se prostředím. Toto vlnění není nic jiného než kmitavý pohyb částic. Jelikož mezi částicemi působí síly soudržnosti, postupně se tento pohyb přenáší z jedné částice na všechny v okolí, což se projevuje tak, že vzruch neboli vlna se šíří určitou rychlostí v daném prostředí. Matematicky tento pohyb lze vyjádřit vlnovou rovnicí, v nejjednodušším případě to je harmonický pohyb bez tlumení.

Okamžitou výchylku y určíme na základě řešení kinetické rovnice kmitavého pohybu:

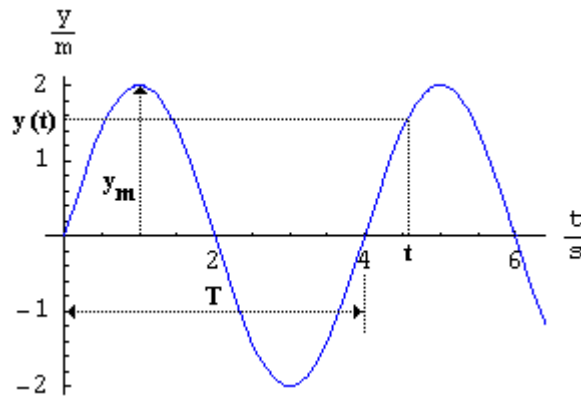
$$y = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right),$$

kde A je maximální výchylka částice, nebo amplitudy (m), Ω je kruhová frekvence $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ (rad.s⁻¹), f je frekvence $f = \frac{1}{T}$ kde T je perioda, se kterou se děj opakuje (Hz), t čas (s), x je vzdálenost kmitajícího bodu od počátku (m) a c je rychlost šířící se vlny (m.s⁻¹).

Dosáhnou-li dva body stejné okamžité výchylky, pak jsou ve fázi. Vzdálenost dvou sousedních bodů ve fázi je délka vlny λ

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

kde λ je vlnová délka (m).



Obrázek 2 harmonický pohyb [11]

Při harmonickém kmitání se okamžitá výchylka A opakuje po čase T . Tento čas nazýváme perioda kmitů a vypočítá se vztahem:

$$T = \frac{1}{f}$$

Fázi tedy lze definovat jako úhlovou odchylku φ , při které kmitající částice dosahují v daném okamžiku hodnoty výchylky y .

Částice, které jsou kolem rovnovážné polohy, kmitají akustickou rychlostí v , která je derivací okamžité výchylky y :

$$v = \frac{dy}{dt} = \omega A \cos(\omega t - \varphi).$$

4.2 Akustický tlak

Prochází-li ultrazvuková vlna prostředím, vzniká v něm akustický tlak. Ten je způsoben tím, jak se postupně rozkmitávají sousední částice. Tyto částice však mají fázová zpoždění, která způsobují, že vznikají oblasti, v nichž se částice k sobě přibližují, tlak se zvětšuje. Kde se částice od sebe vzdalují, tlak se zmenšuje. Akustický tlak je úměrně závislý na akustické rychlosti v . Konstantou úměrnosti je akustická impedance, což lze vyjádřit vztahem:

$$p = zv,$$

kde z je akustická impedance ($\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$) a v akustická rychlost ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Obecně je mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí fázový posun, a proto bývá akustická impedance komplexní. Pouze v případě rovinné nebo kulové vlny v nekonečném prostředí je akustická měrná impedance a nazývá se akustickým vlnovým odporem. Ten je dán součinem:

$$z = \rho c,$$

kde ρ je hustota prostředí ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), c je rychlost ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Tato veličina charakterizuje prostředí. Poměr dvou ultrazvukových vlnových odporů sousedících prostředí má vliv na odraz průchodu ultrazvukových vln.

Při průchodu rovinné vlny s akustickou rychlostí prostředím s vlnovým odporem z , v něm vznikne akustický tlak:

$$p = P \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right),$$

kde P je amplituda akustického tlaku; $P = V \rho c$, V je amplituda akustické rychlosti; $V = \omega A$.

Při harmonickém kmitání lze zavést efektivní veličiny v ,

$$p_{ef} = \frac{P}{\sqrt{2}} \text{ a } v_{ef} = \frac{V}{\sqrt{2}}$$

Z hlediska zkoušení materiálu pomocí ultrazvukového vlnění je nejdůležitějším parametrem akustický tlak, protože elektrickému napětí je přímo úměrné akustickému tlaku. Toto napětí se přijímá pro vyhodnocení ultrazvukových vln [4].

Intenzita a výkon ultrazvukových vln

Intenzita I neboli výkon ultrazvukových vln na jednotku plochy S , je úměrná čtverci akustického tlaku nebo rychlosti.

$$I = p_{ef} \cdot v_{ef} = \frac{1}{2} P V = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho c} = \frac{1}{2} \rho v V^2 = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 A^2.$$

Výkon ultrazvukové vlny je tedy dán rovnicí:

$$P_v = I S = p_{ef} v_{ef} S.$$

Při nedestruktivním zkoušení materiálu se nejčastěji setkáme s intenzitou ultrazvukových vln do $10^{-3} \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$ [4], [7].

4.3 Druhy ultrazvukových vln

Během šíření ultrazvukové vlny prostředím se jeho částice rozkmitávají v různém směru vzhledem ke směru postupu vlny. Podle toho rozlišujeme druhy ultrazvukových vln.

4.3.1 Podélné vlny (L – longitudinální)

Při podélné vlně částice prostředí kmitají po přímkové dráze ve směru šíření vlny. V tomto pohybu se prostředí střídavě zhušťuje a zředuje. Tím vzniká střídavý tlak a tah. Během toho dochází i ke změně objemu prostředí. Podélné vlnění se může šířit v tuhém, kapalném i plynném prostředí.

4.3.2 Příčné vlny (T – transverzální)

V tomto vlnění se částice šíří prostředím přímočaře ve směru šíření vlny, a to pouze v jednom směru v rovině kolmé na směr šíření. Toto vlnění se šíří pouze v prostředí, které klade odpor namáhání ve smyku, to znamená v prostředí tuhém. V kapalinách a v plynech se příčné vlnění šířit nemůže. Pouze některé kapaliny nebo pasty s velkou viskozitou mohou příčné vlny přenášet.

4.3.3 Povrchové vlny (R – Rayleighovy)

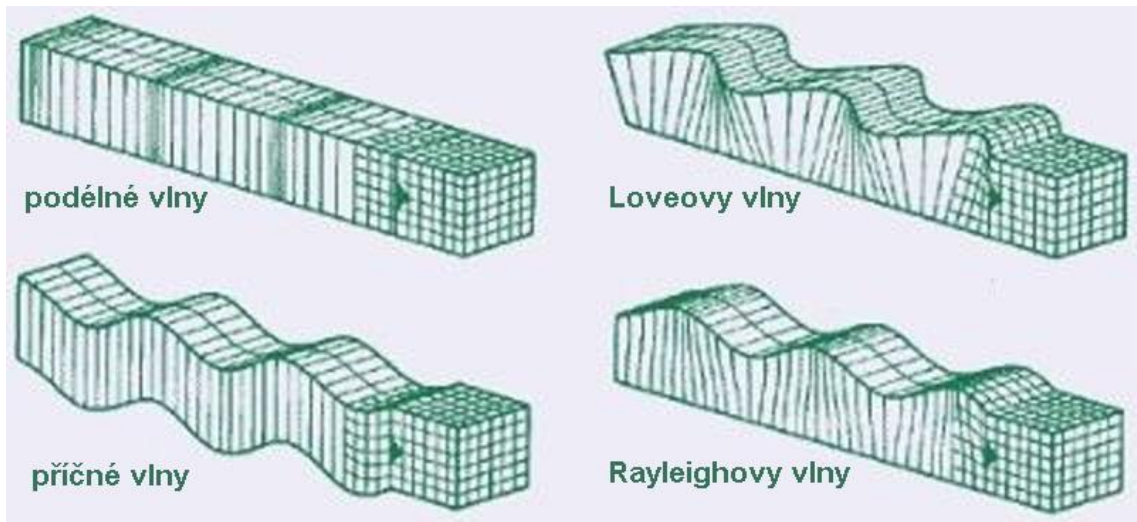
Jedná se o zvláštní příčné vlny. Při tomto vlnění jsou kmity složeny ze dvou vektorů, přičemž vektor kolmý na směr šíření (kolmý k povrchu) má mnohem větší velikost než vektor rovnoběžný s tímto směrem. Výsledný pohyb kmitů probíhá po velmi protáhlých elipsách, přičemž podélná složka vlny ubývá s hloubkou rychleji než složka příčná.

4.3.4 Deskové vlny (D – Lambovy)

V defektoskopii se tyto vlny používají ke zkouškám desek a drátů, a proto se podle použití nazývají vlny deskové nebo drátové. Vyskytují se ve dvou druzích, a to jako ohybové (asymetrické) a jako vlny dilatační (symetrické). V obou těchto případech částice kmitají po eliptických drahách v rovině kolmé k povrchu, a tedy i ke směru šíření. Poměr délek poloos elipsy závisí u obou druhů deskových vln na prostředí. Každá změna podmínek způsobuje odraz a útlum. A těchto vlastností se využívá v defektoskopii.

4.3.5 Loveovy vlny

Loveovy vlny jsou zvláštním typem povrchových vln, v nichž částice prostředí kmitají jen příčně, a to v rovině rovnoběžné s povrchem. [4],[7].



Obrázek 3 šíření se vln v prostoru [3]

4.4 Rychlost šíření ultrazvuku

Rychlost šíření ultrazvukových vln závisí na prostředí, které přímo omezuje možný průchod některých druhů vln, ale ovlivňuje i rychlost průchodu vln. My se zaměříme pouze na pevné látky, ve kterých budeme provádět defektoskopii. V těchto látkách se mohou šířit všechny druhy vln. Rychlost vln v neohraničeném prostředí lze vyjádřit vztahem:

u podélných vln:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)'}}$$

u příčných vln:

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

u povrchových vln:

$$c_R \approx \frac{0,8 + 1,12\mu}{1 + \mu} c_T,$$

Kde E je modul pružnosti v tahu (Pa), G modul pružnosti (Pa), ρ hustota prostředí ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), μ Poissonovo číslo neboli konstanta [4].

4.5 Interference vlnění

Při šíření ultrazvukových vln se vyskytují případy, kdy se vlny, dvě nebo i více, potkávají v jednom místě. Setkají-li se dvě ultrazvukové vlny v určitém bodě v

prostoru o stejné úhlové frekvenci, avšak o různé fázi bude amplituda výsledné vlny závislá na rozdílu fází obou dílčích vln [8].

4.6 Odraz a lom ultrazvukových vln

Šíření ultrazvukových vln ovlivňuje každé rozhraní, na němž vždy dochází k odrazu. Dopadá-li vlna na rozhraní pod jiným úhlem než 90° , dochází vždy k lomu. Každé z těchto prostředí má svoji charakteristiku, která je dána akustickými odpory $\rho_1 c_1$ a $\rho_2 c_2$. Jakmile dopadá vlna na rozhraní dvou prostředí, která jsou kolmá na směr šíření, část vlnění se odrazí a část bude pokračovat dále druhým prostředím.

4.6.1 Kolmý dopad na rozhraní

Při kolmém dopadu nedochází k lomu ultrazvukové vlny, ale pouze k odrazu a průchodu. To znamená, že část akustického tlaku p_1 se odrazí zpět do prostředí 1 a část tlaku p_2 projde do prostředí 2. Akustické tlaky odražených vln lze tedy zapsat následovně:

$$\begin{aligned} p &= \rho_1 c_1 v, \\ p_1 &= -\rho_1 c_1 v_1, \\ p_2 &= \rho_2 c_2 v_2, \end{aligned}$$

kde v , v_1 , v_2 je akustická rychlost ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), $\rho_1 c_1$, $\rho_2 c_2$ je akustický vlnový odpor ($\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$).

Na rozhraní prostředí 1 a 2 se akustický tlak a rychlost spočítají následovně:

$$\begin{aligned} p_2 &= p + p_1, \\ v_2 &= v + v_1. \end{aligned}$$

Poměr amplitud dopadajícího akustického tlaku a odražené vlny je dán činitelem odrazu.

$$R = \frac{P_1}{P} = \frac{1 - m}{1 + m}.$$

Část vlny, která projde do prostředí druhého, je dána činitelem průchodu

$$D = \frac{P_2}{P} = 1 + R = \frac{2}{1 + m}.$$

kde m je poměr akustických odporů prostředí 1 a 2; $m = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2}$, $\rho_1 c_1$ akustický odpor prostředí 1, $\rho_2 c_2$ akustický odpor prostředí 2, P , P_1 , P_2 amplitudy akustického tlaku dopadající, odražené a procházející vlny.

Mezi součinitelem odrazu R a průchodu D platí vztah:

$$D = 1 + R.$$

4.6.2 Šikmý dopad na rozhraní

Při šikmém dopadu ultrazvukové vlny na rozhraní dvou prostředí dochází k jejímu odrazu a lomu. Odražené a lomené vlny mohou být v tuhém prostředí obecně dvě, a to podélná a příčná. Tomuto jevu, kdy vzniká vlna jiného druhu než vlna dopadající, nazýváme transformací vlny. Úhly odražených a lomených vln pak závisí na úhlu dopadu a na rozhraní, to je definován jako poměr rychlostí šíření vln v obou prostředích. Tyto úhly lze vyjádřit Snellovým zákonem

$$\frac{\sin\alpha}{c_{L1}} = \frac{\sin\beta}{c_{T2}} = \frac{\sin\gamma}{c_{T1}} = \frac{\sin\delta}{c_{L2}}$$

kde c_{L1} , c_{T1} , popř. c_{L2} , c_{T2} jsou rychlosti šíření podélného a příčné vlny v prostředí 1, popř. 2.

Jestliže se při šikmém dopadu podélné vlny na rozhraní dvou prostředí nechá zvětšujícím se úhlem dopadu vymizet v druhém prostředí podélná vlna, pak úhel, který svírá dopadající podélná vlna s normálou v místě dopadu, se nazývá první kritický úhel

$$\sin \alpha_1 = \frac{c_{L1}}{c_{L2}}.$$

V tomto úhlu zůstává v prostředí druhá příčná vlna.

Nechá-li se zvětšujícím úhlem vymizet z prostředí druhá příčná vlna, pak se jedná o druhý kritický úhel

$$\sin \alpha_2 = \frac{c_{L1}}{c_{T2}}.$$

Při dalším zvětšování úhlu dopadu vzniká v prostředí druhá povrchová vlna, a to je třetí kritický úhel

$$\sin \alpha_3 = \frac{c_{L1}}{c_{R2}}.$$

Při překročení třetího kritického úhlu zůstává veškerá energie v prvním prostředí [4].

4.7 Ohyb ultrazvukových vln

Narazí-li ultrazvuková vlna na překážku, která je vzhledem k vlnové délce malá, pak na jejím okraji nastává jev, kterému říkáme ohyb vlnění. Mohou nastat dvě situace, a to když je rozměr překážky roven nebo menší jak vlnová délka, v tom případě nastává úplný ohyb. Jakmile je rozměr překážky velký, působí jako clona [7].

4.8 Útlum ultrazvukových vln

Jakmile prochází ultrazvuková vlna prostředím, je jím zeslabovaná v závislosti na akustických vlastnostech tohoto prostředí. Jinak řečeno, klesá energie vlny.

Příčinou tohoto poklesu je útlum vznikající v důsledku pohlcování a rozptylu ultrazvukových vln. Pohlcování je důsledkem vnitřního tření kmitajících částic. Mechanická energie kmitajících částic se při tom mění v teplo. Se stoupající frekvencí se zvyšují i ztráty pohlcováním. Ty jsou dále závislé na teplotě materiálu, ve kterém se vlna šíří. Rozptyl ultrazvukových vln vzniká v nehomogenních a polykrystalických prostředích. Jakmile ultrazvuková vlna dopadne na rozhraní nehomogenity dochází zde k odrazu, lomu a ohybu.

V defektoskopii se zaměřujeme především na útlum v tuhých látkách. Struktura tuhých látek je často nehomogenní, a proto je činitel útlumu α dán součtem dalších útlumů.

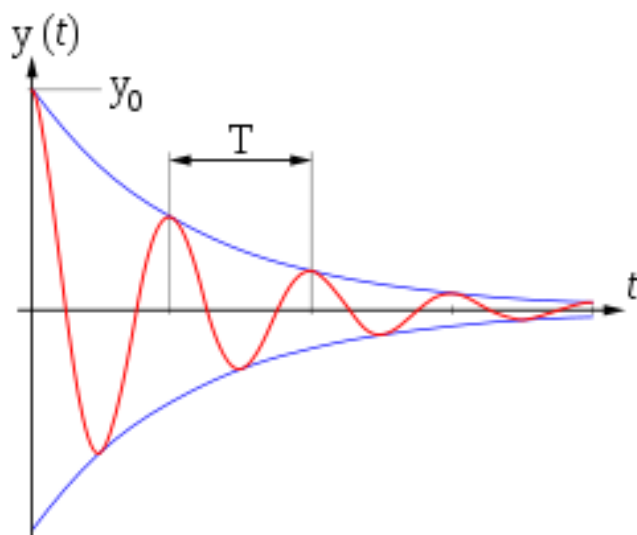
$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2,$$

kde α_1 je útlum pohlcováním, α_2 je útlum rozptylem. [7]

To znamená, že intenzita vlnění a amplituda kmitů se zmenšuje se vzdáleností od zdroje. Zmenšování amplitudy se vzdáleností nastává podle rovnice:

$$y_r = y_0 e^{-\alpha r}$$

kde y_0 je amplituda pro $r=0$ (m), α je činitel útlumu (m^{-1}), r je vzdálenost, nebo tloušťka tlumící vrstvy (m). [5]



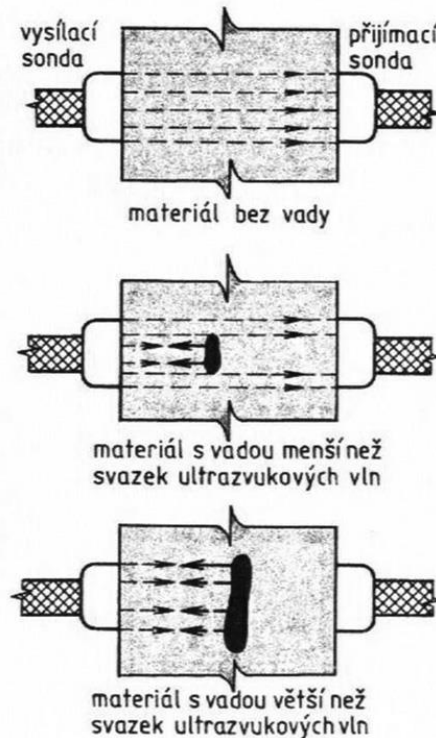
Obrázek 4 útlum vlny [4]

4.9 Metody ultrazvukové defektoskopie

Metody ultrazvukové defektoskopie se dělí na dva typy, a to na metodu průchodovou a metodu odrazovou.

4.9.1 Metoda průchodová

Průchodová metoda zkoušení je jedna z nejjednodušších metod zkoušení materiálu ultrazvukem. Tato metoda funguje na principu dvou souosých sond. První sonda je vysílací a druhá přijímací. Jakmile se mezi sondami objeví necelistvost materiálu nebo jiná vada, vzniká ultrazvukový stín, tj. akustický tlak ultrazvukové vlny se sníží. Metoda průchodová je porovnávací způsob měření. Pokud mezi vysílačem a přijímačem není žádná vada, přichází do přijímače určitý akustický tlak, ale pokud se mezi nimi nachází vada, tak tento tlak poklesne. Z toho vyplývá nevýhoda toho měření, že zkoušený materiál musí mít konstantní tloušťku. Další nevýhodou toho to měření je poměrně malá citlivost, která je ještě ovlivněna ohybem ultrazvukové vlny na vadách v závislosti na zkoušené tloušťce. Na druhou stranu, výhodou této metody je její jednoduchost a možnost využití jednoduchých měřících přístrojů [7], [5].



Obrázek 5 průchodová metoda [5]

4.9.2 Metoda odrazová

Tato metoda se dále dělí na další typy, a to na metodu impulsovou a rezonanční.

4.9.2.1 Metoda impulsová

Impulsová metoda je nejrozšířenější při nedestruktivním zkoušení materiálu ultrazvukem. Tato metoda je založena na principu průchodu zvukového impulsu zkoušeným materiálem. Tento impuls se na rozhraní dvou prostředí, jakmile narazí na vadu nebo na konec zkoušeného materiálu, odrazí a vrátí zpět. Přístroj registruje dobu průchodu impulsu tam a zpět, ale také pokles akustického tlaku. Ze zjištěných údajů lze zjistit nejen přítomnost vady ve zkoušeném materiálu, ale i její vzdálenost od povrchu. Do značné míry také lze posoudit její velikost a tvar.

Ultrazvukový impuls je do materiálu vyslán vysílačem a po odrazu je zase přijímán přijímačem. Jelikož je mezi vysláním a příjmem časový odstup, lze pro vysílač a přijímač použít jen jednu sondu. To lze provést u většiny zkoušených materiálů, pouze u materiálů, které mají příliš malou tloušťku stěn, a při kontrole svaru se používají dvě sondy. Z principu impulsové odrazové metody vyplývá i její použití:

- zjišťování vad ve zkoušeném materiálu nebo výrobku,
- měření vzdálenosti vad,
- měření tloušťky,
- měření útlumu,
- měření rychlosti šíření ultrazvuku v prostředí,
- zjišťování elastických konstant v prostředí,
- speciální měření.

4.9.2.2 Metoda rezonanční

Při rezonanční metodě se do zkoušeného předmětu vysílají ultrazvukové vlny, jejichž frekvence se plynule mění. Když se tloušťka předmětu rovná celistvému násobku poloviční vlnové délky vyslaného ultrazvukového vlnění, vznikne v předmětu stojaté vlnění. Při stojaté vlně vysílač dodává minimální energii do kontrolovaného předmětu. V tomto kontrolovaném předmětu se stojaté vlnění dostává do vlastní rezonance, a to buď na základní, nebo na nějaké vyšší harmonické frekvenci:

$$d = n \frac{\lambda}{2} = n \frac{c}{2f},$$

kde d je tloušťka materiálu (m), n je harmonická frekvence.

Rezonanční metoda je určena pro měření tloušťek stěn zhruba od 0,1 do 100 mm, lze ji použít pro zjišťování některých vhodně orientovaných vad, které jsou rovnoběžné s povrchem. Tyto vady se nejčastěji objevují u zdvojených plechů. U této metody stačí přístup pouze k jedné straně [7], [5].

4.9.3 Metoda Phased Array

Tato metoda se liší od ostatních tím, že se ultrazvuková sonda skládá z vícero piezoelektrických měničů, které pracují nezávisle na sobě. To znamená, že každý samostatný měnič, nezávisle na ostatních, vysílá i přijímá ultrazvukový impuls. Současné ultrazvukové sondy Phased Array se mohou skládat až z 256 takových měničů. Uspořádání měničů může být různé. Nejčastěji se vyrábějí sondy s lineárním uspořádáním elementů. Tvar a uspořádání jednotlivých měničů výrazně ovlivňuje možnosti řízení ultrazvukového svazku paprsků.

Jednotlivé měniče sondy jsou buzené elektrickými impulzy s různým časovým zpožděním. Čímž získáváme sondu s variabilním svazkem ultrazvukových vln. Řízením časového opoždění příchodu elektrických impulzů do jednotlivých elementů dokáže modifikovat tvar a směr šířícího se svazku ultrazvukových vln a tím simulovat pohyb sondy.

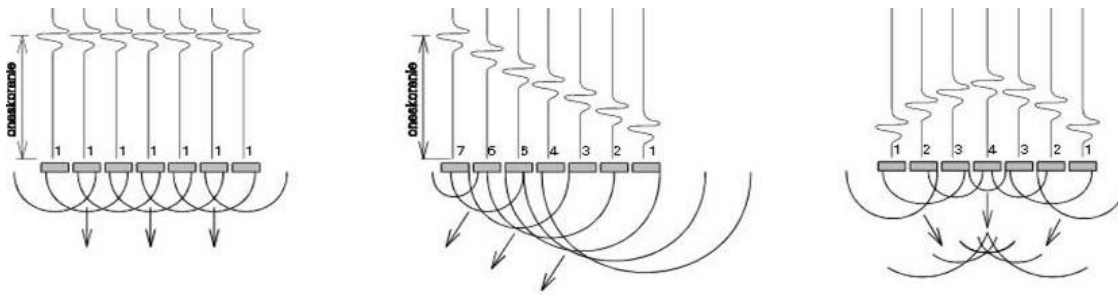
4.9.3.1 Typy skenování Phased Array

Ultrazvuková metoda Phased Array se skládá ze dvou základních typu skenování E-Scan a S-Scan. Obě tyto metody se liší v typu skenování.

E-Scan, nazývaný také jako lineární scan, spočívá v tom, že při určitém počtu měničů můžeme na vytvoření svazku ultrazvukových vln použít pouze určitý počet elementů. Postupným buzením elementů se bude svazek ultrazvukových vln elektronicky posouvat podél sondy.

S-Scan, neboli sektorový scan, funguje na principu změn časového opoždění budících impulzů pro jednotlivé elementy sondy. Tento typ scanu kontroluje daný sektor v určitém rozsahu úhlu. S-scan je závislý na tloušťce kontrolovaného

materiálu, protože tento typ scanu zobrazuje i indikace chyb zachycených odraženým svazkem ultrazvukových vln. [9], [2].



Obrázek 6 druhy šíření vln [2]

4.9.4 Metoda TOFD

Ultrazvuková metoda TOFD se používá převážně na zkoušení svarových spojů. Tato metoda na rozdíl od předchozích metod nehodnotí velikost echa, ale jeho „čas letu“, a proto TOFD není až tak závislá na kvalitě akustické vazby.

4.9.4.1 Princip kontroly svarových spojů

Při defektoskopii pomocí ultrazvukové metody TOFD se využívají dvě sondy, z toho je jedna vysílací a druhá přijímací. Na vytvoření obrazu při zkoumání chyb ve svaru se podílí tyto typy ultrazvukových vln:

- podélná vlna šířící se těsně pod povrchem,
- difrakční vlna šířící se z ostré hrany okrajů chyby,
- podélná vlna odražená od protilehlého povrchu,
- příčná vlna vznikající transformací podélné vlny,

Celý princip a schéma této metody jsou znázorněny na obrázku (7).

4.9.4.2 Matematický model TOFD

Metoda je založena na předpokladu, že chyba ve svarovém spoji bude přímo uprostřed mezi sondou přijímací a vysílací a zároveň bude kolmo orientovaná na povrch svarového spoje. Potom je možné pomocí Pythagorovy věty a doby letu jednotlivých ultrazvukových vln určit hloubkový rozměr chyby.

$$t_{LV} = \frac{2S}{c_L} = \frac{PCS}{c_L},$$

$$t_{HO} = \frac{2\sqrt{h_H^2 + S^2}}{c_L} \Rightarrow h_H = \sqrt{\left(t_{HO} \frac{c_L}{2}\right)^2 - S^2},$$

$$t_{DO} = \frac{2\sqrt{h_D^2 + S^2}}{c_L} \Rightarrow h_D = \sqrt{\left(t_{DO} \frac{c_L}{2}\right)^2 - S^2},$$

$$t_{OV} = \frac{2\sqrt{h_M^2 + S^2}}{c_L} \Rightarrow h_M = \sqrt{\left(t_{OV} \frac{c_L}{2}\right)^2 - S^2},$$

Kde t_{LV} je čas, za který přejde podélná vlna z vysílače do přijímače (s), t_{HO} je čas, za který přejde vlna přes horní okraj chyby z vysílače do přijímače (s), t_{DO} je čas, za který přejde vlna přes dolní okraj chyby z vysílače do přijímače (s), t_{OV} je čas, za který přejde odražená vlna z vysílače do přijímače (s), PCS je vzdálenost mezi referenčními body vysílače a přijímače (m), S je polovina vzdálenosti PCS (m), h_H je hloubkový rozměr horního okraje chyby (m), h_D je hloubkový rozměr dolního okraje chyby (m), h_M je tloušťka kontrolovaného materiálu (m) a c_L je rychlost šíření podélné ultrazvukové vlny (m.s⁻¹).

Při ultrazvukové metodě TOFD vznikají mrtvé zóny. Tyto zóny jsou způsobeny zejména při větších průřezích svarového spoje v jeho převýšení a kořenu. Mrtvé zóny závisí na frekvenci, velikosti ultrazvukového impulsu, nastavení vzdálenosti PCS , rychlosti šíření ultrazvukových vln v daném materiálu a na tloušťce daného materiálu.

4.9.4.3 Určení vzdálenosti PCS

Vzdálenost PCS se nastavuje tak, že je hloubka fokusace ultrazvukových vln h_F pod daným úhlem lomu γ , přibližně ve dvou třetinách z celkové tloušťky kontrolovaného materiálu h_M . Aby se vzdálenost PCS a souosost sond při měření náhodou nerozladily, používáme tzv. skener, ve kterém jsou sondy mechanicky upevněny.

$$PCS = 2S = 2h_F \operatorname{tg}(\gamma),$$

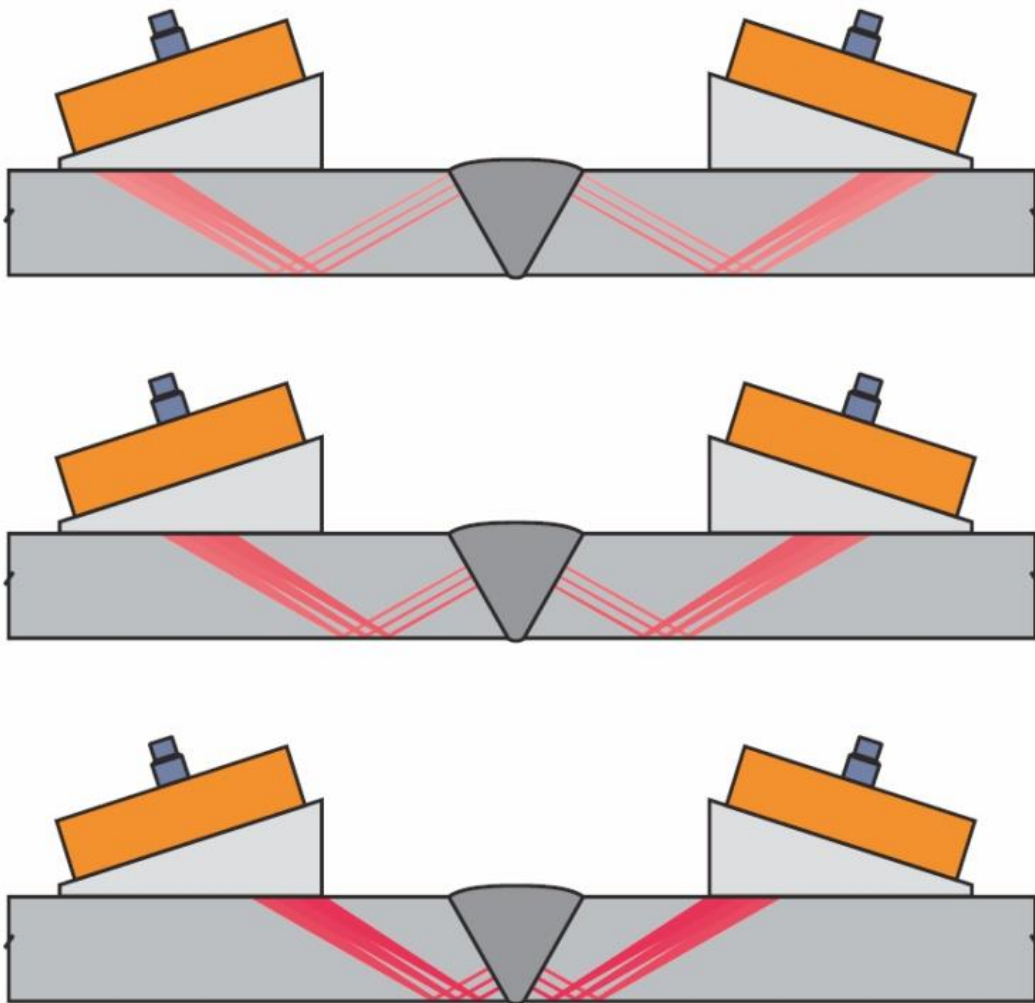
$$h_F = \frac{2}{3} h_M \Rightarrow PCS = \frac{4}{3} h_M \operatorname{tg}(\gamma),$$

kde PCS je vzdálenost mezi referenčními body vysílače a přijímače (m), S je polovina vzdálenosti PCS (m), H_F je hloubka fokusace ultrazvukových vln (m), h_M je tloušťka kontrolovaného materiálu (m), γ je úhel lomu ultrazvukových vln (°).

Při větších tloušťkách zkoušeného materiálu vzdálenost PCS spočítaná pomocí předchozího vzorce nemusí stačit na prozkoumání celého objemu svarového spoje. Tento problém se řeší tím, že se svár kontroluje vícekrát s různou vzdáleností PCS , nebo se použije více párů sond TOFD současně.

4.9.4.4 Rovnoběžné a nerovnoběžné skenování

U metody TOFD máme dva druhy zobrazení, a to A-Scan, kde vidíme jednotlivá echa, a B-Scan, kde vidíme samotné vlny. Zde rozlišujeme tzv. nerovnoběžné a rovnoběžné skenování vzhledem k vysílacímu ultrazvukovému paprsku. Při nerovnoběžném skenování jsou sondy TOFD v konstantní vzdálenosti a pohybují se podél svarového spoje. Při tomto skenování získáváme údaje o délce a o hloubkovém rozměru chyby [9], [2].



Obrázek 7 posun PCS [7]

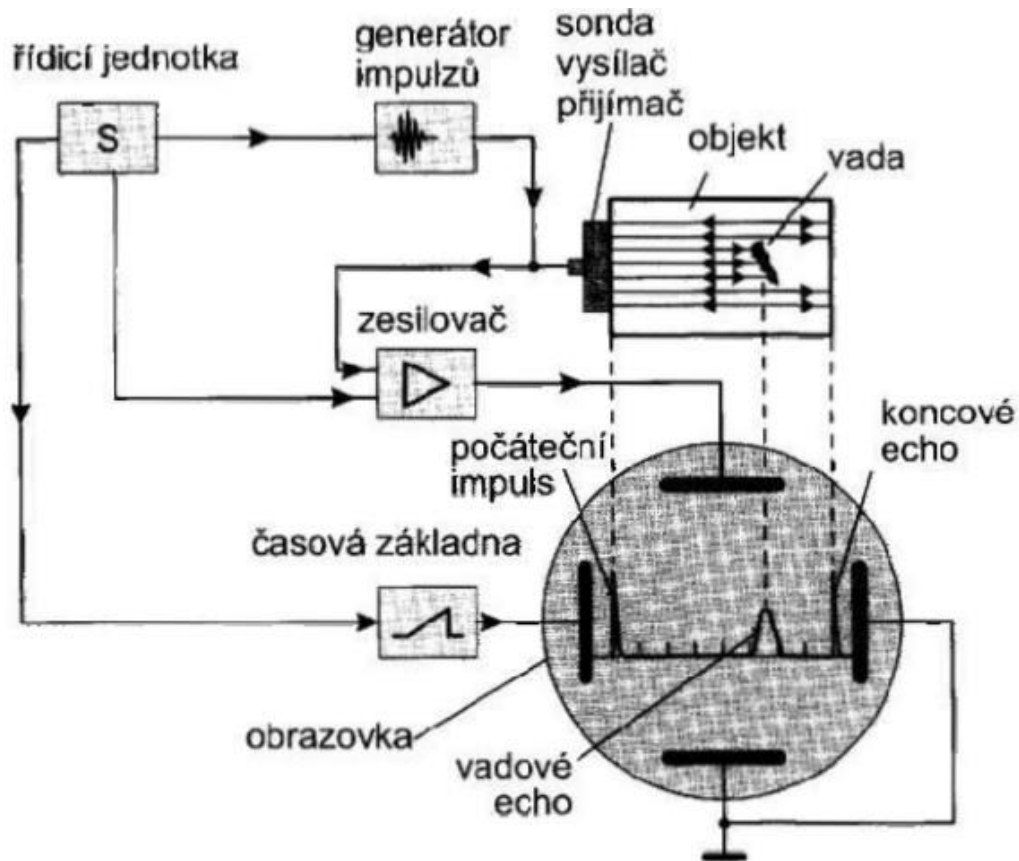
4.10 Popis principu a zařízení ultrazvukové defektoskopie

V následující kapitole si popíšeme princip ultrazvukové defektoskopie. Nejlépe to jde vidět na impulsové metodě.

4.10.1 Princip impulsového defektoskopu

Nejlépe lze vysvětlit princip na schématu ultrazvukového přístroje, který je na obrázku (8). V generátoru se vytváří impuls, který se po průchodu sondou mění na ultrazvukový impuls. Ten prochází zkoušeným materiálem a po nárazu na vadu, případně na konec zkoušeného materiálu, se odrazí a vrací se zpět do sondy, kde se opět mění na slabý elektrický signál. Tento signál putuje do zesilovače, kde se zvýrazní a zobrazí se na obrazovce. Celý tento proces se opakuje v rytmu v určité opakovací frekvence, podle které pracuje synchronizátor. Ten řídí spouštění všech součástí přístroje pomocí synchronizačních impulsů. Vyhodnocení vad je závislé na zpoždění odražených impulsů, které zpracovává osciloskop.

Na obrazovce se zobrazují zpravidla tři impulzy. Impulz vysílací, vadové echo a koncové echo. Vzdálenost vadového echa od vysílacího impulsu je úměrná hloubce vady pod zkoušeným povrchem, vzdálenost koncového echa tloušťce materiálu. Během trvání vysílacího impulsu nemůže sonda přijímat žádné odražené signály, není proto zkoušena podpovrchová vrstva, které se také říká mrtvé pásmo [7]. V dnešní době se používá pouze jeden přístroj, který nám zobrazí všechny echa a vypočítá potřebné vzdálenosti.



Obrázek 8 popis zařízení ultrazvukové zkoušky [2]

4.11 Popis jednotlivých částí

4.11.1 Sondy

Ultrazvukové sondy slouží k přeměně elektrické energie na energii mechanickou a naopak. Umožňují zavádět do materiálu energii ve formě vlnění a energii vlnění, která se odrazí od vady nebo okraje materiálu, naopak převést na energii elektrickou [7].

U nedestruktivních zkoušek se nejčastěji jako sondy používají piezoelektrické měniče. Kromě nich ale lze použít i magnetostrikční, elektrostatické a elektrodynamické měniče. S těmito měniči se však setkáme jen velice málo [4]. Sondy se vyrábí ve dvou provedeních, to jako sonda přímá (čelní) nebo jako sonda úhlová.

Čelní sondy jsou určeny na zkoušení výrobků, u kterých je přímý nebo dostatečně rovný povrch na přiložení sondy. S čelními sondami se dají hledat zdvojeniny v plechu, ale ne trhliny orientované kolmo na povrch. Touto sondou nelze ani testovat svary.



Obrázek 9 přímá sonda Foto F. Lukášek

Úhlové sondy obsahují plexisklový klín, takže jeho dosedací plocha tvoří se skutečným povrchem akustické rozhraní. Na tomto rozhraní nastává lom. U běžných úhlových sond dopadá podélná vlna z měniče pod úhlem větším, než je první kritický úhel, proto se materiálem šíří pouze vlna příčná. Úhlové sondy se proto vyrábějí pro úhly větší jak 35° pro ocel, nejčastěji se však vyrábí s úhlem 45° , 60° a 70° . Především prvního kritického úhlu se využívá pro sondy, které používají tzv. creepové vlny (tento typ vlny je v podstatě podpovrchová podélná vlna, která se šíří podélně po vnitřní straně povrchu testovaného dílu. Signál vnitřní creepové vlny je možno považovat za „ukazatel“ protože její výskyt poskytuje důkaz o existenci vnitřních souvislých trhlin) [2].



Obrázek 10 úhlová ultrazvuková sonda Foto F. Lukášek

Oba typy sond mohou být vyrobeny jako jedno-měníčová nebo dvoj-měníčová. U dvojité sondy je jeden měnič určen pouze pro vysílání vln a druhý pro jejich přijímání. Oba tyto měniče jsou uloženy v jednom pouzdře, avšak jsou odděleny izolačním děličem. Výhodou tohoto uspořádání je teoreticky nulové mrtvé pásmo.

4.11.1.1 Piezoelektrické měniče

Piezoelektrický měnič je destička z piezoelektrické látky. Tato látka se skládá z domén uspořádaných tak, že jejich negativní a pozitivní ionty tvořící krystalovou mřížku se při deformaci posunou tak, že každá doména získá elektrický dipólový moment. Na celém piezoelektrickém materiálu vznikne náboj. Tohoto jevu se v ultrazvukové defektoskopii využívá při příjmu ultrazvukových vln. Elektrické napětí je přímo úměrné tlaku na piezoelektrický materiál. Jakmile se tento proces otočí, vznikají v útrobách látky ultrazvukové vlny rovněž, v přímé úměrnosti na napětí [4], [6].

4.11.1.2 Magnetostrikční měniče

Magnetostrikční nazýváme změnu rozměrů feromagnetických látek vyvolanou magnetizací. Feromagnetický materiál mění působení magnetického pole. To znamená, že tyč z feromagnetického materiálu se ve směru magnetického pole prodlouží nebo zkrátí podle druhu materiálu a podle intenzity magnetického pole. Magnetostrikční měnič slouží většinou jako výkonný průmyslový zdroj ultrazvukových vln, v defektoskopii se používá především ke zkouškám betonu [5].

5 Zkoušky prozařováním

Zkoušky materiálů prozařováním neboli radiologické zkoušky jsou nedílnou součástí nedestruktivních zkoušek materiálů a výrobků, zejména u svarů a odlitků. Při těchto zkouškách se používají jen dva druhy záření, a to Röntgenovo a gama záření. Jako zdroje pronikavého záření slouží rentgeny, betatrony (lineární urychlovače) a radioizotopy [1].

Radiologické zkoušky tedy našly velké využití zejména ve slévárenství, ve svařování, různých hutních provozech, stavebnictví a v oboru plastických hmot. Podle použitého druhu zdroje pronikavého záření a podle registrace obrazu zkoušeného výrobku dělíme radiologické metody na:

- A. Metody radiografické – zahrnují zkoušky registrující obraz zkoušeného materiálu na fotografický film; jsou to:
 - a. rentgenografie,
 - b. betatronografie,
 - c. gamagrafie,
 - d. zvláštní radiografické metody.
- B. Metody radioskopické – zahrnují zkoušky zviditelňující obraz zkoušeného materiálu na fluorescenčním stínítku rentgenoskopie
- C. Metoda ionizační – spočívá v registraci prošlé intenzity záření zkoušeného materiálu indikátorem záření, založeným na principu ionizace

5.1 Charakteristika záření

Zářením obecně rozumíme šíření energie prostorem. Nositeli záření mohou být hmotné částice. V takovém případě mluvíme o korpuskulárním záření. V případě, že nositelem záření není hmotná částice, jde o záření elektromagnetické. Některé druhy záření vnikají v přírodě samy, jako například radioaktivní záření. Jiné druhy, například rentgenové záření, se musí získávat uměle.

V oboru defektoskopie využíváme pouze záření elektromagnetické, a to především gama záření a rentgenové záření. Elektromagnetické záření není nositelem hmoty a ani náboje, liší se pouze ve vlnové délce a způsobu vzniku.

Základní vlastnosti rentgenového a gama záření

Veškeré látky se skládají z atomů, jejichž rozměry jsou řádově okolo 10^{-10} m a jsou rozloženy v určitých vzdálenostech od sebe. Atomy však nevyplňují veškerý prostor

jimi vymezený. Jsou složeny z jader a elektronů obíhajících v různých energetických vzdálenostech kolem tohoto jádra. Každé materiální prostředí si tedy lze představit jako prostor vyplněný jen z malé části.

Dopadne-li na látku záření o vlnové délce podobné viditelnému světlu, bude se chovat jinak, než když na něj dopadne rentgenové záření, které má podobnou nebo ještě menší vlnovou délku než velikost atomu [1], [7].

5.2 Odraz a lom

Lom rentgenových paprsků se značně liší od lomu viditelného světla a za obvyklých podmínek jej ani nepozorujeme

Odraz rentgenových paprsků neexistuje, protože i sebedokonaleji vyleštěná plocha je pro toto záření drsná, a proto se tyto paprsky od látek neodráží. Úplný odraz nastává u rentgenových paprsků při mezním úhlu blížícím se k 90° , tj. jen tehdy, dopadne-li rentgenový paprsek téměř rovnoběžně na povrch tělesa.

5.3 Ohyb (difrakce)

Rentgenové záření má příliš malou vlnovou délku, a proto neexistují umělé difrakční mřížky příliš hrubé. Avšak v přírodě existují takové mřížky, které umožňují difrakci. Toho se využívá při zkoumání mikrokrystalické struktury materiálu a při rentgenové spektroskopii.

5.4 Rozptyl

Rentgenové paprsky se při dopadu na jakékoliv těleso rozptylují, jejich rozptyl na povrchu tělesa je však jen částečný. Většina paprsků proniká do materiálu, kde dochází k dalšímu rozptylu.

5.5 Ionizace

Dopadající rentgenové paprsky uvolňují z atomu elektrony. Tento atom po odštěpení elektronů přestává být neutrální, a protože převažují kladně nabitá jádra, vznikají ionty. Tento jev se nazývá ionizace.

5.6 Fluorescence

Fluorescencí se rozumí jev, při kterém fluoreskující látka absorbuje záření s větší energií a zároveň se stává zdrojem záření s nižší energií. Dopadající záření může vyvolat dva typy fluorescence:

- fluorescenci rentgenovou, která při dopadu rentgenového záření na látku vyvolá v této látce rentgenové záření,

- fluorescenci viditelnou, která umožňuje zachytit neviditelný rentgenový obraz a učinit jej viditelným.

5.7 Rentgenové záření

V roce 1895 W. C. Röntgen objevil dosud neznámé neviditelné paprsky, které nazval paprsky X. Schopnosti těchto paprsků prostupovat látkami se nejdříve využívalo ve zdravotnictví. Kolem roku 1915 se začalo využívat rentgenové záření v průmyslu. Postupem času se zdroje rentgenového záření zdokonalovaly a zvyšoval se jejich výkon [6].

Rentgenové paprsky mají stejný charakter jako například viditelné světlo, radiové vlny a spousta dalších. Všechna tato záření jsou elektromagnetické povahy a navzájem se liší pouze vlnovou délkou λ . Různé vlnové délky určují i to jaké vlastnosti ono záření bude mít. Pro nedestruktivní zkoušky se používá rentgenové záření o vlnové délce v rozmezí od $3,1 \cdot 10^{-10}$ do $6 \cdot 10^{-13}$ m. Rentgenové paprsky a jiné elektromagnetické záření se šíří rychlostí $2,99\,792\,458 \cdot 10^8$ m/s což je rychlost světla, kterou značíme c .

Každé záření se šíří vlnitým pohybem. Pro každý periodický kmitavý pohyb je důležitá frekvence, která se značí písmenem f . Frekvence f nezávisí na prostředí, ve kterém se vlna šíří. Tuto frekvenci vypočítáme:

$$f = \frac{c}{\lambda},$$

kde c je rychlost světla, která je konstantní a λ je vlnová délka záření, která je také konstantní

Další důležitou vlastností je doba kmitu neboli perioda T ; výpočet této periody je již popsán v první kapitole [1].

5.7.1 Závislost změny intenzity ionizujícího záření

Intenzita záření se vzdáleností od zdroje záření klesá se čtvercem vzdálenosti. V praxi to znamená, že při dvojnásobném zvětšení vzdálenosti od zdroje k detektoru záření, poklesne intenzita záření čtyřikrát a naopak [2].

5.7.2 Vznik rentgenového záření

Rentgenové záření vzniká prudkým zabrzděním rychle se pohybujících elektronů na terčíku anody rentgenky, kdy se převážná část kinetické energie elektronu přemění na teplo a jen asi 1 % se přemění na rentgenové záření.

5.7.3 Rentgenka

Rentgenkou rozumíme technické zařízení, pomocí kterého získáváme rentgenové záření o požadované energii.

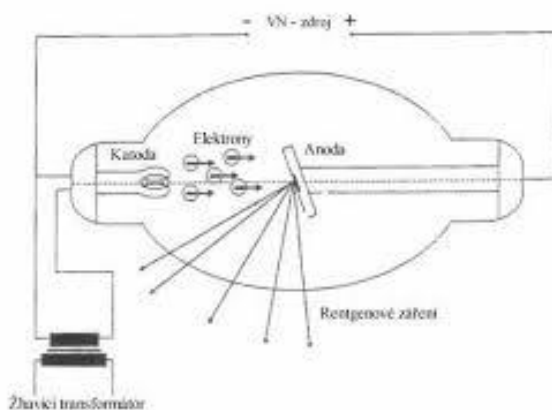
5.7.3.1 Princip rentgenky

Rozžhavená wolframová spirála katody produkuje pomocí termoemise elektrony. Ty jsou urychlovány mezi katodou a anodou k těmto elektrodám přivedeným vysokým napětím. Elektrony dopadají na wolframový terčík umístěný na anodě. Jelikož se většina energie přemění na teplo, je nutné anodu chladit, a proto je obvykle vyrobena z mědi. Popsané zařízení je umístěné ve skleněné trubičce, ve které je vysoké vakuum [7].

Energie dopadajících elektronů se rozděluje, jak již bylo zmíněno, na energii záření ε a na další formy energií W_i (nejčastěji na teplo). Abychom zjistili, jak se energie přeměnila, použijeme tento vztah [5]:

$$eU = \varepsilon + W_i = hf + W_i = \frac{hc}{\lambda} + W_i,$$

kde h je Planckova konstanta (J.s), c je rychlost světla (m.s⁻¹), f je frekvence záření (Hz) a λ je vlnová délka (m).



Obrázek 11 schéma a princip rentgenky [2]

Protože energie rentgenového záření závisí na provozním vysokém napětí rentgenky, budeme jako jednotku energie používat elektronvolt (eV). Aby se například dosáhlo hraniční energie rentgenového záření, je potřeba energie o velikosti 200 keV, musí tedy být mezi katodou a anodou napětí 200 kV. Spektrum brzděného spojitého záření se může měnit dvěma způsoby:

- zvýšením žhavicího proudu rentgenky, čímž zvýšíme četnost emitovaných elektronů, a to způsobí, že za jednotku času vznikne více fotonů. Přičemž hraniční energie zůstane nezměněná,
- zvýšením vysokého napětí na rentgence, čímž se zvýší i maximální energie. Současně se však zvětší počet elektronů, takže se i zvýší dávka záření.

Každý rentgenový přístroj, který je používán v průmyslu, je vybaven ovládáním umožňujícím nastavit potřebnou hodnotu energie, proudu a expozičního času.

5.8 Gama záření

Záření gama, nebo také radioaktivní záření, bylo objeveno roku 1896 Becquerelem. Využití tohoto záření v průmyslu však zbrzdila vysoká pořizovací cena radioaktivních látek. Teprve mezi lety 1920 – 1930 byla objevena umělá radioaktivita a tím začal rozmach tohoto záření v praxi.

Záření gama vzniká při přeměně jader radioaktivních prvků, tedy u jader, která jsou nestabilní. Dochází k jejich samovolnému rozpadu na emise částice ionizujícího záření. Při emisi nabitých částic je nově vzniklé jádro v excitovaném stavu. Rozdíl mezi energiemi excitovaného a základního stavu je vyzářen ve formě fotonů záření gama. Jelikož toto záření probíhá pouze při určité energii, má gama záření čárové spektrum.

V technické praxi se používají izotopy vyzařující převážně paprsky gama. Základní parametry určující kvalitu záření gama jsou energie, aktivita a poločas rozpadu.

Izotopy jsou nuklidy téhož chemického prvku se stejným počtem protonů, ale různým počtem neutronů v jádře atomu [1], [7].

5.8.1 Základní vlastnosti gama záření

Záření gama je popsáno několika veličinami, které jsou podrobněji rozebrány v následujících kapitolách.

5.8.1.1 Aktivní radioaktivita

Aktivita radioaktivního zářiče A (Bq) je podíl středního počtu radioaktivních přeměn ΔN a časového intervalu Δt , v němž došlo k těmto přeměnám [7].

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t}.$$

Jednotka aktivity je 1 Bq (becquerel), tedy aktivita radioaktivní látky, v němž nastává 1 jaderná přeměna (rozpad) za jednu sekundu ($1Bq = \frac{1}{s} = s^{-1}$).

5.8.1.2 Rozpadová konstanta

Přeměnová konstanta λ je definována jako konstanta úměrnosti mezi časovým úbytkem počtu atomů daného izotopu dN/dt způsobeným samovolnou přeměnou a celkovým počtem atomů dosud radioaktivně nepřeměněných. Jinými slovy, přeměnová konstanta λ je měrná veličina aktivity A daného prvku v závislosti na čase t :

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t},$$

kde A_0 je počáteční aktivita v čase t_0 (Bq), A_t je aktivita v čase t (Bq), e je základ přirozeného logaritmu, λ je přeměnová konstanta (s^{-1}) a t je čas (s) [].

5.8.1.3 Poločas přeměny

Poločas přeměny zářiče je charakterizován dobou, během které se přemění polovina atomů z původního počtu. Tato doba je charakterizovaná zářičem. Stanovení poločasu přeměny plyne ze zákona, dosadíme-li za $N = \frac{N_0}{2}$:

$$N = N_0 e^{-\lambda T} \Rightarrow T = \frac{\ln 2}{\lambda} = 0, \frac{693}{\lambda},$$

kde N_0 je počet nepřeměněných atomů v čase $t=0$ (s), N je počet nepřeměněných atomů v čase t (s), e je základ přirozeného logaritmu, T je poločas přeměny (s) a λ je přeměnová konstanta (s^{-1}) [7].

5.8.1.4 Přirozená radioaktivita

Radioaktivní přeměna nestabilních těžkých prvků se děje tak, že prvek se mění na jiný nestabilní, ten se mění zase na další nestabilní prvek, dokud se nepřemění na stabilní. A takto vzniká přeměnová řada. V přírodě jsou tři přirozené řady přeměn prvků. A to uran-radiová, trhoriová a aktinová.

Řada přeměn uran-radiová začíná radioaktivním uranem ${}^{238}_{92}U$ a končí stabilním olovem ${}^{206}_{82}Pb$. Tato řada má celkem 17 přeměn.

Podobně i přeměnové řada thoriová. Ta začíná radioaktivním isotopem thoria ${}^{232}_{90}Th$ a končí stabilním neradioaktivním isotopem olova ${}^{208}_{82}Pb$. Řada thoriová má celkem 12 přeměnových členů.

Poslední z přirozených radioaktivních přeměn je řada aktiová, která má celkem 14 členů, začíná isotopem uranu ${}^{235}_{92}U$ a končí stabilním neradioaktivním isotopem olova ${}^{207}_{82}Pb$ [1].

5.8.1.5 Umělé radioaktivita

V roce 1924 manželé Curieovi objevili umělou radioaktivitu. Zjistili, že ostřelováním hliníku $^{27}_{13}\text{Al}$ částicemi α vzniká nový v přírodě neexistující nuklid fosforu $^{30}_{15}\text{P}$ a neutron, tento nuklid fosforu má poločas rozpadu pouze 130 sekund a přeměnu β^+ přechází na stabilní isotop $^{30}_{14}\text{Si}$.

V současné době se uměle radionuklidy připravují průmyslově ostřelováním atomových jader nabitými částicemi z urychlovače nebo neutrony z jaderných reakcí.

5.8.2 Zařízení pro izotopový zářič

Izotopový zdroj gama záření, na rozdíl od rentgenky, vysílá záření neustále. Proto musí být neustále uchováván v ochranném krytu, který musí konstrukcí a stíněním vyhovovat podmínkám druhu aktivního zářiče. Nejčastějším materiálem pro výrobu krytů bývá olovo, slitina wolframu a uranu apod.

S rostoucím používáním těchto zářičů v nedestruktivních zkouškách vznikly i různé druhy krytů doplněných manipulačními zařízeními, s různými ovládacími mechanismy pro ovládaní na dálku, jako je například mechanický kryt gammavolt [5].



Obrázek 12 zdroj záření gama Foto F. Lukášek

5.8.3 Interakce záření s hmotou

Na interakce záření s hmotou můžeme pohlížet dvěma pohledy. Buď z pohledu částice, nebo vlna, který prochází hmotou a tím získává informace o testované objektu nebo z pohledu látky, kterou částice nebo vlna procházejí, tedy detekce záření.

Obě tyto problematiky spolu souvisí a využívá se jich při radiografii. Z mnoha skupin interakce je nejučelnější se zabývat pouze interakcí fotonů. Fotony procházející hmotou mohou interagovat jak s atomovými jádry, tak i s elektronovým obalem atomu. U zkoušek prozařováním se setkáváme především s fotoefektem, Comptonovým rozptylem a tvorbou páru elektronu.

5.8.3.1 Absorpce

Absorpcí rozumíme takové zeslabení záření, při němž jejich původní energie přechází na jiné formy. A to na energii uvolněných fotoelektronů, na tepelnou energii, energii záření, fotochemickou energii a energii elektrickou.

Některé druhy absorpce vznikají vždy, jako například fotoelektrický efekt a vznik tepla. Ostatní vznikají pouze za určitých podmínek [1].

- a) Fotoelektrický efekt vzniká tak, že pokud záření zasáhne elektron s nižší energií v atomovém plášti, dojde k jeho oddělení od elektronového obalu. Uvolněný elektron je většinou pohlčen vedlejším atomem a na jeho místo přeskočí elektron z vyšší energetické hladiny, čímž vzniká fotoelektron. Některé fotoelektrony vyletí rovnou z látky, jiné po cestě ven naráží na jiné atomy, což je zbrzdí a jejich energie se při tom mění na energii tepelnou, elektrickou, chemickou a na energii záření.
- b) Absorpce záření je vždy doprovázena vznikem tepla, ale množství tepla je tak malé, že je většinou nikdy nepozorujeme.
- c) Absorpcí primárních paprsků záření mohou vznikat dva typy fluorescenčního záření. Viditelné a rentgenové. Fluorescenční záření obojího typu vzniká pouze u určitých látek.
- d) Fotochemické účinky záření nastávají pouze ve zvláštních případech a závisí na chemickém složení zkoumané látky. Tohoto jevu se nicméně využívá právě pro radiografický film.
- e) Elektrické účinky záření nastávají tím, že energie fotonu absorbovaného látkou způsobuje u této látky ionizaci a zvětšuje její elektronickou vodivost.

5.8.3.2 Comptonův rozptyl

Foton záření gama nebo rentgenové záření při průchodu zkoušeným materiálem narazí na elektron, který uvolní z jeho dráhy. Přitom foton ztrácí určitou část své energie, změní směr pohybu a pokračuje dál jako rozptýlené záření o jiné vlnové délce. Nová vlnová délka se vypočítá pomocí vztahu [2]:

$$hf = hf' + E_k \Rightarrow f' = \frac{hf - E_k}{h},$$

kde h je Planckova konstanta (J.s), f je původní frekvence (Hz), f' je nová frekvence (Hz) a E_k je energie předaná elektronu (J).

Existuje i jiný mechanismus rozptylu. Foton narazí na elektronový obal a je odražen ze svého směru bez ztráty energie (Rayleighův rozptyl).

5.8.3.3 Tvorba párových elektronů

Vysokoenergetické záření proniká elektronovým obalem až do blízkosti atomového jádra. Pokud jeho energie přesahuje 1,02 MeV dochází k přeměně fotonu na elektron a pozitron. Pozitron je antičástice k elektronu. Po zpomalení řadou ionizačních procesů se anihiluje po setkání s některým z elektronů z prozařované látky [2].

5.8.4 Zákon zeslabení záření

Prochází-li záření o energii I hmotnou překážkou tloušťky dx , jeho intenzita se zmenší o část

$$\frac{dI}{I_0} = -\mu dx,$$

kde μ je lineární koeficient zeslabení, d je tloušťka stěny, I je intenzita primárního záření za výrobkem, I_0 je intenzita primárního záření na povrchu výrobku při stejné vzdálenosti detektoru záření.

Integrací této rovnice dostáváme výraz, z něhož lze stanovit hodnotu zeslabení intenzity záření

$$I = I_0 e^{-\mu x}.$$

Zákon zeslabení v této formě platí jenom pro monoenergetické záření.

Použitím tohoto zákona lze vypočítat intenzitu za každou libovolnou tloušťkou stěny. Rozptýlené záření se do výpočtu v tomto případě nezahrnuje

Pro rentgenové záření je zeslabovací zákon rozšířený o tzv. vzrůstový faktor B , který v praxi stanoví změření na detektoru s širším svazkem záření, tedy včetně rozptýleného záření. Zákon zeslabení má tvar:

$$I = I_0 B e^{-\mu x}.$$

Lineární koeficient zeslabení μ závisí na vlastnostech hmoty, kterou záření prochází a na vlastnostech záření. Koeficient zeslabení je výsledkem interakce záření s prostředím a jeho rozdělení na tři složky:

$$\mu = \tau + \sigma + k,$$

kde τ je koeficient absorpce, σ je koeficient rozptylu a k je koeficient tvorby elektronových páru [2], [5].

5.9 Postup při rentgenové zkoušce

V následující kapitole si přiblížíme prakticky a krok po kroku postup při zkoušce rentgenovým zářením. Zkoušku jsem prováděl na součásti, která je vidět na obrázku (obr.13). Tato součást se skládá ze 3 částí, které jsou svařené k sobě. Naším úkolem je zjistit, zda ve sváru nejsou póry, studené spoje, neprovařený kořen, podélná trhlinka, struskový vměstek a nečistosti. Ze snímku jsme schopni určit výšku sváru. Dále zkoumáme pásmo kolem sváru, které by mělo mít z každé strany šířku alespoň 1 cm.

To zkoumáme kvůli možnému vzniku poruchy materiálu vlivem vysokých teplot nebo vzniku pnutí.

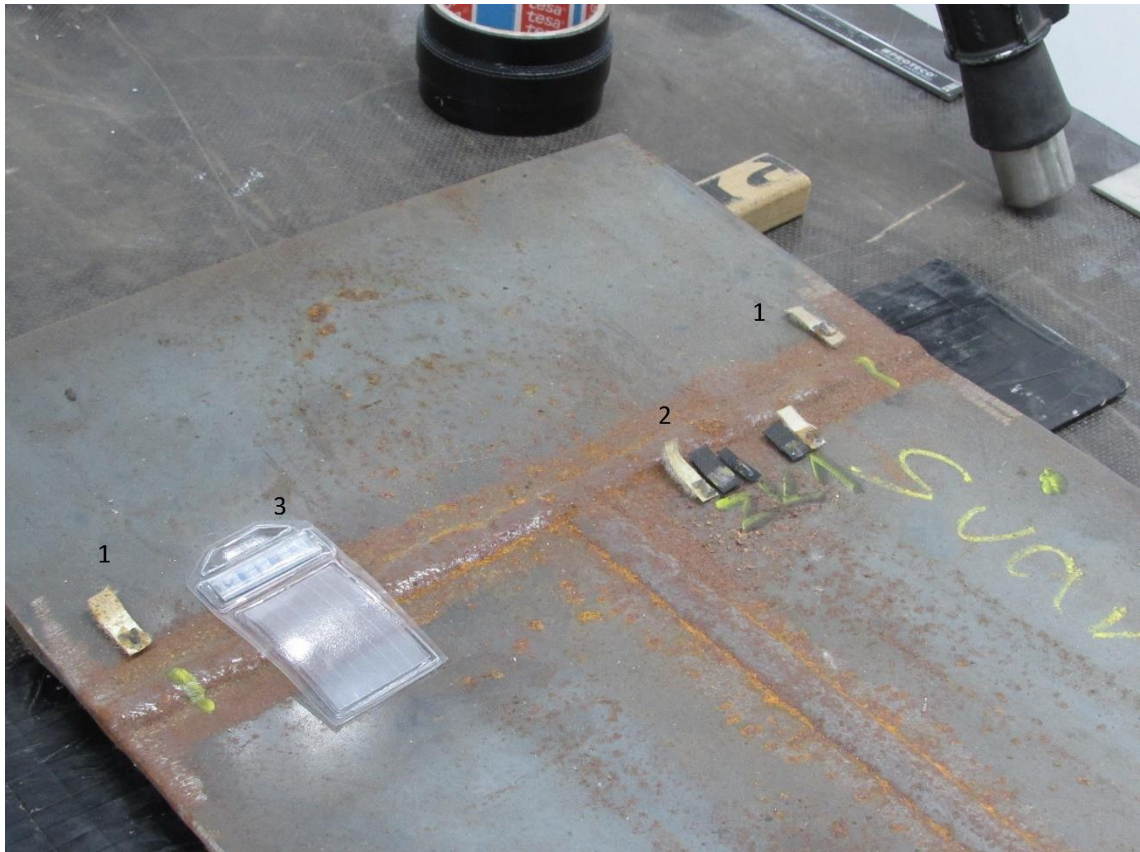
5.9.1 Průběh zkoušky

Nejprve ze zkoušené součásti odstraníme povrchové nečistoty, které by mohly způsobit chyby při vyhodnocování. U naší zkoušené součásti to je zbavení se zbytku strusky, rozstříku svarového kovu a jiných mechanických nečistot.

Jakmile odstraníme veškeré nečistoty, následuje vizuální kontrola povrchových vad. Poté zkoušenou součást musíme podle určitých pravidel označit. Toto označení se provádí pomocí olověných písmen, číslic a znaků (např. trojúhelníky). Dalším důležitým označením je radiografická měrka. Vše je znázorněno na obr. 14.



Obrázek 13 svářená součást, která se bude zkoušet Foto F. Lukášek



Obrázek 14 označení součásti 1-vymezení prostoru pro kontrolu, 2- označení součásti a 3- radiografické měrky Foto F. Lukášek



Obrázek 15 drátové měrky Foto F. Lukášek

5.9.2 Radiografická měrka

Radiogram, na jehož základě se hodnotí kvalita zkoušeného sváru, musí být pořízený za určitých předepsaných podmínek prozařování. Jednou z podmínek je citlivost snímku, k čemuž nám slouží radiografické měrky, v našem případě drátové měrky na obr. 15. Tato měrka se při kontrole sváru umísťuje napříč svárem ze strany zářiče a identifikační značka nesmí ležet v hodnocené oblasti.

Příklad označení měrky na radiogramu: 13 FE EN.

Význam značky:

13 je číslo nejslabšího drátku,

FE je materiál měrky,

EN je evropská norma,

Vztah mezi číslem drátku a jeho průměrem je uveden v normě ČSN EB 462-1.

Poté, co ve snímku vyčteme, kolikátý drátek vidíme, můžeme určit citlivost radiogramu pomocí příslušných tabulek, které jsou uvedeny v normách.

Následně se stanoví vzdálenost od ohniska f k filmu

$$f = a + b,$$

kde a je vzdálenost zdroje záření od předmětu a b je vzdálenost roviny filmu od povrchu předmětu.

Hodnota a se určí vztahem

$$a = k\varphi t^{2/3},$$

kde k je koeficient závislý na způsobu prozařování, kde pro způsob A $k=7,5$ a pro B $k=15$, φ je efektivní velikost ohniska zdroje záření (mm) a t je tloušťka prozařovaného materiálu (mm).

Způsob měření je rozdělován do dvou skupin [7]:

- A je běžný způsob prozařování pro Röntgenovo záření a záření gama,
- B je speciální způsob prozařování s ohledem na maximální zjistitelnost vad.

V praxi se nejčastěji hodnota a určuje z monogramu podle ČSN 01 5010 a platí pro způsob prozařování A a B.

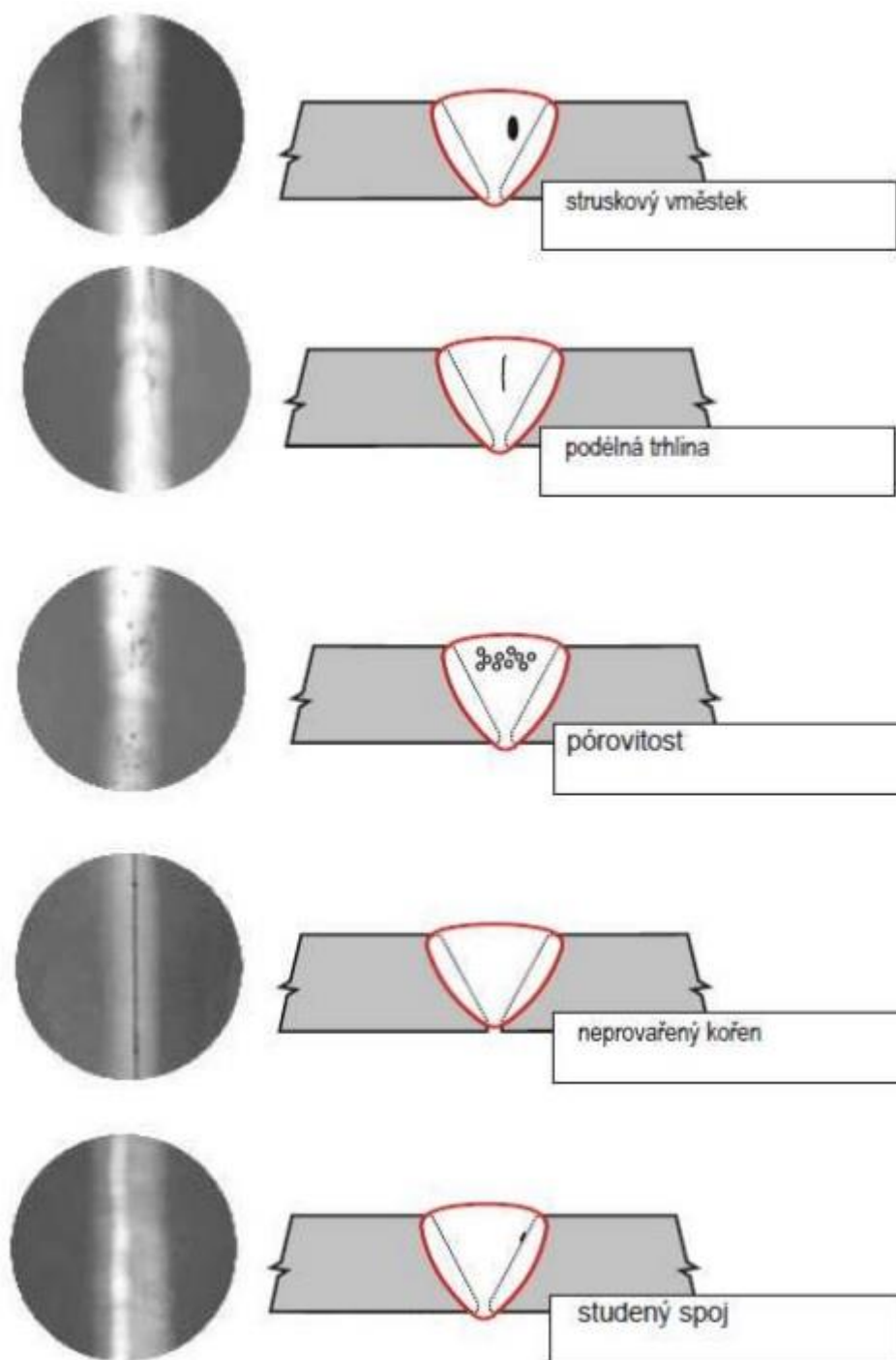
Dalším důležitým údajem je expoziční čas, který se dá určit několika způsoby:

- stanovení expoziční doby odhadem spojeným s kontrolní zkouškou,
- podle expozičních diagramů,
- výpočtem,
- výpočetní technikou.

Při svém měření jsem použil tabulku, která byla umístěna na přístroji, kde je vše spočítáno pro dané vzdálenosti a materiál. Tato tabulka vychází ze zkušeností a zkušebních zkoušek, které byly provedeny pracovníky této firmy.

Jakmile tyto úkony máme hotové a na elektronice nastavené hodnoty, pro náš vzorek je to ohnisková vzdálenost $f = 70$ mm, expoziční čas $t = 1$ minuta, aktivita $a = 125$ kV, zhotoví se snímek, který se následně vyvolá.

Vyvolaný snímek vložíme pod lampu. První, na co sledujeme, jsou drátové měrky, abychom zjistili, jestli jsou v požadované kvalitě. To zjistíme podle toho, kolik drátků vidíme. Následně hledáme chyby ve sváru. Na obr. 16. jsou znázorněny příklady vad tak, jak jsou vidět v radiogramu.



Obrázek 16 vady ve sváru [7]

5.9.3 Provedení zkoušky

Nejprve jsme si vzali součást, kterou budeme zkoumat. Jedná se o tutéž součást, která je popsána v kapitole výše. Tuto součást jsme očistili a zbavili všech nečistot. Následně si součást označíme a použijeme měрку 13 FE EN. Vyznačíme si oblast, kterou budeme zkoumat a jelikož součást byla svařovaná bez nájezdu, nebudeme zkoumat okraje sváru, protože by v nich s velkou pravděpodobností mohla

vzniknout některá z chyb. Dále si označíme název součásti, v našem případě je to ZK1. Dále se zkoumaná součást může označit dalšími značkami. Například číslo snímku, když se provádí více snímku jedné součásti, název nebo jen zkratka firmy, pro kterou se zkouška provádí a jiné značky, které si tam dává pracovník provádějící zkoušku.

Jakmile máme součást připravenou, umístíme pod ni film, na který se zachytí záření. V tomto kroku nesmíme zapomenout umístit kontrolní olověné písmeno i pod film, a to z důvodu, kdyby se záření odrazilo od stolu, abychom to zjistili a použili jinou podložku. Dalším krokem je buď vypočítat nebo v našem případě pouze změřením ohniskové vzdálenosti $f = 700$ mm, abychom mohli nastavit požadované hodnoty. Na metru sice máme hodnotu 690 mm, ale k této hodnotě musíme přičíst tloušťku zkoušeného materiálu, která je $d = 6$ mm, a musíme také přičíst 4 mm, to je vzdálenost filmu od dolní strany součástí. Film je zabalen do černé folie, aby k němu nemohlo projít viditelné světlo. V ideálním případě by měla součást ležet přímo na filmu, ale většinou dochází právě k poškození filmu a zkouška by se musela provádět znova. Jelikož se často provádí zkoušky v terénu a snímky se vyhodnocují až po příjezdu na firmu, je lepší mít jistotu nepoškození snímku, proto se tam dává malá vůle. Poté musíme opustit místnost nebo se alespoň dostatečně vzdálit, abychom nebyli zasaženi rentgenovým zářením. Nyní následuje nastavení hodnoty na elektronice. Z obr. 18 vidíme, že pro tloušťku 6 mm zkoumaného materiálu musíme nastavit výkon v rozmezí 125-130 kW. My jsme zvolili nižší hladinu, a to 125 kW. Dále je v tabulce vidět, že proud na katodě má být $I = 6$ mA. Posledním údajem, který musíme nastavit je expoziční čas, ten je pro naši zkoumanou součást $t = 1$ minuta.

Jakmile máme všechny potřebné hodnoty nastaveny můžeme, zmáčknout tlačítko start a pořídit snímek zkoumané součásti. Poté, co uběhne minuta, doba, kterou jsme nastavili jako expoziční čas, vejdemo do místnosti, kde byla prováděna zkouška a vezmeme si film. Nyní s filmem musíme přejít do takzvané černé místnosti, kde snímek vyvoláme. Nejprve film vyjmeme z kazety a následně se film namočí do vývojky, ta je kombinací více chemikálií, které v podstatě obsahují akcelerátory a redukční činidla. Akcelerátor odstraní ochranou vrstvu, pronikne želatinou a vytvoří zásaditý roztok vývojky. Redukční prostředky nejčastěji metol nebo hydrochion, reagují s filmem. Čas a teplotu (vývojky), které jsou nezbytné pro to, aby film měl dobrý kontrast, uvádí výrobce filmu. V našem případě byla teplota

20 °C a čas 5 minut. Tyto hodnoty jsou však závislé i na síle redukčního činidla. Poté následuje ustalovač, thiosíran sodný, a jeho funkcí je zprůhlednění části, která byla ozářena, a vytvrzení filmu. Poté film omyjeme ve vodě, v níž je saponát, abychom se zbavili všech chemických roztoků. Nyní následuje schnutí, které se provádí v sušičce. Nyní jsme snímek položili na lampu, kde jsme podle drátové měrky zjistili, že jsme splnili citlivost. Můžeme tedy zkoumat samotný svar. Na něm nejdou vidět žádné chyby.

Součást můžeme prohlásit za vyhovující. Tyto chyby se vyhodnocují podle jejich velikosti, počtu a podle toho, na co je součást určena.

Na obr. 23 je možné vidět sváry, které nejsou vyhovující, a je mnohem lépe vidět drátová měrka. Níže je přiložený vypracovaný protokol. Ke každé zkoušce, která splnila dané podmínky, se uchovává radiografický snímek.

5.10 Popis postup při ultrazvukovém měření

V našem případě budeme zkoumat hloubku a umístění vývrtu ve svaru. K této zkoušce jsme si vybrali úhlovou sondu 60 °.

5.10.1 Princip měření úhlovou sondou

Při konkrétním nastavením defektoskopu je možné určit vzdálenost jakékoliv vady v závislosti na časové prodlevě echa od signálu odraženého od vady. U starých přístrojů se odečítaly hodnoty a měřily vzdálenosti ech od sebe. Dále jsme museli nastavovat různé hodnoty pro zvolenou sondu na přístroji, jako je např. časová základna. U dnešních moderních přístrojů, které v sobě mají paměť a výpočetní techniku, si vybereme z předem uložených sond a následné samotné měření se zobrazuje v reálném čase na displayi. Veličiny nutné k výpočtu a jejich umístění jsou zobrazeny na následujícím obrázku.

Dalším krokem je příprava testovaného vzorku, ten musí být, jak v případě zkoušky prozařováním, zbaven všech nečistot. a následné měření

5.10.2 Postup měření

Jakmile máme vybranou součást sondu, v našem případě úhlovou 60 ° sondu, můžeme přejít k nastavení samotného přístroje. My jsem k měření použili ultrazvukový přístroj od firmy General Electonic, který je na obr. 25.

V následujících krocích si ukážeme krok po kroku zapojení a nastavení přístroje pro měření námi zvolenou 60 ° sondou.

Nejprve si samotný přístroj zapneme, protože přístroj se bude zhruba pět minut načítat. V té době k němu připojíme drát a zvolenou 60 ° sondu. Nyní můžeme přejít k samotnému nastavení přístroje.

- Vejdeme do listu sond abychom zjistili, pod jakým číslem máme sondu uloženou; nome -> listuj -> 2,
- nyní se vrátíme zpět na hlavní stránku, kde nastavíme sondu číslo 2,
- nastavíme tloušťku zkoumaného materiálu (vždy je lepší dávat větší tloušťku zkoumaného předmětu, aby došlo k prozvučení celé součásti a my našli veškeré vady)

Nyní přejdeme na samotné měření, při kterém máme za úkol zjistit, jak hluboká je díra, která je vyvrtaná ve sváru, a jaký má průměr. Dalším naším úkolem bude zkoumání celého sváru, jestli se vněm nenachází nějaké další vady.

Součást předtím, než ji budeme měřit, natřeme pojivem, například olejem nebo lepidlem na lepenku. To se provádí z důvodů, aby vlny lépe přešly ze sondy do testovaného materiálu.

5.10.3 Určení velikosti vývrtu

Nejprve přiložíme sondu na pravý roh zkoušeného materiálu a pomalu se přibližuje směrem ke svaru. Jakmile na obrazovce uvidíme první vadové echo, (echo, které přesahuje přes červenou čáru, kterou vidíme na obrazovce) vyznačíme si rysku a odečteme hodnotu Ra z obrazovky. Tato hodnota nám říká, jak daleko je vada před sondou. Poté co máme hodnotu zapsanou velice pomalu posouváme sondu dál ve stejném směru, jakmile se dostaneme do vzdálenosti, kde vadové echo mizí. Zde si vyznačíme další rysku a znovu opíšeme hodnotu Ra . Pro výpočet průměru vyvrtané vývrtu použijeme tento vzorec.

$$d = Ra_2 + s - Ra_1 = 31,73 + 0,5 + 27,32 = 4,91 \text{ mm},$$

kde Ra_1 je vzdálenost od sondy při prvním zachycení vývrtu (mm), Ra_2 je vzdálenost od sondy posledním zachycením vývrtu (mm), s je vzdálenost posutí sondy (mm) a d je průměr otvoru (mm).

Tímto měřením jsme zjistili, že průměr vyvrtané je $d=4,91$ mm, z čehož můžeme vysoudit, že se jedná o otvor velikosti průměru 5 mm. Nepřesnost měření nám tvoří 0,09 mm, to způsobilo, jak jsem se snažili vidět počáteční i koncové echo. Dále z přístroje můžeme vyčíst, jak je otvor vzdáleny od vrchní hrany testované součásti, což nám označuje hodnota, která je na displai pod názvem „PŘED-DR“. Zde můžeme

vidět, že je otvor vzdálený od vrchní hrany 5,738 mm. Toto měření je pouze orientační a sloužilo jako příklad použití ultrazvukové zkoušky.

Výsledek měření průměru vývrtnu je $d = 5$ mm a hloubka vývrtnu je 5,738.

5.10.4 Určení hloubky vývrtnu

Při určování hloubky vývrtnu postupujeme velmi podobně jako v předchozím případě. Nejprve najdeme echo vývrtnu. A poté ho posouváme sondou podél sváru velmi pomalu. Poté, co echo zmizí, přiložíme svinovací metr na hranu součásti a změříme, jak daleko je sonda od kraje. U sondy bereme středovou osu jako místo, odkud vychází ultrazvuková vlna. V našem měření jsme zjistili, že otvor je hluboký přibližně 20 mm. Toto měření je opět pouze orientační a pro naše účely dostačující. Jelikož jsme však střed sondy pouze odhadli a zobáček svinovacího metru měl vůli, a proto mohla nastat chyba.

Hloubka vývrtnu je přibližně 20 mm.

5.10.5 Celková zkouška sváru

Posledním naším úkolem a tím nejdůležitějším bylo prozkoumat zbytek sváru a zjistit, zda se v něm nenachází také jiné vady.

Začátek měření budeme provádět 20 mm od hrany, tedy až za vyvrtaným otvorem. Můžeme postupovat dvěma způsoby. V prvním případě lze jezdit podél sváru až do konce, kde se o 1 mm posuneme ke sváru a následně budeme posouvat zpět. Takto bychom, postupovali až ke sváru. V druhém případě lze sondu posouvat ke sváru a zároveň ji posouvat o 1 mm podél svaru. Jakmile nalezneme chybu, označíme si ji a zjistíme její velikost, která se určí podobně jako v prvním případě a umístění, to zjistíme tak, že si zas pomocí svinovacího metru odměříme vzdálenost od okrajů součásti a ke vzdálenosti ve směru sondy přičteme vzdálenost R_a , hloubku určíme odečteme z přístroje. A vše následně zapíšeme do tabulky, kde pak pomocí příslušných norem určíme, zda je svar v pořádku.

V našem svaru nebyla nalezena žádná další vada a můžeme tedy součást označit za vyhovující.

Tímto způsobem se měří součásti, které nemají velké rozměry a, nebo je k nim přístup pouze z jedné strany. U velkých, a hlavně dlouhých svarů, se používají již modernější metody, a to především metoda TOFD a Phased Arra, které jsou schopny zjistit vadu na jedno posunutí.

6 Závěr

V praktické části jsou popsány a vyhodnoceny dvě zkoušky. Výsledek těchto zkoušek byl pozitivní, i když jsem chtěl, aby jedna vyšla negativně, a proto jsem si do součásti, kterou jsem testoval ultrazvukem vyvrtal otvor a následně jsem na něm ukázal práci ultrazvukem. Dále jsem se snažil důkladně popsat nastavení samotné nastavení přístrojů pro zkoušení materiálu, ale v dnešní pokročile době již není zapotřebí tolik znalosti veškerá elektronika je již předem nastavená a nám stačí znát materiál a jeho rozměry. U zkoušek prozařováním je již potřeba znát více údajů, ale vše se řídí podle evropských norem. A i podle těchto norem se vyhodnocují samotné výsledky měření.

V první části popisují fyzikální podstatu a principy samotných zkoušek. A následné fungování samotných přístrojů. Tyto poznatky jsem využily v druhé části, kde jsme provedli samotné zkoušky na základě teoretických poznatku. Zkoušky jsme prováděli na dvou součásti. Při zkoušce ultrazvukem jsme zkoumali traverzu ve tvaru „T“, kde jsme změřili rozměr a hloubku vyvrtané díry, tyto údaje odpovídali předpokladu. Dále jsme na této součásti provedli zkoušku zbytku svaru, tato zkouška neobjevila žádné další vady ve svaru. Při zkoušce prozařováním jsme také nezjistili žádnou vadu ve svaru. Práce by dále mohla zahrnovat metody zkoumající vnější vady materiálu, abychom mohli provést celkovou zkoušku dané součásti.

7 Zdroje:

- [1] HAJDOVSKÝ, Vladimír. *Zkoušení materiálů a výrobků rentgenovými paprsky a paprsky gama*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956, 402 s. Řada strojírenské literatury.
- [2] KOPEC, Bernard. *Nede*
struktivní zkoušení materiálů a konstrukci: nauka o materiálu IV. Brno: Cerm, 2008, 571, [32] s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [3] MARTINÁK, Milan. *Kontrola a meranie pre 3. ročník SPŠ strojnických*. Bratislava: Alfa, 1987, 260 s. Edícia strojárskiej literatúry.
- [4] OBRAZ, Jaroslav. *Zkoušení materiálu ultrazvukem*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989, 460 s. ISBN 80-03-00097-1.
- [5] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: Cerm, c2001, xi, 505 s. ISBN 80-7204-193-2.
- [6] VELES, Pavol. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. 2. vyd. Bratislava: Alfa, 1989, 408
- [7] VĚCHET, Mojmir. *Defektoskopie v otázkách a odpovědích*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989, 323 s. ISBN 80-03-00100-5.
- [8] VYBÍRAL, Bohumil. *Kmitání a vlnění*. Hradec Králové: Gaudeamus, 2014, 246 s. ISBN 978-80-7435-379-6.
- [9] SKRBK, Břetislav. *Pokroky v oblasti nedestruktivního zkoušení*. V Liberci: Technická univerzita, 2014, 56 s. ISBN 978-80-7494-165-8.
- [10] ULLMANN, Jiří. *Nedestruktivní zkoušení materiálů : všeobecné znalosti*. 1.vyd. Ostrava: PTS Josef Solnař, 1995. 43 s.
- Internetové zdroje
- [10] ULLMANN, Jiří. *Nedestruktivní zkoušení materiálů : všeobecné znalosti*. 1.vyd. Ostrava: PTS Josef Solnař, 1995. 43 s.
- [11] *Encyklopedie fyziky: Harmonické kmitání* [online]. 2007 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/156-harmonicke-kmitani>
- [12] *Fyzika: Tlumené a nucené kmitání mechanického oscilátoru* [online]. 2007 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/mechanicke-kmitani-a-vlneni/nucene-kmitani-mechanickeho-oscilatoru>

[13] *Strojní technologie: Vlastnosti materiálů* [online]. 2007 [cit. 2017-05-07].

Dostupné z: http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06c_nedestruktivni.php

[14] *[Svařování a dělení: Aplikace pokročilých technik ultrazvukového zkoušení svarových spojů* [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z:

<http://www.konstrukce.cz/clanek/aplikace-pokrocilych-technik-ultrazvukoveho-zkouseni-svarovych-spoju/>

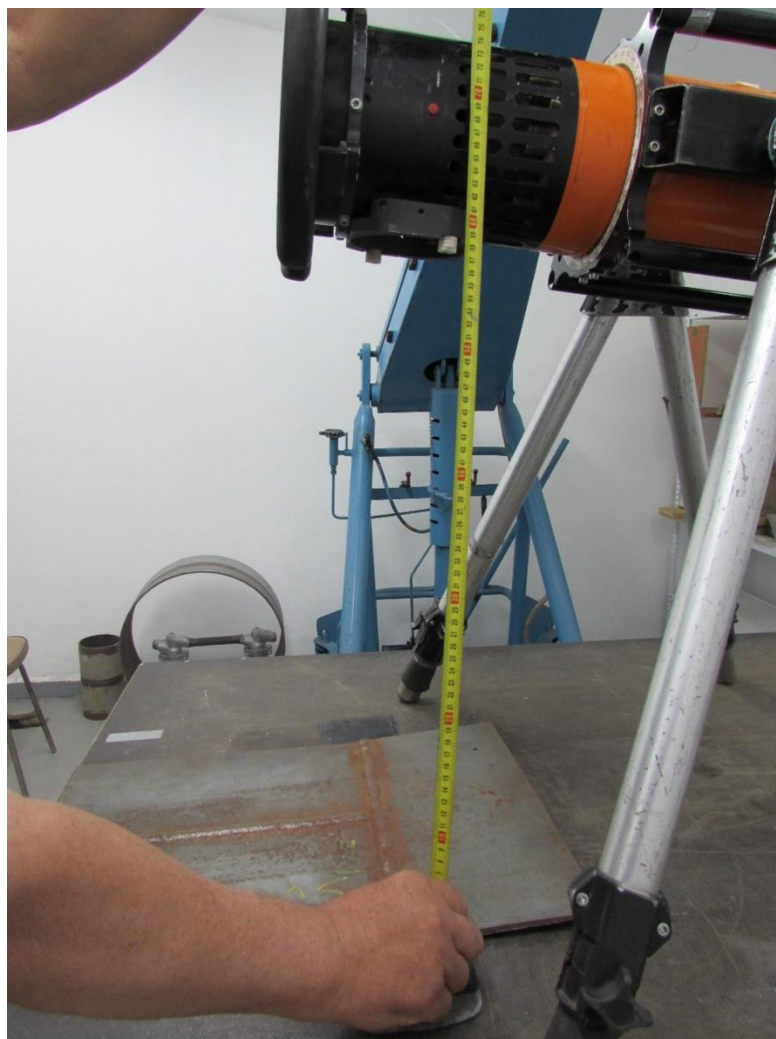
Seznam Obrázků

Obrázek 1 vady vzniklé při svárování [10].....	11
Obrázek 2 harmonický pohyb [11]	13
Obrázek 3 šíření se vln v prostoru [3].....	16
Obrázek 4 útlum vlny [4].....	19
Obrázek 5 průchodová metoda [5].....	20
Obrázek 6 druhy šíření vln [2].....	23
Obrázek 7 posun PCS [7].....	25
Obrázek 8 popis zařízení ultrazvukové zkoušky [2].....	27
Obrázek 9 přímá sonda Foto F. Lukášek	28
Obrázek 10 úhlová ultrazvuková sonda Foto F. Lukášek.....	29
Obrázek 11 schéma a princip rentgenky [2]	33
Obrázek 12 zdroj záření gama Foto F. Lukášek	36
Obrázek 13 svářená součást, která se bude zkoušet Foto F. Lukášek	40
Obrázek 14 označení součásti 1-vymezení prostoru pro kontrolu, 2- označení součásti a 3- radiografické měrky Foto F. Lukášek	41
Obrázek 15 drátové měrky Foto F. Lukášek.....	41
Obrázek 16 vady ve sváru [7]	44
Obrázek 17 měření ohniskové vzdálenosti Foto F. Lukášek	54
Obrázek 18 určení ohniskové vzdálenosti Foto F. Lukášek	55
Obrázek 19 vypočítané hodnoty pro nastavení daných hodnot pro zkoušku prozařováním Foto F. Lukášek	55
Obrázek 20 vyvolávací lázně, a) vývojka, b) ustalovač a c) voda se saponátem Foto F. Lukášek.....	56
Obrázek 21 suška filmů Foto F. Lukášek	56
Obrázek 22 detajl na drátové měrky Foto F. Lukášek	57
Obrázek 23 vyvolaný snímek naší součásti Foto F. Lukášek	57
Obrázek 24 snímek z vady Foto F. Lukášek.....	58
Obrázek 25 přístroj pro ultrazvukové zkoušky Foto F. Lukášek.....	58
Obrázek 26 hledání sondy Foto F. Lukášek	59
Obrázek 27 výběr sondy Foto F. Lukášek	59
Obrázek 28 nastavení tloušťky materiálu Foto F. Lukášek	60
Obrázek 29 zobrazení echa a) vzdálenost vady od sondy Ra a b) vadové echo Foto F. Lukášek.....	60

Obrázek 30 konec vývrtnu Foto F. Lukášek.....	61
Obrázek 31 snímek vypracovaného protokolu pro rentgenovou zkoušku Foto F. Lukášek	62
Obrázek 32 ukázka protokolu pro ultrazvukovou zkoušku Foto F. Lukášek	63

)

8 Příloha 1 Fotografie z realizace



Obrázek 17 měření ohniskové vzdálenosti Foto F. Lukášek



Obrázek 18 určení ohniskové vzdálenosti Foto F. Lukášek

tl.	kV	mA	čas
2	100	4	1
3	100	4,5	1
4	105-110	5	1
5	115	5	1
6	125-130	5	1
8	140-150	5	1
10	155-160	5	1
12	170-180	5	1
14	190-195	4,5	1
15	200	4,5	1
16	200	4,5	1,2
20	200	4,5	2,1
22	200	4,5	2,5
24	200	4,5	3,5-4
25	200	4,5	3,5-4
30	200	4,5	6,5

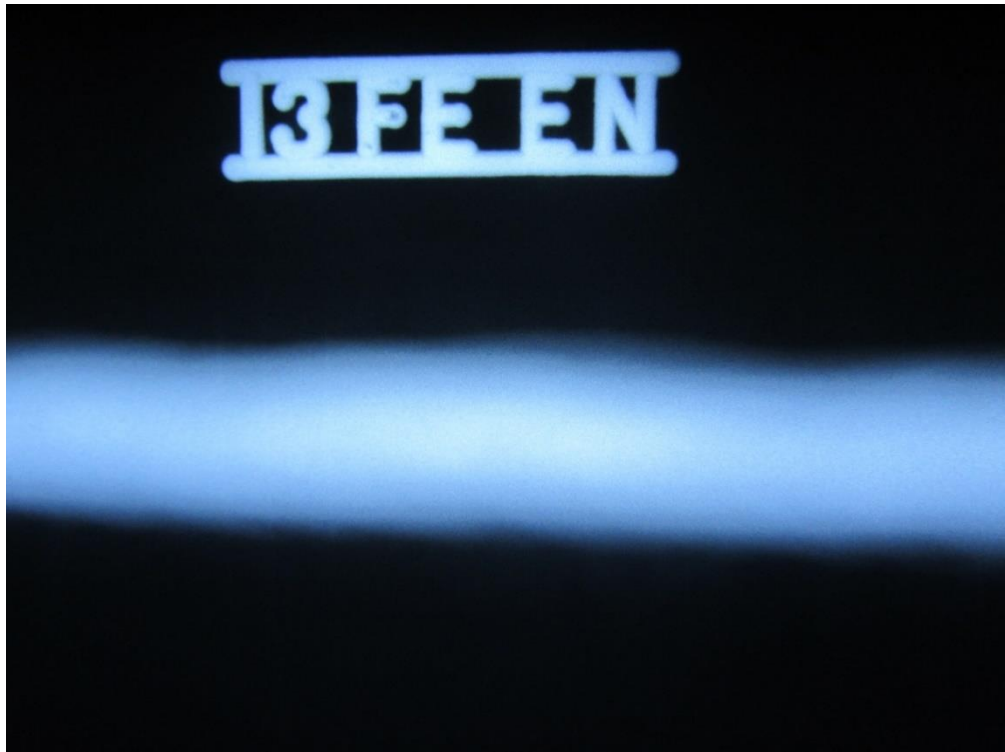
Obrázek 19 vypočítané hodnoty pro nastavení daných hodnot pro zkoušku prozařováním Foto F. Lukášek



Obrázek 20 vyvolávací lázně, a) vývojka, b) ustalovač a c) voda se saponátem Foto F. Lukášek



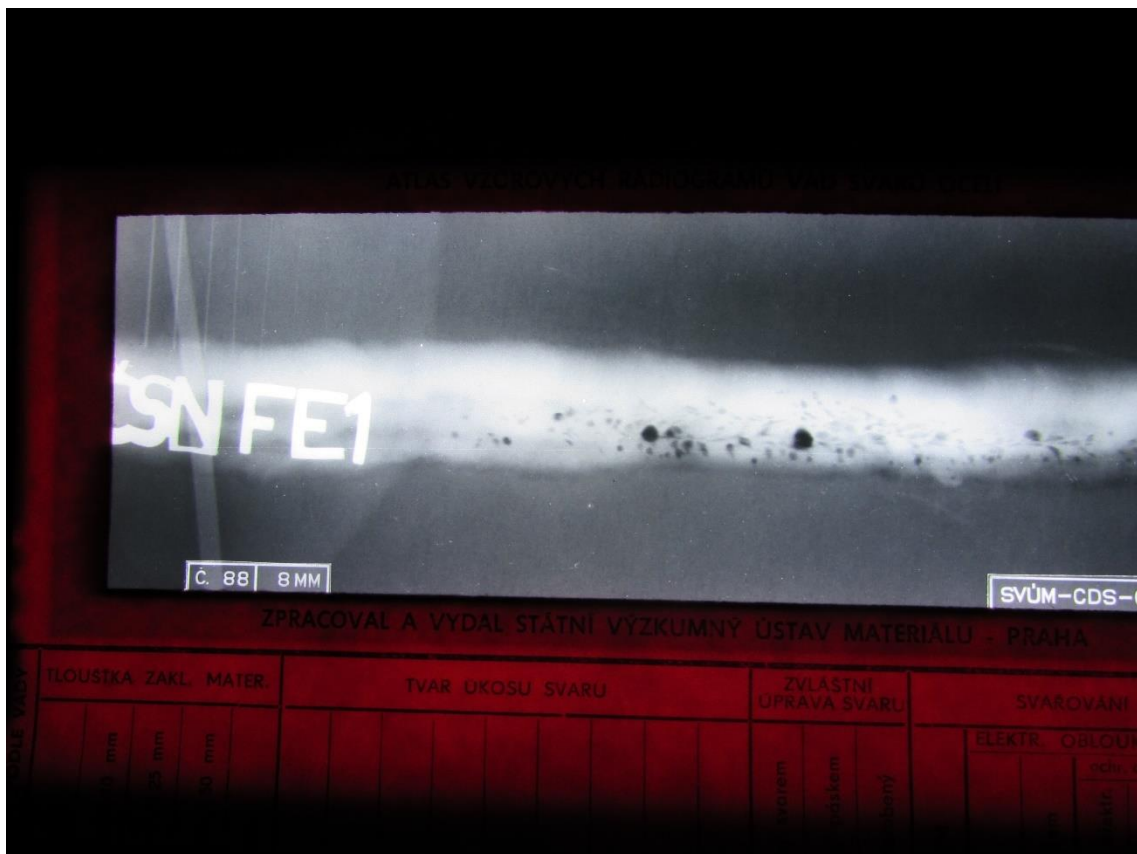
Obrázek 21 suška filmů Foto F. Lukášek



Obrázek 22 detail na drátové měrky Foto F. Lukášek



Obrázek 23 vyvolaný snímek naší součásti Foto F. Lukášek



Obrázek 24 snímek z vady Foto F. Lukášek



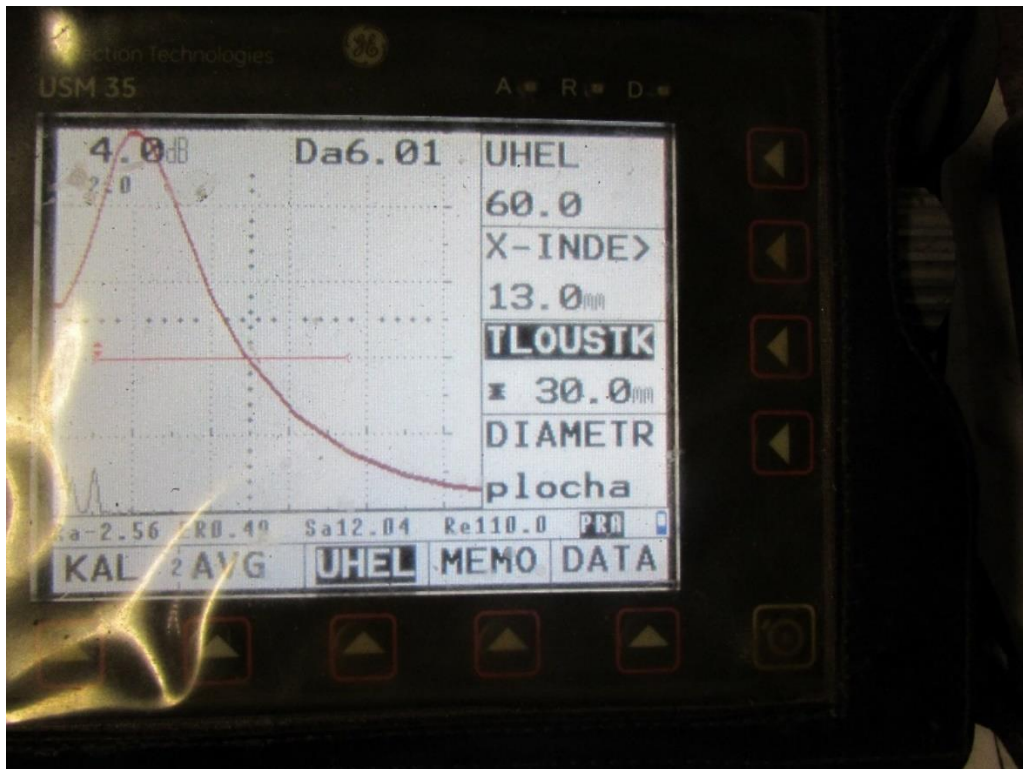
Obrázek 25 přístroj pro ultrazvukové zkoušky Foto F. Lukášek



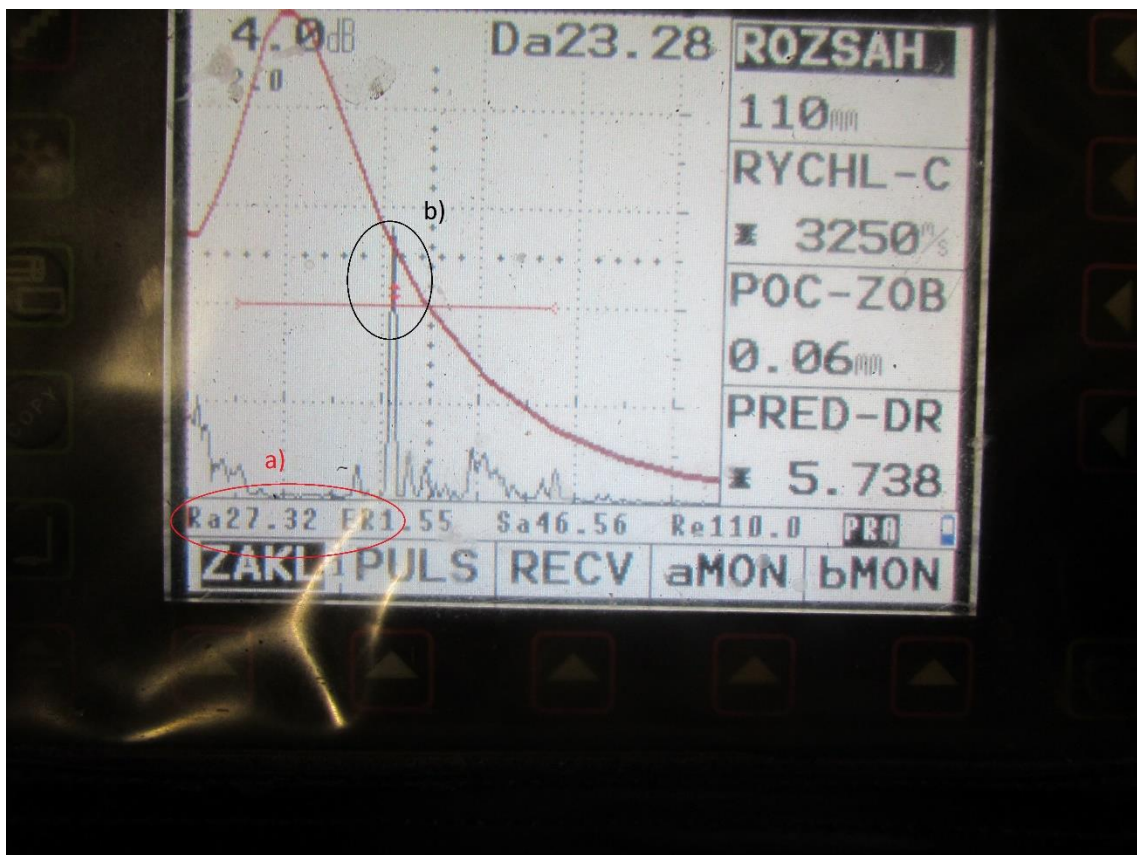
Obrázek 26 hledání sondy Foto F. Lukášek



Obrázek 27 výběr sondy Foto F. Lukášek



Obrázek 28 nastavení tloušťky materiálu Foto F. Lukášek




Obrázek 29 zobrazení echa a) vzdálenost vady od sondy Ra a b) vadové echo Foto F. Lukášek



Obrázek 30 konec vývrtu Foto F. Lukášek


9 Příloha 2 protokol pro rentgenovou zkoušku

Zákazník: Client:		Protokol prozařovací zkoušky				ND Scan Services s.r.o.  Hradec Králové, CZ ič: 287 68 311 mobil: +420 603 483 428, +420 603 113 608 e-mail: info@ndscan.cz <i>Nondestructive testing, measurement, inspections, technical consulting</i>							
Zakázka: Order No.:		Protokol č.: Report No.: 04 /2017		List: Page: 1 z 1									
Údaje o objektu Object Data	Objekt: Object: Svarek tělesa				Výrobce: Manufacturer:								
	Zkoušená část: Examination Part: T svar				Výrobní výkres: Drawing No.: CV309320.2								
	Materiál: Material: 1.4541		Rozsah zkoušky: Range of Ex.: 90%		Tepelné zprac.: Heat Treatment: ---		Metoda svařování: Welding Process: 141						
Technické údaje o zkoušce Technical Data	RTG přístroj: X-ray equipment: Seifert 200		Zkušební předpis, zk. třída: Specification, examination class:			Výrobce filmů: Film manufacturer: KODAK							
	Napětí: Voltage: 125 kV		ČSN EN ISO17636-1 Class B, ČSN EN ISO 19232			Typ, třída filmů: Film class, type: T200							
	Proud: Tube-current: 5 mA					Uspořádání snímků: Setup: přes jednu stěny		Folie: Screens: Pb		0,027 0,027			
	Zdroj záření: Gamma ray source: -		Velikost ohniska: Focal spot size/source dim.: 1,5x1,5 mm			Typ měrky: IQI type: 13 FE EN							
Aktivita: Activity: - Ci		Vzdálenost zdroj-film: Film - focus distance: 700 mm											
Číslo svaru Weld No.	Číslo filmu Film No.	Číslo svařeče Welder No.	Tloušťka stěny Wall thickness	Průměr Diameter	Rozměr filmu Film size	Exp. čas / Exposure	Změrnání / Density	Poslední viditelný drátek	Vyhodnocení dle: Acceptance standard:		Pozice vad Location of flaw	Poznámka Note	
									ČSN EN ISO 10675-1 cl.2				
Vyhodnocení													
Nález: Finding:		Výsledek Evaluation											
		Ano Yes		Ne No									
Vyhodnocení - Result													
ZK1	A		6,0	33,7	10x16	1	5,0	13	žádný	X			

Zkratky: Abbreviations:	A(201) Póry / Gas Cavity, B(300) Struskové vměstky / Solid Inclusion, C(401) Studený spoj / Lack of Fusion, D(402) Neprovařený kořen / Lack of Penetration, E(100) Trhliny / Cracks, F(500) Zápal / Imperfect Shape								Zkoušející: Operator: F. Lukášek	Číslo certifikace: Certification No.: 101-00491			
Místo: Examination place:	Hradec Králové								Podpis: Signature:	Převzal: Took over:			
Datum: Date:	11.04.2017												

Obrázek 31 snímek vypracovaného protokolu pro rentgenovou zkoušku Foto F. Lukášek

Příloha 3 protokol pro ultrazvukovou zkoušku

Zákazník: Client:		Protokol o ultrazvukové zkoušce Ultrasonic Examination Report		ND Scan Services s.r.o. Hradec Králové, CZ IČ: 287 68 311 mobil: +420 603 483 428, +420 603 113 608 e-mail: info@ndscan.cz <i>Nondestructive testing, measurement, inspections, technical consulting</i>																																																									
Zakázka: Order No.:								Protokol č.: Report No.:	List: Page:																																																				
Údaje o objektu Object Data		Objekt: Object:		Výrobce: Manufacturer:		Výrobní výkres: Drawing No.:																																																							
		Zkoušená část: Examination Part:		Materiál: Material:		Rozsah zkoušky: Range of Ex.:																																																							
		Zkoušená část: <i>základní materiál výkovku</i>		Materiál: <i>100%</i>		Rozsah zkoušky: <i>100%</i>																																																							
				Tepelné zprac.: Heat Treatment:		Metoda svařování: Welding Process:																																																							
Technické údaje o zkoušce Technical Data		Zkušební předpis: Specification:		Zkušební postup: Procedure:		Zkušební postup: Procedure:																																																							
		Zkušební předpis: <i>ČSN EN ISO 11666</i>		Zkušební postup: <i>ČSN EN ISO 17640, ČSN EN 583</i>		Zkušební postup: <i>postup: ND Scan method UT No. 006 rev.1</i>																																																							
		Přístroj: Flaw detector type:		Sonda: Probe:		Frekvence: Frequency:		Frekvence: Frequency:																																																					
		Přístroj: <i>Olympus EPOCH XT</i>		Sonda: <i>MWB 60, 60°, AM4R-8X9- 60°</i>		Frekvence: <i>4 ±5 MHz</i>		Frekvence: <i>4 ±5 MHz</i>																																																					
		Povrch svaru: Weld surface:		Stav zkušební povrchu: Surface condition:		Vazební prostředí: Coupling medium:		Vazební prostředí: Coupling medium:																																																					
		Povrch svaru: <i>original</i>		Stav zkušební povrchu: <i>clean</i>		Vazební prostředí: <i>Sonotech UT-X</i>		Vazební prostředí: <i>Sonotech UT-X</i>																																																					
Rozsah (mm): Range:		Nastav. přístroje a citlivost: Adjustment of dist. and sensitivity:		Typ a velikost reflektoru: Type of reflector:		Typ a velikost reflektoru: Type of reflector:																																																							
Rozsah (mm): <i>30 mm</i>		Nastav. přístroje a citlivost: <i>etalon č. 4 V1, V2</i>		Typ a velikost reflektoru: <i>DGS scale ø 1,5 mm</i>		Typ a velikost reflektoru: <i>DGS scale ø 1,5 mm</i>																																																							
Registrační hranice: Recording threshold:		Hodnoceno dle: Evaluated acc.to:		Základní citlivost přístroje: Basic sensitivity:		Základní citlivost přístroje: Basic sensitivity:																																																							
Registrační hranice: <i>DGS 1 mm</i>		Hodnoceno dle: <i>ČSN EN ISO 11666 Method 2, AL2</i>		Základní citlivost přístroje: <i>58 - 66 dB</i>		Základní citlivost přístroje: <i>58 - 66 dB</i>																																																							
Útlum: Sound attenuation:		Přenosové ztráty: Transfer losses:		Zkušební citlivost: Test sensitivity:		Zkušební citlivost: Test sensitivity:																																																							
Útlum: <i>40 dB/m</i>		Přenosové ztráty: <i>4 dB</i>		Zkušební citlivost: <i>+6 dB</i>		Zkušební citlivost: <i>+6 dB</i>																																																							
Vyhodnocení: Result:																																																													
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">Tavba / Část</th> <th style="width: 20%;">Výkres / Drawing</th> <th style="width: 10%;">ks / pcs</th> <th style="width: 25%;">Název / Name</th> <th style="width: 15%;">Material</th> <th style="width: 15%;">Výsledek/Result</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;"><i>378024</i></td> <td style="text-align: center;"><i>CV325524.4</i></td> <td style="text-align: center;"><i>1</i></td> <td style="text-align: center;"><i>Redukce Ø43/34 T2-0583-04523-20</i></td> <td style="text-align: center;"><i>11CrMo9-10</i></td> <td style="text-align: center;"><i>Vyhovuje</i></td> </tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>								Tavba / Část	Výkres / Drawing	ks / pcs	Název / Name	Material	Výsledek/Result	<i>378024</i>	<i>CV325524.4</i>	<i>1</i>	<i>Redukce Ø43/34 T2-0583-04523-20</i>	<i>11CrMo9-10</i>	<i>Vyhovuje</i>																																										
Tavba / Část	Výkres / Drawing	ks / pcs	Název / Name	Material	Výsledek/Result																																																								
<i>378024</i>	<i>CV325524.4</i>	<i>1</i>	<i>Redukce Ø43/34 T2-0583-04523-20</i>	<i>11CrMo9-10</i>	<i>Vyhovuje</i>																																																								
<p><i>Byla provedena ultrazvuková kontrola základního materiálu 1 ks výkovků v rozsahu 100% dle zkušební předpisu ČSN EN 10228-3 tř.4 s výsledkem - vyhovuje</i></p> <p><i>Ultrasonic testing of 1 pcs forging base material, quality meets requirements of EN 10228-3 C4 - acceptable</i></p>																																																													
Místo zkoušky: Examination Place:		Datum: Date:		Převzal: Took Over:																																																									
Místo zkoušky: <i>Hradec Králové</i>		Datum: <i>13.04.2017</i>																																																											
Zkoušející: Operator:		Podpis: Signature:																																																											
Zkoušející: <i>M. Lehký level III</i>		Podpis:																																																											
Certification No.:																																																													
Certification No.: <i>101-00233</i>																																																													

Obrázek 32 ukázka protokolu pro ultrazvukovou zkoušku Foto F. Lukášek