



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

PŘÍPRAVA KALIBRAČNÍCH MĚREK PRO METODU ZKOUŠENÍ VÍŘIVÝMI PROUDY

PREPARATION OF CALIBRATION SAMPLES FOR EDDY CURRENT TESTING
METHOD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Daniel Machovič

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Radil, Ph.D.

BRNO 2020



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor Elektroenergetika

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Daniel Machovič

ID: 174209

Ročník: 2

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Příprava kalibračních měrek pro metodu zkoušení vířivými proudy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Úvod
2. Současný stav
3. Metoda zkoušení vířivými proudy
4. Výroba kalibračních měrek
5. Kalibrační měření metodou vířivých proudů
6. Závěr

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 1.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Radil, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

MACHOVIČ, Daniel. *Příprava kalibračních měrek pro metodu zkoušení vířivými proudy*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127237>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Lukáš Radil.

Vyhlásenie

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Příprava kalibračních měrek pro metodu zkoušení vířivými proudy jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 01.06.2020

.....

ABSTRAKT

Cieľom diplomovej práce je objasniť tému kalibračných mierok používaných pri skúšaní vírivými prúdmi na zariadeniach v jadrovej energetike. Teoretická časť diplomovej práce je zameraná na metódu skúšania vírivými prúdmi, ktorá sa radí do technológie nedeštruktívnej defektoskopie. Táto časť práce popisuje princíp metódy jej rozsah, obmedzenia a rozdelenie snímačov používaných pri tejto metóde skúšania. Práca v krátkosti popisuje fyzikálny princíp lasera, jeho druhy a pracovné režimy. Praktická časť práce je zameraná na výrobu kalibračnej mierky laserom. Ďalším bodom práce je porovnanie údajov získaných z merania metódou vírivých prúdov na mierkach vyrobených laserom a na kalibračných mierkach používaných v praxi.

KEÚČOVÉ SLOVÁ:

metóda skúšania vírivými prúdmi, výroba kalibračných mierok, ploché testovacie mierky, valcové testovacie mierky, defekt, kontrola mikroskopom

ABSTRACT

The aim of the diploma thesis is to clarify the topic of calibration samples used in eddy current testing on equipment in nuclear energy. The theoretical part of the diploma thesis is focused on the eddy current testing method, which belongs to the technology of non-destructive defectoscopy. This part of the work describes the principle of the method, its scope, limitations and dividing of sensors used in this test method. The work briefly describes the physical principle of the laser, its types and operating modes. The practical part of the work is focused on the production of a calibration samples by laser. Another point of the work is the comparison of data obtained from eddy current measurements on samples made by laser and on calibration samples used in practice.

KEY WORDS:

eddy current test method, production of calibration samples, calibration test block, calibration test tube, defect, microscope inspection

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce Ing. Lukáš Radil Ph.D. a odbornému poradcovi Ing. Branislav Martančík PhD. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej diplomovej práce. Ďakujem taktiež firme VUJE, a.s. za poskytnutie prístupu k laboratóriám štruktúrálnych analýz a technickým zariadeniam ako aj ich pracovníkom. Ďakujem aj spoločnosti TRUMPF za ochotu a možnosť využitia laserových zariadení.

V Brně dňa 01.06.2020

.....
podpis autora(-ky)

OBSAH

ZOZNAM OBRÁZKOV.....	8
ZOZNAM TABULIEK.....	9
ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK.....	10
1 ÚVOD.....	11
2 SÚČASNÝ STAV.....	12
3 CIELE PRÁCE.....	13
4 METÓDA SKÚŠANIA VÍRIVÝMI PRÚDMI.....	14
4.1 OBECNÁ KLASIFIKÁCIA METÓD.....	14
4.2 PRINCÍP METÓDY VÍRIVÝCH PRÚDOV.....	15
4.3 ROZSAH POUŽITIA A OBMEDZENIA METÓDY.....	16
4.4 POVRCHOVÝ JAV.....	16
4.5 ROZDELENIE SNÍMAČOV VÍRIVÝCH PRÚDOV.....	17
4.5.1 ABSOLÚTNE SNÍMAČE.....	17
4.5.2 DIFERENCIÁLNE SNÍMAČE.....	17
4.6 ROZDELENIE METÓD MERANIA.....	18
4.6.1 METÓDA S PRECHODOVOU CIEVKOU.....	18
4.6.2 METÓDA S PRÍLOŽNOU CIEVKOU.....	20
4.7 VPLYVY OVPLYVŇUJÚCE METODIKU KONTROLY.....	21
4.7.1 FREKVENCIA.....	21
4.7.2 ELEKTRICKÁ VODIVOSŤ A MAGNETICKÁ PERMEABILITA.....	22
4.7.3 UMIESTNENIE A ORIENTÁCIA DEFEKTU.....	22
4.7.4 TEPLOTA.....	23
4.8 ODHALENIE NECELISTVOSTÍ A SPÔSOB ICH ZOBRAZENIA.....	23
4.8.1 ČASOVÉ LINEÁRNE ZOBRAZENIE.....	23
4.8.2 VEKTOROVÉ BODOVÉ ZOBRAZENIE.....	23
4.8.3 IMPEDANČNÍ DIAGRAM.....	23
4.9 FYZIKÁLNY PRINCÍP LASERA.....	24
4.10 DRUHY LASEROV A ICH POUŽITIE.....	24
4.10.1 PEVNOLÁTKOVÉ LASERY.....	24
4.10.2 PLYNOVÉ LASERY.....	25
4.10.3 KVAPALINOVÉ LASERY.....	25
4.10.4 POLOVODIČOVÉ LASERY.....	25
4.10.5 PLAZMOVÉ LASERY.....	25
4.11 PRACOVNÉ REŽIMY LASERA.....	26
4.11.1 GRAVÍROVANIE.....	26
4.11.2 ABLÁCIA.....	26
5 VÝROBA KALIBRAČNÝCH MIEROK.....	27
5.1 VÝROBA PLOCHÝCH KALIBRAČNÝCH MIEROK.....	27

5.1.1	MERANIE PLOCHEJ KALIBRAČNEJ MIERKY	27
5.1.2	NÁVRH PLOCHEJ TESTOVACEJ MIERKY	29
5.1.3	VÝROBA PLOCHÝCH TESTOVACÍCH MIEROK LASEROM	30
5.1.4	ÚPRAVA TESTOVACÍCH VZORIEK	32
5.1.5	ZHODNOTENIE VÝROBY PLOCHEJ TESTOVACEJ MIERKY	34
5.2	VÝROBA VALCOVÝCH KALIBRAČNÝCH MIEROK	34
5.2.1	NÁVRH VALCOVEJ TESTOVACEJ MIERKY	35
5.2.2	VÝROBA VALCOVÝCH POKUSNÝCH VZORIEK LASEROM	35
5.2.3	VÝROBA VALCOVEJ TESTOVACEJ MIERKY LASEROM	37
5.2.4	VÝROBA VALCOVEJ TESTOVACEJ MIERKY METÓDOU VYISKROVANIA	38
6	KALIBRÁCIA MERANIA METÓDOU VÍRIVÝCH PRÚDOV	40
6.1	MERANIE PLOCHÝCH TESTOVACÍCH MIEROK VYROBENÝCH LASEROM	40
6.1.1	POROVNANIE NAMERANÝCH ÚDAJOV PLOCHEJ MIERKY	40
6.2	MERANIE VALCOVEJ TESTOVACEJ MIERKY VYROBENEJ VYISKROVANÍM	42
6.2.1	POROVNANIE NAMERANÝCH ÚDAJOV VALCOVEJ MIERKY VYROBENEJ VYISKROVANÍM	43
7	ZÁVER	47
	POUŽITÁ LITERATÚRA	49

ZOZNAM OBRÁZKOV

<i>Obr. 4.1</i>	<i>Vznik vírivých prúdov vo vodivom materiáli [15]</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 4.2</i>	<i>Zobrazenie účinkov povrchového javu [14]</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 4.3</i>	<i>Princíp diferenciálneho zapojenia cievok v samo-porovnávacom režime [13]</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 4.4</i>	<i>Princíp metódy s prechodovou cievkou v absolútnom zapojení [13]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 4.5</i>	<i>Princíp príložnej cievky [13]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 4.6</i>	<i>Zobrazenie účinku povrchového javu [7]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 4.7</i>	<i>Stimulovaná emisia [11]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 5.1</i>	<i>Kalibračná mierka vyrobená vyiskrovaním</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 5.2</i>	<i>Zachytenie priebehu merania kalibračnej mierky vyrobenej vyiskrovaním</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 5.3</i>	<i>Časový priebeh napäťovej odozvy</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 5.4</i>	<i>Navrhnutá plochá testovacia mierka</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 5.5</i>	<i>Test pracovných režimov</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 5.6</i>	<i>Použitý laser TruMark Station 5000</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 5.7</i>	<i>Elektroiskrová drôtová rezačka</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 5.8</i>	<i>Kapsle s drážkou</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 5.9</i>	<i>Zobrazenie drážky č.1 a č.2 mikroskopom</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 5.10</i>	<i>Zobrazenie drážky č.3 a č.4 mikroskopom</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 5.11</i>	<i>Navrhnutá valcová testovacia mierka</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 5.12</i>	<i>Valcové pokusné vzorky vyrobené laserom</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 5.13</i>	<i>Meranie výchyl'komerom</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 5.14</i>	<i>TruMark Station 5000 s laserom TruMark 5050</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 5.15</i>	<i>Valcová testovacia mierka vyrobená laserom</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 5.16</i>	<i>Detailný pohľad na defekt č.2 a defekt č.3</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 5.17</i>	<i>Valcová testovacia mierka vyrobená metódou vyiskrovania</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 6.1</i>	<i>Časový priebeh napäťovej odozvy mierky vyrobenej laserom (drážka č.2)</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 6.2</i>	<i>C-scan mierky vyrobenej laserom (drážka č.2)</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 6.3</i>	<i>Diferenciálny priebeh signálu pre defekt č.1, meracia frekvencia 25 kHz, 100 kHz</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 6.4</i>	<i>Závislosť amplitúdy signálu na použitej meracej frekvencii</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 6.5</i>	<i>Závislosť fázy signálu na použitej meracej frekvencii</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 6.6</i>	<i>Fázová krivka</i>	<i>46</i>

ZOZNAM TABULIEK

<i>Tab. 4.1 Rozdelenie kontrol [1].....</i>	<i>14</i>
<i>Tab. 5.1 Technické údaje navrhutej mierky</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 5.2 Parametre krokov pri výrobe laserom</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 5.3 Porovnanie rozmerov drážok</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 5.4 Výrobné parametre pokusných vzorkou</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 5.5 Porovnanie rozmerov valcovej mierky.....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 6.1 Porovnanie nameraných údajov</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 6.2 Porovnanie nameraných údajov signálov valcovej mierky.....</i>	<i>44</i>

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

B magnetická indukcia (T)

B_0 magnetická indukcia vybudená budiacou cievkou (T)

CO₂ oxid uhličitý

d vonkajší priemer tyče (m)

D vonkajší priemer vinutia snímača (m)

\bar{E} indukované napätie na meracom vinutí (V)

E_x vyššia energetická hladina (J)

E_0 pôvodná energetická hladina (J)

f_0 frekvenčná odozva (Hz)

h_{ef} efektívna šírka poľa sondy (mm)

hf vyžiarená energia (J)

H intenzita magnetického poľa (A/m)

He hélium

H_p primárne magnetické pole (A/m)

H_s sekundárne magnetické pole (A/m)

\vec{H}_0 vektor intenzity magnetického poľa budiacej cievky (A/m)

I_b budiaci prúd (A)

I_v indukovaný vírový prúd (A)

N_1 budiace vinutie

N_2 meracie vinutie

N₂ vodík

s štandardná hĺbka vnikania (m)

ω uhlová frekvencia (s⁻¹)

v rýchlosť pohybu sondy (mm/s)

σ merná elektrická vodivosť (S/m)

Φ magnetický tok (Wb)

μ_0 permeabilita vákua (H/m)

μ_r relatívna permeabilita (-)

$\bar{\mu}_{ef}$ efektívna permeabilita (-)

1 ÚVOD

Pre spoľahlivú a bezpečnú prevádzku jadrových elektrární je nevyhnutná funkčnosť jej jednotlivých komponentov. Tieto komponenty ako napríklad parogenerátor, reaktorová nádoba, hlavné cirkulačné čerpadlo alebo systém potrubí sú pri plánovaných odstávkach jadrových blokov účelne a systematicky kontrolované. Kontrola takýchto zariadení prebieha nedeštruktívnymi skúškami, ktoré sú vykonávané manuálne alebo pomocou automatizovaných zariadení a manipulátorov. Nedeštruktívne skúšanie zahŕňa niekoľko metód. Dáta namerané snímačmi však musia byť správne interpretované, k tomuto účelu sa využívajú kalibračné mierky.

Kalibračná mierka slúži k počiatočnému nastaveniu zariadenia a funkčnému overeniu systému použitého pri kontrole. Pri analýze interpretuje signály vírivých prúdov v skúšanom objekte. Kalibračné mierky simulujú podmienky, ktoré nastávajú pri reálnom skúšaní a z tohto dôvodu musia ich základné parametre byť zhodné s parametrami skúšaného objektu.

Mierky sú telesá vyrobené z materiálu ktorých geometrické, metalurgické a fyzikálne vlastnosti sú rovnaké ako skúšaný povrch materiálu. Mierka obsahuje umelé defekty, ktoré sú vyrobené v presne definovaných rozmeroch a tvaroch, účelom týchto defektov je napodobiť skutočný defekt.

Pri skúšaní povrchov systému potrubí, povrchov parogenerátorov alebo tlakovej nádoby reaktora sa uplatňuje plochá kalibračná mierka, na ktorej sú defekty štandardne vo forme drážok. Ich účelom je napodobiť axiálne a obvodové trhliny. V prípade že je kalibračná mierka trubkového charakteru sú vyrobené umelé defekty vo forme drážky po celom vnútornom alebo vonkajšom obvode steny alebo ako kruhové vývrty. Pre napodobenie korózných úbytkov v trubkovom systéme parogenerátora sa typicky využíva valcová kalibračná mierka s defektmi okrúhleho charakteru. Presné vyhotovenie je dané požiadavkami pre konkrétny typ kontroly.

Kalibračná mierka sa nachádza v module manipulátora určeného pre kontrolovanie daného zariadenia alebo objektu a plní úlohu navádzania meracej sondy do kontrolovanej oblasti. Toto konštrukčné usporiadanie umožňuje nahrávanie signálov kalibračných chýb za prevádzky pri jednotlivých meraniach na danej oblasti zariadenia. Pri analýze a počas merania je nutné brať do úvahy rozmery použitej kalibračnej mierky. Jednotlivé používané mierky sú certifikované a univerzálne pre daný typ merania a miesta jej použitia.

V praxi sa taktiež uplatňuje iný postup, kedy sa kalibračná mierka nenachádza v module manipulátora. Kontrolný snímač sa nakalibruje na kalibračnej mierke, snímač je následne použitý ku skúšaní daného zariadenia. Po ukončení merania sa porovná signál z kalibračnej mierky na začiatku a na konci merania. Tým sa verifikuje stabilita meracieho systému. Po vykonaní skúšok sa nazbierané dáta z merania vyhodnotia na základe typu skúšky a kontrolovaného objektu [1], [2].

2 SÚČASNÝ STAV

Nedeštruktívne skúšanie je v súčasnosti neodmysliteľnou súčasťou bezpečnosti v jadrovej energetike. Skúšky metódou vírivých prúdov sa štandardne používajú ako súčasť predprevádzkových a prevádzkových kontrol, ktoré majú za cieľ zaručenie štrukturálnej integrity a tesnosti. Táto metóda skúšania má dominantné zastúpenie predovšetkým pri kontrole chladiacich komponentov, tlakovej nádoby reaktora ako aj pri kontrole teplovýmenných rúrok parogenerátora. Ďalej sa využíva pre kontrolu závitových otvorov parogenerátora, hlavného cirkulačného čerpadla, spojovacích častí v teplovýmenných okruhoch a podobne.

Vzhľadom na nedostupnosť k niektorým komponentom (potrubné trasy, tlakové nádoby) a prostrediam (teplota, ionizujúce žiarenie, kontaminované prostredie) sa niektoré kontroly vykonávajú automatizovane pomocou diaľkovo riadených manipulátorov. Hlavným cieľom takýchto kontrol je detegovanie povrchových trhlín a nezrovnalostí tesne pod povrchom (do 5 mm), pri kontrole závitových otvorov je dôležitá predovšetkým oblasť v blízkosti závitov, v pod závitovej oblasti a na dne závitového otvoru.

V prípade nálezu defektu alebo nezrovnalosti je podľa bezpečnostných predpisov a noriem zahájený postup pre nápravu, ktorý má vo väčšine prípadov za dôsledok odstavenie prevádzky zariadenia, eventuálne celého bloku. Vykonávanie nedeštruktívnych kontrol je teda dôležité pre sledovanie degradácie jednotlivých komponentov a ich výmenu, ale predovšetkým pre plánovanie budúcich odstávok prevádzky, ktoré stoja nemalé finančné zdroje. Pravidelnosť, rozsah a program jednotlivých kontrol je definovaný v normách a smerniciach popisujúcich prevádzkové kontroly.

Nové technológie v súčasnosti prinášajú nové možnosti k zlepšovaniu oblasti nedeštruktívnych kontrol. Od analytických systémov umožňujúcich zlepšiť kvalitu kontroly, kde namerané dáta presne graficky odpovedajú kontrolovanej oblasti až po automatizovane ovládané manipulátory vykonávajúce kontroly v nebezpečných a neprístupných oblastiach. Každá kontrola je však použiteľná len správnym interpretovaním signálov. Práve túto funkciu plní kalibračná mierka, ktorá slúži počiatočnému nastaveniu systému a tvorí prvotné nastavenie pre správne vyhodnocovanie kontroly.

V súčasnosti sú kalibračné mierky používané v jadrovej energetike pri kontrole vírivými prúdmi vyhotovované vyiskrovaním drážok. Vyiskrenie prebieha grafitovou elektródou, vzniknuté drážky majú šírku na povrchu materiálu len niekoľko desiatín milimetra a rôznu hĺbku. Šírka drážky sa smerom do hĺbky materiálu pomaly rozširuje, tento typ umelo vytvoreného defektu je ideálna prekážka pre tok vírivých prúdov. Avšak vzniknutý typ drážok neodpovedá presne skutočnosti, pretože reálna trhlinka sa smerom do hĺbky materiálu zužuje.

Ďalšou možnosťou ako vyrobiť umelý defekt, je cyklické namáhanie daného kusu materiálu a vytvorenie trhlín. Takto vzniknuté defekty odpovedajú reálne vzniknutým trhlinám v praxi. Veľkou nevýhodou tohto postupu vytvárania defektov je v tom, že je nutnosť vzniknuté defekty z cyklicky namáhaného kusu materiálu vyrezať a implementovať ich následne do kalibračnej mierky zvaráním. Avšak zváranie spôsobuje nežiadúce efekty pretože miesta zvarov ovplyvňujú tok vírivých prúdov. Táto metóda výroby mierok je finančne nákladná a časovo náročná [1], [2].

3 CIELE PRÁCE

Teoretická časť práce.

1. Objasniť tému metódy skúšania vírivými prúdmi. Táto téma zahŕňa princíp metódy jej rozsah, použitie a obmedzenia, s ktorými sa pri praktickom meraní stretávame. Ďalej zahŕňa rozdelenie snímačov používaných pri meraní vírivými prúdmi a používané metódy merania ako aj vplyvy ovplyvňujúce metodiku kontroly.
2. Popis fyzikálneho princípu laseru, jeho druhov a použitia taktiež využiteľné pracovné režimy pri výrobe kalibračnej mierky.

Praktická časť práce je zameraná na výrobu kalibračnej mierky zhotovenej pomocou laserového lúča.

1. Navrhnuť a vyrobiť testovaciu mierku s využitím laserovej technológie.
2. Upraviť vyrobenú testovaciu mierku a podrobiť ju kontrole.
3. Vykonať meranie metódou vírivých prúdov na testovacej mierke a posúdiť kvalitu a funkčnosť danej testovacej mierky.
4. Porovnať testovaciu mierku s doposiaľ používanou kalibračnou mierkou vytvorenou vyiskrovaciu metódou.
5. Zhodnotiť vhodnosť použitia tejto metódy pre vytváranie kalibračných mierok v oblasti diagnostiky v atómovej energetike. Stanoviť výhody a nevýhody oboch metód ako aj použiteľnosť novo vyrobenej kalibračnej mierky v praxi.

4 METÓDA SKÚŠANIA VÍRIVÝMI PRÚDAMI

Metóda skúšania vírivými prúdmi sa radí medzi nedeštruktívne typy kontroly, pri ktorej nedochádza k porušeniu kontrolovaného materiálu a skúšané zariadenie je naďalej prevádzkovateľné bez obmedzení.

Technológia nedeštruktívneho skúšania obsahuje metódy a pracovné postupy, ktoré sú určené na odhaľovanie povrchových chýb materiálu, ako aj štrukturálnych defektov.

4.1 Obecná klasifikácia metód

Americký výbor pre nedeštruktívne skúšanie spolu s Národným poradným orgánom pre materiály ustanovil systém, ktorý nedeštruktívne pracovné techniky klasifikuje a rozdeľuje na šesť základných kategórií [2].

Tab. 4.1 Rozdelenie kontrol [1]

Metóda	Fyzikálny jav
Vizuálna kontrola	Viditeľné svetlo
Kapilárna kontrola	Kapilárny jav
Magnetická prášková kontrola	Magnetické pole
Kontrola vírivými prúdmi	Elektrický prúd
Priemyslová rádiografia	Elektromagnetické vlny
Ultrazvuková kontrola	Mechanické vlny

Jednotlivé nedeštruktívne metódy sú ďalej rozdelené na základe niekoľkých parametrov:

- Zdroj energie (médium) využité pri kontrole objektu (ultrazvukové vlny, röntgenové lúče, termálne žiarenie).
- Charakter signálu pre zobrazenie alebo určenie signálu, ktorý vyplýva zo vzájomného pôsobenia s predmetom (útlm ultrazvukových vln, odraz ultrazvuku, útlm röntgenových lúčov).
- Prostriedky využívané k detekcii alebo snímaniu signálov (piezoelektrický kryštál, indukčná cievka, fotoemulzia).
- Prostriedky pre indikáciu alebo zaznamenávanie signálov a výstupov z merania (meranie odchýlky, stopa na osciloskope, rádiograf).
- Základňa pre interpretáciu výsledkov (spôsoby priamej alebo nepriamej indikácie) [2].

Určenie použitia jednotlivých metód je vymedzené podmienkami pre aplikáciu danej metódy (prístup, príprava, fyzický kontakt, médium, druh materiálu) a požiadavkami na meraciu sondu a skúšaný predmet.

Úlohou jednotlivých nedeštruktívnych metód je zistenie parametrov a informácií o:

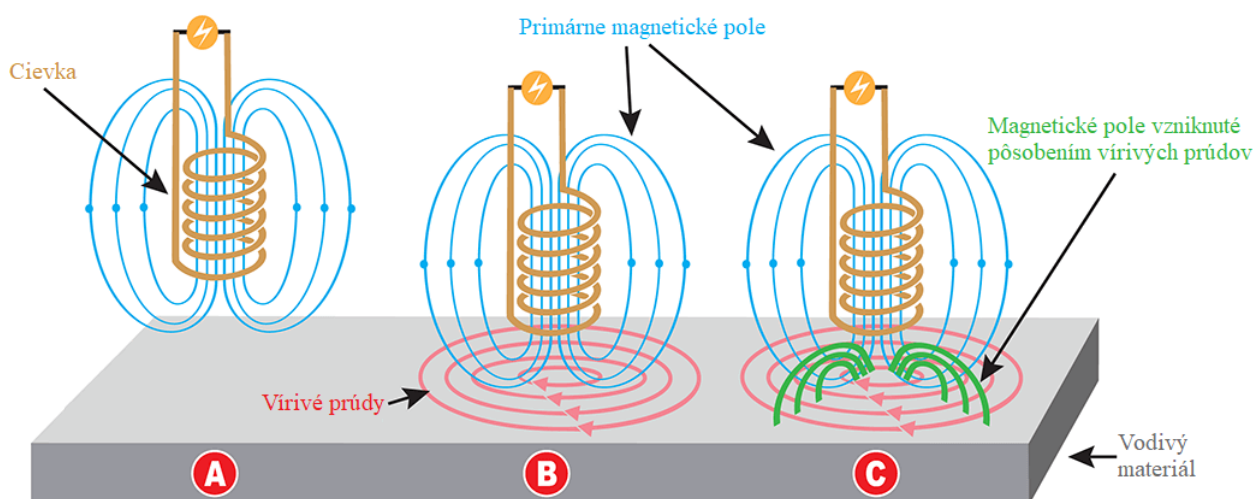
- Nespojivosti (trhliny, dutiny, štiepenie, vrstevnatosť).
- Štruktúre materiálu (kryštalická štruktúra, segregácia materiálu).
- Rozmery a metrológia (priemer, hrúbka, medzery, prerušovanie materiálu).
- Mechanické a fyzikálne vlastnosti (modul pružnosti, odrazivosť, vodivosť, rýchlosť šírenia zvuku v materiáli).

- Chemická analýza a zloženie (určenie zliatin, prímеси, nečistoty).
- Pnutie a namáhanie materiálu (nárast trhlín, zvyškové pnutie, opotrebenie, vibrácie).
- Rozbor zobrazenia (frekvenčné spektrum, obsah zobrazenia, rozloženie poľa).
- Neobvyklé zdroje tepla [2].

4.2 Princíp metódy vírivých prúdov

Pri nedeštruktívnej kontrole materiálov metódou vírivých prúdov sa využíva striedavé magnetické pole, ktoré vzniká napájaním budiacej cievky striedavým prúdom viz *Obr. 4.1* stav a) pričom sa využíva jav, pri ktorom má kontrolovaný materiál určitú magnetickú permeabilitu a elektrickú vodivosť.

V kontrolovanom objekte sa vplyvom striedavého magnetického poľa vytvoreného budiacou cievkou indukuje napätie. Skúšaný materiál predstavuje uzatvorený prúdový okruh, v ktorom sa následne indukujú vírivé prúdy viz *Obr. 4.1* stav b). Tieto indukované vírivé prúdy prechádzajú skrz skúšaný materiál a vytvárajú vlastné magnetické pole, toto magnetické pole je opačného charakteru a spätne pôsobí na pôvodné budiace magnetické pole viz *Obr. 4.1* stav c). Pôsobením primárneho magnetického poľa vytvoreného od budiacej cievky a vzniknutého magnetického poľa od pôsobenia vírivých prúdov vzniká výsledné magnetické pole, ktoré je určené vektorovým súčtom oboch polí.



Obr. 4.1 Vznik vírivých prúdov vo vodivom materiáli [15]

Výsledné magnetické pole je závislé na magnetickej permeabilite, elektrickej vodivosti a štruktúre kontrolovaného materiálu, ktorý zmení jeho elektrické a magnetické vlastnosti.

Ak sa v kontrolovanom vodivom materiáli nachádza defekt naruší sa tok vírivých prúdov vplyvom čoho dôjde k zmene magnetického poľa. Túto zmenu možno detegovať pomocou merania impedancie cievky. Amplitúda a fáza výsledného magnetického poľa poskytuje informácie o stave kontrolovaného materiálu [1], [2], [3].

4.3 Rozsah použitia a obmedzenia metódy

Aplikácia metódy kontroly vírivými prúdmi je možná len u elektricky vodivých materiálov. Svojim použitím sa radí medzi povrchovo-objemové metódy. Touto metódou možno merať a určiť vlastnosti ako napríklad magnetická permeabilita, elektrická vodivosť, pórovitosť a geometrické rozmery materiálu. Pri použití metódy ku kontrole objektu umožňuje odhaliť defekty v štruktúre materiálu ako aj povrchové a pod povrchové nečelivosti (trhliny, pórovitosť, prekryvanie vrstiev materiálu). Ďalej umožňuje poskytnúť informácie o hrúbke vodivej a nevodivej vrstvy, ktoré sú umiestnené na vodivom podklade [1].

Výhody kontroly vírivými prúdmi:

- Možnosť aplikácie na všetky druhy kovov, vodičov a zliatin.
- Presná hodnota merania vodivosti materiálu.
- Odhalenie malých nečelivostí.
- Vysoká rýchlosť kontroly.
- Jednoduchá automatizovateľnosť kontroly.
- Okamžité výsledky z merania.
- Použitie s prenosným vybavením.
- Možnosť kontroly horúcich súčastí.
- Nehrozí poškodenie kontrolovanej súčasti sondou, väzba je elektromagnetická.

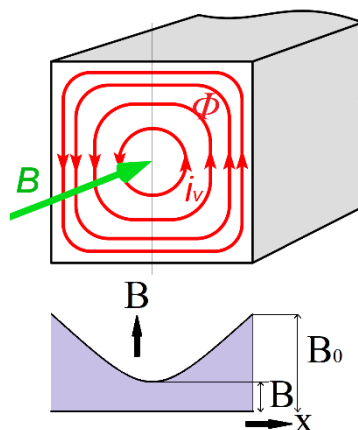
Nevýhody kontroly vírivými prúdmi:

- Metódu možno použiť len na vodivé materiály.
- Občasná zložitosť kontroly u niektorých feromagnetických materiáloch.
- Hĺbka prieniku vírivých prúdov je obmedzená, ich prienik do materiálu je závislý na frekvenciách.
- Pri kontrole rúrok je signál sčítaný z celého obvodu rúrky.
- Zložitosť kontroly na nepravidelných tvaroch.
- Pri veľmi malých defektoch v materiáli je problém s ich určením [1], [2], [3].

4.4 Povrchový jav

Vznik vírivých prúdov a ich účinok na vodivý feromagnetický materiál je zobrazený na obrázku *Obr. 4.2*. Elektrické pole ktoré je indukované striedavým magnetickým tokom Φ má indukčné čiary uzavreté v krivkách. Tieto krivky obopínajú časť striedavého magnetického toku, ktorý je kolmý k smere roviny magnetickej indukcie B . Indukované prúdy pôsobia proti striedavému budiacemu magnetickému toku, ktorý ich vyvolal, tento dej popisuje Lenzov zákon.

Magnetická indukcia B má najmenšiu hodnotu v strednej časti prierezu feromagnetického materiálu, ktorý je obopínaný všetkými krivkami indukovaných vírivých prúdov. Naopak povrchová vrstva feromagnetického materiálu nie je obopínaná žiadnou krivkou vírivého prúdu, preto je na povrchu najväčšia hodnota magnetickej indukcie B . Veľkosť tejto indukcie odpovedá indukciám B_0 od budiacej cievky ktorú vybudilo magnetické pole. Tento povrchový jav inak nazývaný aj Skin efekt spôsobuje zoslabenie magnetickej indukcie a zhusťovanie vírivých prúdov smerom do stredu materiálu, zatiaľ čo na jeho povrchu je magnetická indukcia najväčšia a vírivé prúdy nulové [2].



Obr. 4.2 Zobrazenie účinkov povrchového javu [14]

4.5 Rozdelenie snímačov vírivých prúdov

Z konštrukčného hľadiska sa od seba snímače vírivých prúdov líšia len na základe požiadavky na kontrolovaný objekt. Podľa druhu kontrolovaného objektu je dané zapojenie cievok, ich počet, celkový tvar a veľkosť snímača. Prakticky možno snímače vírových prúdov rozdeliť podľa zapojenia na dva základné typy a to na:

- absolútne
- diferenciálne

4.5.1 Absolútne snímače

Absolútne snímače obsahujú len jedno vinutie, ktoré slúži ako zdroj informácie pri kontrole. Vinutie môže byť tvorené len jednou cievkou, ktorá plní úlohu cievky vysielačky, ako aj prijímačky. Takýto snímač bude zaznamenávať zmenu napätia pri zmene odporu alebo indukčnosti kontrolovaného materiálu. Taktiež sa tento druh snímača zvyčajne používa k určeniu vlastností ako sú elektrická vodivosť a hrúbka povrchu kontrolovaného materiálu. Informácia o defekte kontrolovaného objektu sa prejaví ako zmena impedancie cievky. Z konštrukčného hľadiska sa medzi absolútne snímače radí aj snímač, ktorý obsahuje jednu meraciu cievku a dve geometricky oddelené budiacie vinutia. Výhodou takéhoto zapojenia je galvanické oddelenie oboch vinutí a tým aj oboch signálov. Nevýhodou je však malá citlivosť na jemné defekty a menšia tepelná nestabilita [1], [2].

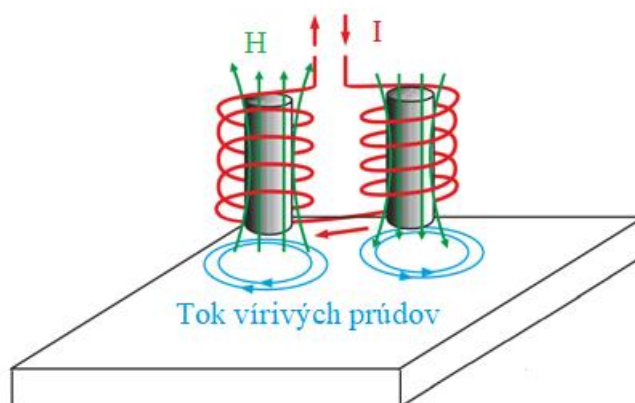
4.5.2 Diferenciálne snímače

Diferenciálne snímače sa vyznačujú tým že tento druh snímača má vždy dve cievky, ktoré slúžia ako zdroj informácie pri kontrole. Typ zapojenia s dvoma cievkami sa využíva pri kontrole s nízkymi frekvenciami pre feromagnetické materiály kde je požadovaná vysoká hodnota budiaceho magnetického poľa. Výhodou oddelených cievok je väčšia odolnosť na tepelné účinky v dôsledku Jaulových strát ktoré vznikajú vplyvom vírivých prúdov. Budiaci a merací obvod nemusí vždy obsahovať samostatne oddelené cievky.

Diferenciálne snímače môžu pracovať v režime samo-porovnávania alebo cudzieho porovnávania, tieto režimy sa líšia účelom použitia. Samo-porovnávací režim sa využíva predovšetkým v automatizovaných kontrolách k zisťovaniu trhlín. Snímač v tomto režime porovnáva dve blízke oblasti na jednej vzorke. Meracie cievky sú navinuté v opačných smeroch

proti sebe tak, aby sa indukované napätia vznikajúce od primárneho budiaceho poľa navzájom odčítali. Ak sa v kontrolovanom homogénnom materiáli nenachádza defekt, bude výsledné sekundárne napätie nulové. Pri určovaní trhlin sa vychádza z predpokladu, že hĺbka defektu je premenlivá.

V režime cudzieho porovnávania sa využíva referenčná vzorka ktorá slúži ako kompenzačný faktor. Porovnáva je jedna cievka z meracej sondy s druhou cievkou, ktorá je uložená na referenčnej vzorke. Veľkou výhodou je, že zmenou referenčnej vzorky meníme typ zisťovanej vlastnosti. Tento režim sa využíva k zisťovaniu stavu materiálu a určení fyzikálnych vlastností, ako napríklad magnetickej permeability a vodivosti. [1], [2].



Obr. 4.3 Princíp diferenciálneho zapojenia cievok v samo-porovnávacom režime [13]

4.6 Rozdelenie metód merania

Podľa usporiadania snímacích cievok sa snímače rozdeľujú vzhľadom ku kontrolovanému objektu na snímače s prechodovou cievkou a snímače s príložnou cievkou. Podľa tohoto usporiadania možno rozdeliť metódy na:

- metóda s prechodovou cievkou
- metóda s príložnou cievkou [2]

4.6.1 Metóda s prechodovou cievkou

Metóda s prechodovou cievkou využíva dve samostatné vinutia. Budiace a meracie vinutie je najčastejšie navinuté na plastovej trubke, ktorá tvorí nosič oboch vinutí, kontrolovaný predmet tvorí jadro takto vytvorenej cievky. Konštrukčne môže byť cievka zhotovená s vnútorným alebo vonkajším prechodom.

Striedavým prúdom napájané primárne budiace vinutie N_1 vytvorí striedavé magnetické pole, vplyvom čoho sa v kontrolovanom objekte budú následne indukovať vírivé prúdy. Povrchový jav má za následok, že magnetické pole v kontrolovanom objekte nie je rovnomerne rozložené. Pôsobením vírivých prúdov v kontrolovanom objekte vzniká vlastné magnetické pole, ktoré spätne pôsobí na pôvodné budiace magnetické pole. Následne sa vplyvom výsledného magnetického poľa bude na meracom vinutí N_2 indukovať striedavé napätie. Na veľkosť tohto napätia majú zásadný vplyv elektrické a magnetické vlastnosti kontrolovaného objektu, jeho geometrický tvar ale taktiež počet závitov cievky a veľkosť budiacej frekvencie prúdu.

Pri metóde s prechodovou vonkajšou cievkou kde kontrolovaný objekt je valcová tyč (o vonkajšom priemere d) umiestnená do vinutia snímača (s priemerom D) možno pri napájaní snímača striedavým prúdom určiť veľkosť indukovaného napätia na meracom vinutí podľa vzťahu:

$$\bar{E} = 2\pi f \cdot N_2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \bar{\mu}_{ef} \cdot \vec{H}_0 \cdot \frac{\pi d}{4} + \omega \cdot N_2 \cdot \mu_0 \cdot \vec{H}_0 \cdot \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}$$

kde : \bar{E} – indukované napätie na meracom vinutí (V),

ω – uhlová frekvencia (s^{-1}),

μ_0 – permeabilita vákua (H/m),

μ_r – relatívna permeabilita (-),

$\bar{\mu}_{ef}$ – efektívna permeabilita (-),

N_2 – počet závitov meracieho vinutia (-),

\vec{H}_0 – vektor intenzity magnetického poľa budiacej cievky (A/m),

d – vonkajší priemer tyče (m),

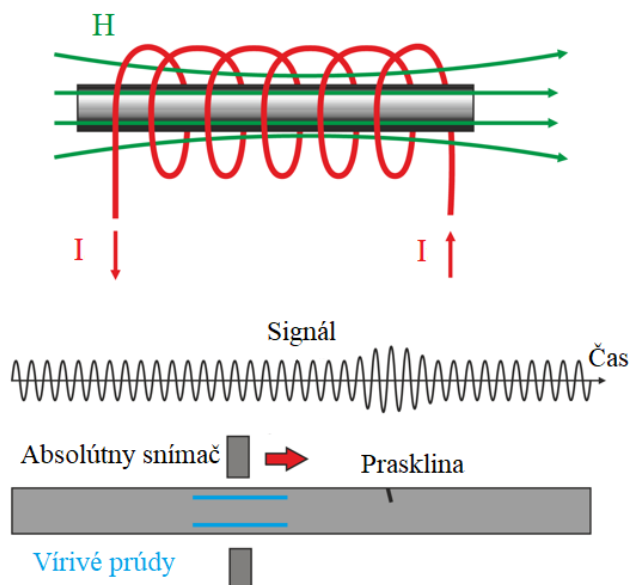
D – vonkajší priemer vinutia snímača (m).

Veľkosť indukovaného napätia určuje celkový magnetický tok. Pri jeho výpočte spolu s magnetickou indukciou sa uvažuje, že v celom priereze kontrolovaného objektu pôsobí povrchová intenzita magnetického poľa. Z toho vyplýva že v celom priereze objektu je konštantná efektívna permeabilita ktorá odpovedá teoretickému magnetickému poľu. Toto teoretické magnetické pole má konštantnú hodnotu v celom priereze a jeho účinky na meraciu cievku sú rovnaké ako pri radiálne rozloženom magnetickom poli.

Aby sa dosiahlo čo najväčšej zmeny indukovaného napätia pri zmene vlastností kontrolovaného predmetu, musí skúšaný predmet ovplyvniť čo najväčšiu časť magnetického poľa cievky. Preto je potrebné, aby koeficient zaplnenia, ktorý je daný ako pomer prierezu skúšaného predmetu k prierezu cievky bol v intervale od 0,7 do 0,9 zaplnenia. Táto hodnota je veľmi dôležitá z dôvodu určenia ideálnej vzdialenosti sondy nad kontrolovaním materiálom a tým prenikania vírivých prúdov na určené miesto a taktiež má význam, aby pri prechode kontrolovaného objektu sondou nedošlo k jeho zaseknutiu.

Ako už bolo uvedené pri tejto metóde sa využívajú dve zhodné cievky s budiacim a meracím vinutím. Po elektrickej stránke tieto cievky pracujú v diferenciálnom režime. Z technickej stránky môže byť budiaca a meracia cievka spojená v jeden merací systém alebo ich možno zapojiť ako dva oddelené celky. Výhodou oddelených cievok je citlivosť indukcie na lokálne rozdiely v nehomogenite, ako sú napríklad trhliny, tie sa nachádzajú vždy len pod jednou z cievok.

Pri spoločnom zapojení sa na jednom objekte pri prechode snímačom porovnávajú dve blízke oblasti. Pri oddelenom zapojení sa využívajú dva snímače, jeden slúži pre referenčný výrobok, zatiaľ čo druhým prechádza kontrolovaný výrobok. Ak majú kontrolované oblasti alebo oba výrobky rovnaké fyzikálne vlastnosti, sú indukované napätia na meracom vinutí snímača zhodné a rozdielové napätie bude nulové. Ak sa v kontrolovanom výrobku nachádza defekt alebo odchýlka, v materiáli vznikne rozdielové napätie, ktorého amplitúda a fáza vypovedá o type nezrovnalosti [1], [2], [4], [5].



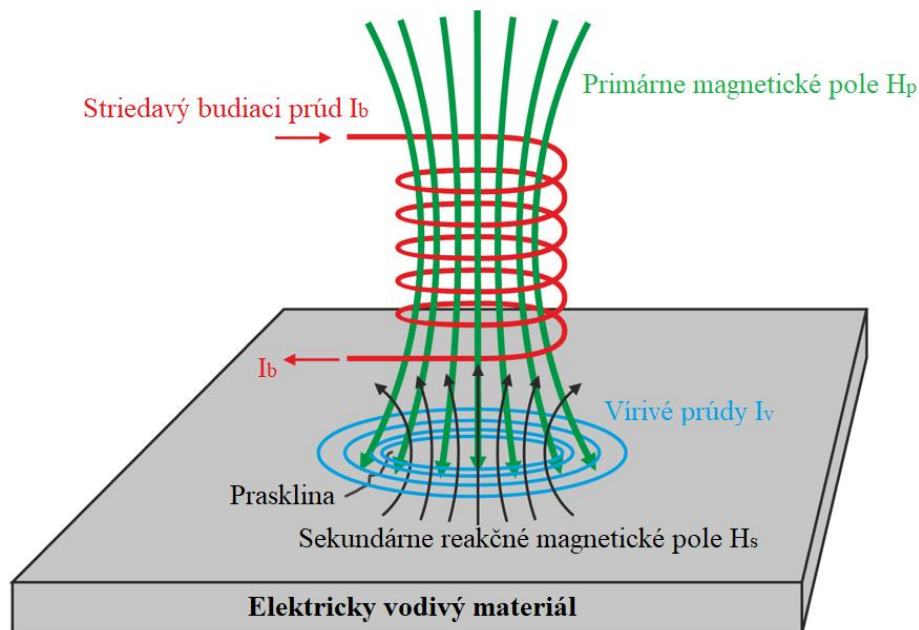
Obr. 4.4 Princíp metódy s prechodovou cievkou v absolútnom zapojení [13]

4.6.2 Metóda s príložnou cievkou

Spôsob kontroly metódou príložnej cievky sa predovšetkým využíva pri skúšaní plošných objektov, kde prechodovú sondu nemožno použiť buď z konštrukčných dôvodov (nejedná sa o trubky, tyče a pod.) alebo z dôvodu nedostatočnej citlivosti na lokálnu indikáciu defektov nachádzajúcich sa na povrchu kontrolovaného objektu. Pri tejto metóde má cievka omnoho obmedzenejšiu oblasť kontroly ako prechodová cievka. Veľkosť plochy, ktorá môže byť kontrolovaná je porovnateľná s rozmermi samotnej cievky. Z tohto dôvodu sa príložné cievky usporadúvajú do takzvaných panelov, ktoré majú väčšiu aktívnu plochu pri vykonávaní kontroly.

Snímač sa ku kontrolovanému povrchu materiálu prikladá radiálne, takže vzniknuté budiace magnetické pole od cievky napájanej striedavým prúdom je kolmé na povrch. Magnetické pole vzniknuté od pôsobenia vírivých prúdov v povrchu kontrolovaného objektu spätne pôsobí na príložnú cievku a spôsobuje identifikovateľnú zmenu jej impedancie.

Princíp je zobrazený na obrázku Obr. 4.5, kde budiaci prúd I_b v cievke vyvoláva magnetické pole H_p , ktoré indukuje v objekte vírivé prúdy I_v vytvárajúce vlastné sekundárne reakčné magnetické pole H_s . Vplyv spätného pôsobenia poľa opäť závisí na elektrických a magnetických vlastnostiach kontrolovaného objektu, ako tomu bolo pri prechodovej metóde avšak v tomto prípade hrá významnú rolu vzdialenosť sondy od kontrolovaného materiálu a jeho hrúbka. Oddialenie sondy od materiálu inak nazývané aj efekt oddialenia, možno využiť k meraniu hrúbky nevodivých vrstiev na vodivom podklade, naopak pri určení vodivosti a odhaľovaní trhlín je nutné tento efekt zmenšiť [1], [2], [4], [5].



Obr. 4.5 Princíp príložnej cievky [13]

Na základe zvolenej frekvencie merania a rozmerov cievky umožňuje metóda s príloženou cievkou určovať defekty v materiáli, merať hrúbku nevodivých vrstiev, na vodivom podklade zisťovať hrúbku vodivých fólií a bezkontaktné určiť vodivosť. Touto metódou možno určovať defekty vo feromagnetických ale aj neferomagnetických kovoch [5].

4.7 Vplyvy ovplyvňujúce metodiku kontroly

Metódu kontroly vírivými prúdmi a samotný postup merania ovplyvňuje rada faktorov, tieto faktory ovplyvňujú nielen kontrolovaný objekt, ale ja použitú sondu [1], [6].

4.7.1 Frekvencia

Voľba frekvencie primárneho budiaceho striedavého poľa zásadne ovplyvňuje identifikovateľnosť defektov a odlišiteľnosť rušivých šumov od potrebných signálov. Frekvencia taktiež zásadne ovplyvňuje hĺbku vnikania vírivých prúdov do materiálu. Pri kontrole povrchu sa volia vyššie frekvencie, zatiaľ čo pre pod-povrchovú kontrolu sa používajú nižšie frekvencie. Hĺbka vniku vírivých prúdov s je definovaná ako vzdialenosť od povrchu vodiča, v ktorej klesne prúdová hustota na 37 % z pôvodnej povrchovej hodnoty. Pre štandardnú hĺbku vniku vírivých prúdov s platí vzťah:

$$s = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}}$$

kde : s – štandardná hĺbka vniku (m),

ω – uhlová frekvencia (s^{-1}),

μ_0 – permeabilita vákua (H/m),

μ_r – relatívna permeabilita (-),

σ – merná elektrická vodivosť (S/m).

Ďalším parametrom, ktorý závisí na frekvencií je rýchlosť skúšania čiže rýchlosť posunu sondy alebo kontrolovaného vzorku. Rýchlosť kontroly musí byť prispôbená použitej frekvencii tak, aby skúšaný objekt bol vystavený celému kmitu a odhalil tak možné defekty. S týmto problémom sa možno stretnúť u automatizovaných linkách, kde je veľká rýchlosť skúšania a sú použité nízke frekvencie. Závislosť frekvenčnej odozvy na efektívnu šírku poľa sondy a rýchlosti pohybu popisuje vzťah:

$$f_0 = \frac{v}{h_{ef}}$$

kde : f_0 – frekvenčná odozva (Hz),

v – rýchlosť pohybu sondy (mm/s),

h_{ef} – efektívna šírka poľa sondy (mm) [1], [2], [6].

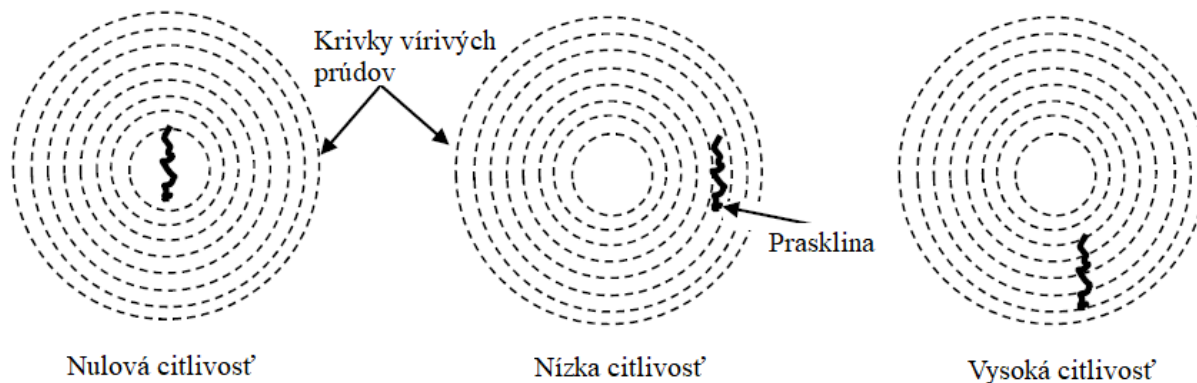
4.7.2 Elektrická vodivosť a magnetická permeabilita

Elektrická vodivosť je fyzikálna vlastnosť, ktorá vyjadruje schopnosť materiálu viesť elektrický prúd. V skúšanom materiály môžu nastať nežiadúce zmeny vodivosti ktoré sú spôsobené zmenou tvrdosti, mechanickým napätím alebo zmenou homogenity materiálu. Tieto zmeny vodivosti sa prejavujú v indukovaných vírivých prúdoch.

Zmena magnetickej permeability je značne ovplyvnená obsahom uhlíka a prítomnosťou feritu v kontrolovanom materiály. Zmena permeability sa prejaví zmenou magnetického poľa, ktoré ovplyvní impedanciu meracej cievky [1], [6].

4.7.3 Umiestnenie a orientácia defektu

Ako už bolo uvedené, pôsobením magnetického poľa sa vo vodivom materiáli vytvárajú uzatvorené krivky indukovaných vírivých prúdov, ktoré sa šíria materiálom. Intenzita magnetického poľa a vírivých prúdov klesá smerom od povrchu do stredu materiálu ako popisuje už spomenutý Povrchový jav. Ak sa v kontrolovanom materiáli nachádza defekt, vírivé prúdy tento defekt obtekajú, čím sa zvyšuje odpor tejto krivky, čo má za následok zmenšenie spätného magnetického poľa. Najväčšia zmena nastane ak je defekt kolmý na krivky vírivých prúdov, naopak ak je poloha defektu rovnobežná dochádza k najmenšej zmene a tým identifikácií defektu. Jednotlivé stavy sú zobrazené na obrázku *Obr. 4.6* [1], [6].



Obr. 4.6 Zobrazenie účinku povrchového javu [7]

4.7.4 Teplota

Teplota má zásadný vplyv na rezistivitu materiálu, tá vzrastá so stúpajúcou teplotou. Zmena rezistivity ovplyvňuje nielen vodivosť materiálu, ale aj vodivosť meracej cievky, so stúpajúcou teplotou bude ich vodivosť klesať. Pri rozmerovo dlhších kontrolovaných objektoch, kde sa ich teplota s dĺžkou pomaly mení, možno pozorovať postupnú zmenu odozvy na vírivé prúdy.

Keďže zmena teploty ovplyvňuje zmenu vodivosti, je nutné aby kontrolné sondy pracujúce v absolútnom režime mali rovnakú teplotu vo všetkých miestach vykonávania kontroly. Pri nesplnení tejto podmienky kontrola nie je platná. Tento problém však možno vyriešiť vložением absolútnej kompenzačnej cievky do obvodu sondy [1], [6].

4.8 Odhalenie necelistvostí a spôsob ich zobrazenia

Nameraný signál zo snímača vírivých prúdov môžeme zobraziť niekoľkými spôsobmi. Spôsob zobrazovania signálu závisí na type zapojenia snímača a kontrolovanom objekte, ale aj interpretácií výsledku merania. Spôsoby zobrazenia meraného signálu možno rozdeliť na:

- časové lineárne rýchle alebo pomalé zobrazenie,
- vektorové bodové zobrazenie,
- impedanční diagram, [2]

4.8.1 Časové lineárne zobrazenie

Pri tomto zobrazení sa na jednotke interpretujúcej meraný signál vychýľuje lúč vo vodorovnom smere v usporiadaní z ľavej strany do pravej, vo zvislom smere je lúč vychýľovaný meraným napätím. Vychýľovanie lúča sa deje konštantnou rýchlosťou.

Ak je na jednotke interpretujúcej signál potrebné zobraziť len jeden kmit meraného napätia, možno výšku sínusovky upraviť tak, aby bola zhodná s veľkosťou napätia a poloha na vodorovnej osi odpovedala osi fázového posuvu. Tento stav sa docieli zvýšením rýchlosti vodorovného vychýľovania.

Pri potrebe zobraziť meraný signál tak, aby lúč signálu na zobrazovacej jednotke priamo odpovedal dĺžke kontrolovaného objektu, je možnosť pomalého zobrazovania so zníženou rýchlosťou vodorovného vychýľovania [2].

4.8.2 Vektorové bodové zobrazenie

Pri vektorovom zobrazení plocha zobrazovacej jednotky predstavuje impedančnú rovinu. Počiatočný bod vektoru napätia sa nachádza na priesečníku osí v nulových súradniciach, jeho koncový bod je zobrazený v oblasti diagramu ako bod. Vzdialenosť koncového bodu od počiatočných súradníc zobrazuje amplitúdu napätia a jeho fázový posun je daný zvieraným uhlom s vodorovnou osou vo zvolenom smere vektorového diagramu [2].

4.8.3 Impedanční diagram

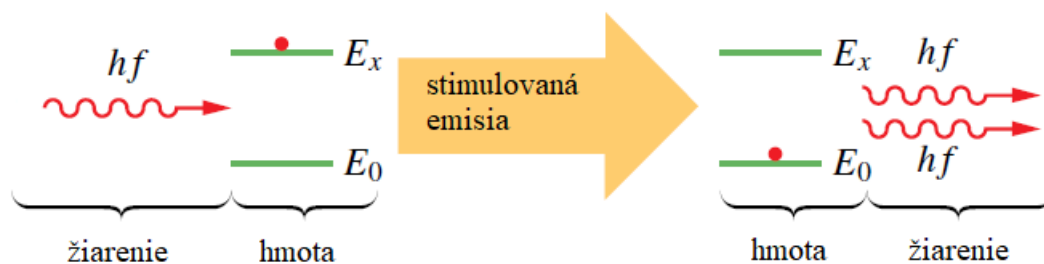
Ak sa vodivý materiál nachádza v oblasti cievky, mení sa jej impedancia. Zmena impedancie je daná elektromagnetickou väzbou, ktorá je medzi cievkou a kontrolovaným vodivým materiálom a je ovplyvnená tokom vírivých prúdov. Pri znížení koeficientu zaplnenia dôjde k poklesu väzby, čo má za následok zníženie citlivosti merania.

Normovanú impedanciu možno v komplexnej rovine reprezentovať vektorom, kde reálnu os tvorí odpor a imaginárna os je tvorená indukčnou reaktanciou. Tento vektor predstavuje polkruh s počiatkom v nulových súradniciach a koncovým bodom na osi s normovanou indukčnou reaktanciou.

Ak sa v kontrolovanom materiáli nachádza defekt, dochádza k zníženiu vodivosti a bod vektoru impedancie sa v impedančnom diagrame zmení. Pri zvýšení budiacej frekvencie dôjde k zníženiu impedančnej krivky [1].

4.9 Fyzikálny princíp lasera

Názov LASER pochádza z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, jedná sa teda o zosilnenie svetelného lúča stimulovanou emisiou žiarenia. Súčasťou každého lasera je takzvané aktívne prostredie. Aktívne prostredie je médium, v ktorom vďaka stimulovanej emisii dochádza k zosilneniu prechádzajúceho žiarenia. Stimulovaná emisia je jav, ktorý je spôsobený interakciou fotónu s molekulou alebo atómom. Pri tomto jave dochádza k dopadu žiarenia (fotónu) na atóm prvku, pričom vybudí elektrón v obale atómu na vyššiu energetickú hladinu E_x . Elektrón sa následne vráti do pôvodnej energetickej hladiny E_0 a prijatú energiu hf vyžiari do priestoru, tento dej je zobrazený na obrázku Obr. 4.7. Novo vzniknuté žiarenie má definovanú jednu vlnovú dĺžku, takže je monochromatické a zároveň je koherentné pretože jeho fotóny sa pohybujú vo zväzku jedným smerom [9], [10].



Obr. 4.7 Stimulovaná emisia [11]

4.10 Druhy laserov a ich použitie

V praxi existuje niekoľko typov laserov preto sa delia na základe typu aktívneho prostredia, spôsobu budenia, výkonu, účelu použitia a ďalších parametrov [9], [10].

Lasery možno rozdeliť podľa skupenstva látky ktoré je použité pre generovanie žiarenia v aktívnom prostredí:

- pevné,
- plynné,
- kvapalinové,
- polovodičové,
- plazmové.

4.10.1 Pevnolátkové lasery

U tohto typu lasera je aktívne prostredie tvorené pevným opticky prestupným dielektrikom, jedná sa o kryštalické alebo amorfné izolanty. Použitý materiál musí byť opticky prestupný, homogénny a taktiež umelo vyrobiteľný. Podľa použitého pevného materiálu sa rozlišuje:

- Rubínový laser, jedná sa o bežný typ lasera ktorý pracuje v pulznom režime a vyžaruje v infračervenom spektre, používa sa k vrtaniu tvrdých materiálov a v medicíne.
- Neodymový laser, tento laser pracuje v kontinuálnom režime a vyžaruje žiarenie o vlnovej dĺžke 1,064 μm . V dnešnej dobe patrí medzi najpoužívanejší typ pevnolátkového lasera, má využitie k vrtaniu, rezaniu, žíhaniu a zváraníu využíva sa taktiež v mikrochirurgii [10], [12].

4.10.2 Plynové lasery

Aktívne prostredie je u plyných laseroch tvorené atómami, molekulami alebo iontami. K budeniu dochádza pomocou elektrického výboja v plynnom homogénnom prostredí. Vďaka dokonale homogénnemu plynému prostrediu dosahujú tieto lasery výborné parametre a pracujú vo veľkom rozsahu vlnových dĺžok, väčšinou v kontinuálnom režime. Ich nevýhodou je dosiahnutie pomerne malého výkonu. Plynové lasery možno rozdeliť na:

- Excimerové lasery, ich aktívne prostredie je tvorené nestabilnými molekulami, vyžaruje v ultrafialovej oblasti a využíva sa predovšetkým v zdravotníctve.
- Molekulárne plynové, do tejto oblasti patrí napríklad CO_2 laser pracujúci v infračervenom spektre s vlnovou dĺžkou 10,6 μm . V jeho aktívnom prostredí sa nachádza zmes plynov CO_2 , He, N_2 . Tento typ lasera má vysokú účinnosť a vyžaruje veľké množstvo energie. Jeho využitie je pri popisovaní súčastí a nanášaní materiálových povlakov, okrem toho sa využíva aj pri vrtaní, zváraní a rezaní [10], [12].

4.10.3 Kvapalinové lasery

U kvapalinových laserov tvorí aktívne prostredie vodný alebo alkoholický organický roztok, ktorý obsahuje farbivo alebo kvapaliny obohatené iontami zo vzácnych zemín. Ich výhodou je dokonalá homogenita aktívneho prostredia, spektrum vyžarovaného svetla, možno plynule meniť zmenou farbiva roztoku. Využitie tohto typu lasera je v informačnej technike, spektroskopii a medicíne [10], [12].

4.10.4 Polovodičové lasery

U tohto typu lasera je aktívne prostredie tvorené polovodičovým materiálom obsahujúcim voľné nosiče náboja. Elektrický prúd, ktorý je injektovaný do PN prechodu vyvoláva v laserovej dióde stimulovanú emisiu. Výhodou polovodičových laserov je ich kompaktnosť, vysoká účinnosť a možnosť vyžarovať v širokom pásme vlnových dĺžok od ultrafialovej až po infračervenú. Nevýhodou je závislosť vyžarovaného spektra na teplote použitého polovodičového materiálu. Jeho využitie je vo výpočetnej technike, telekomunikáciách, popisovaní súčastí a tepelnom opracovaní materiálov [10], [12].

4.10.5 Plazmové lasery

Plazmové lasery generujú elektromagnetické spektrum v oblasti röntgenového žiarenia. Aktívne prostredie je tvorené uhlíkovým terčom, ktorý je ožarovaný CO_2 laserom využívajúcim pulzný režim. Využitie lasera je v odparovaní kovov s náročnou tavitelnosťou (wolfram, tantal) a pri výrobe plazmy [12].

4.11 Pracovné režimy lasera

Pri použití laserovej technológie pre odber materiálu sa v praxi využíva niekoľko pracovných režimov. Jednotlivé pracovné režimy sa uplatňujú pri rôznych materiáloch a pracovných postupoch. Hlavnú úlohu pri zvolení správneho pracovného režimu však hrajú požiadavky na tvar, rozmery a kvalitu odobraného materiálu. Bežne sa prakticky používajú dva typy pracovných režimov:

- gravírovanie,
- ablácia [16], [17]

4.11.1 Gravírovanie

Pri procese gravírovania sa nepoužívajú mechanické diely pre odber materiálu. Odber materiálu prebieha bezkontaktne pomocou laserového lúča. Pri tomto type pracovného režimu laser pracuje s krátkymi pulzmi. Vysoká hustota výkonu pri dopade na základný materiál spôsobí, že sa vrchná vrstva materiálu roztaví, odparí a rozloží. Laserový lúč týmto nahrádza mechanický diel a spôsobuje odber materiálu. Výhodou laserového gravírovania je možnosť vytvoriť presné hrany a jemné detaily. S tohoto dôvodu sa využíva aj pre popisovanie rôznych výrobkov a vytvorenie farebných oxidov [16], [17].

4.11.2 Ablácia

Pracovný režim ablácia využíva pre odber materiálu väčší priemer laserového zväzku než je tomu pri režime gravírovania. U tohto pracovného režimu dochádza k niekoľkým fázam pri odstavovaní materiálu. Pri dopade laserového zväzku na povrch materiálu dochádza k termickej emisii, a tým k excitácii elektrónov na povrch vzorku. Ďalšou fázou je tavenie povrchu a následné odparovanie materiálu, čím dôjde k vytvoreniu plazmového oblaku. Interakciou plazmy s povrchom dochádza k ďalšiemu odstráneniu materiálu. K tomuto typu odstraňovania materiálu je nutné dodať teplo, ktoré prekročí skupenské teplo varu. Využívajú sa predovšetkým vlnové dĺžky v oblasti infračerveného spektra. Výhodou je možnosť použitia tohoto typu pracovného režimu na široké spektrum materiálov [18], [19].

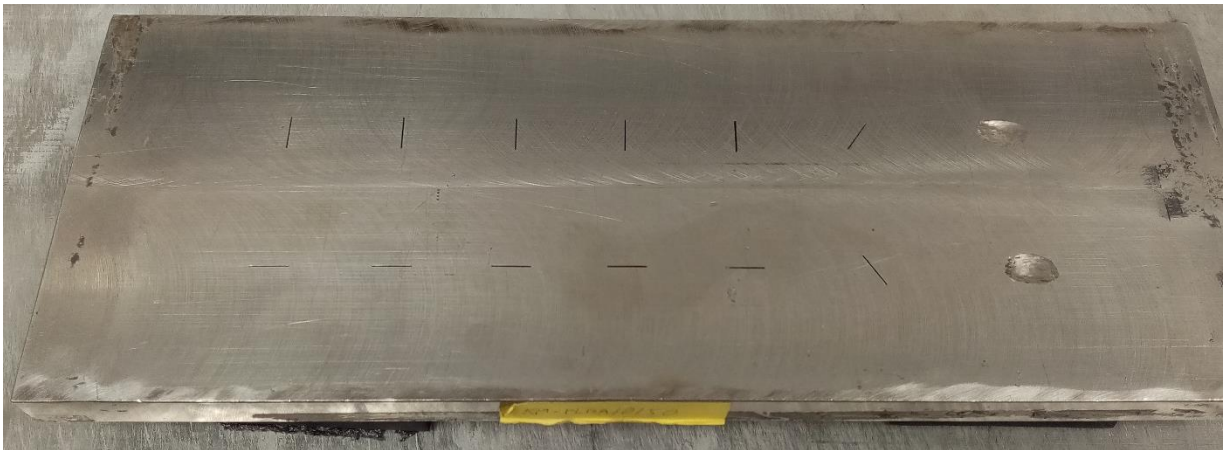
5 VÝROBA KALIBRAČNÝCH MIEROK

Táto kapitola sa zaoberá technológiou výroby testovacích mierok pomocou laserovej technológie. Testovacie mierky budú následne slúžiť ako podklad pre výrobu kalibračnej mierky, ktorá bude použitá pri meraní vírivými prúdmi.

5.1 Výroba plochých kalibračných mierok

K výrobe kalibračnej mierky, ktorá bude použitá ako etalónový výrobok slúžiaci ku kalibrácii sond pre metódu merania vírivými prúdmi je najskôr potrebné navrhnuť a vyrobiť pokusné a testovacie mierky.

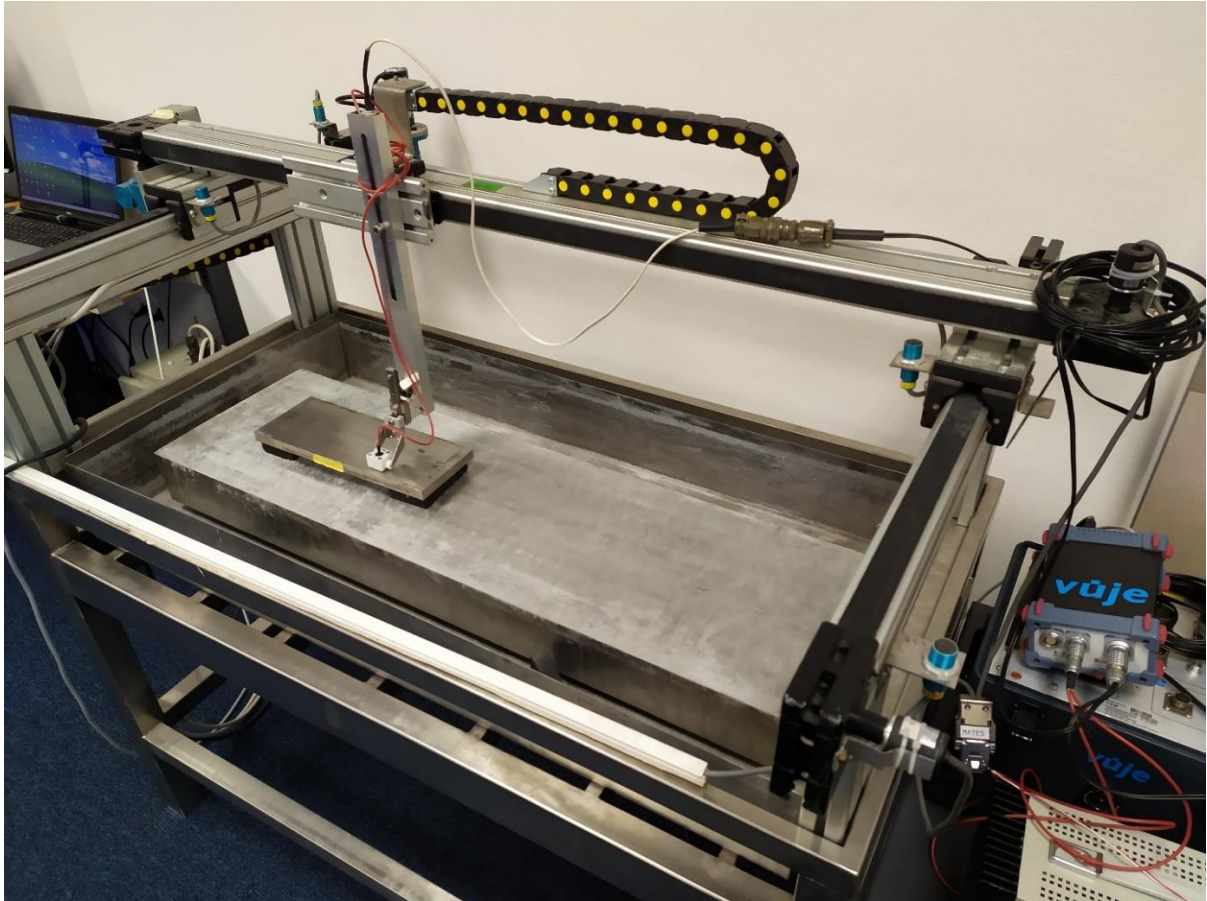
Testovacia mierka slúži k vývoju a následnej výrobe kalibračnej mierky. Pre jej výrobu bola zvolená laserová rastrovacía technológia. Táto mierka bude navrhnutá na základe už existujúcej a používanej kalibračnej mierky vyrobenej technológiou vyiskrovaním grafitovou elektródou. Pre výrobu testovacej mierky je najskôr potrebné nakonfigurovať merací prístroj a zmerať doposiaľ používanú kalibračnú mierku vyrobenú vyiskrovaním. Po aplikácii merania metódou vírivých prúdov sa na základe získaných dát vytvorí v programe Inventor návrh testovacej mierky, ktorá bude následne vyhotovená laserovou rastrovaciou technológiou.



Obr. 5.1 Kalibračná mierka vyrobená vyiskrovaním

5.1.1 Meranie plochej kalibračnej mierky

Pre meranie doposiaľ používanej kalibračnej mierky je najskôr potrebné nakonfigurovať merací prístroj, nazývaný Manipulátor testovania sond (MATES). Toto zariadenie poslúži k meraniu metódou vírivých prúdov a to pomocou dvoch typov príložných sond s vnútorným usporiadaním cievok do tvaru x a $+$. Takéto usporiadanie cievok je z dôvodu zachytenia defektov, ktoré majú rôzny smer. Použitý softvér k zobrazeniu dát TEDDY je od firmy TECHATOM, meranie prebiehalo v module programu pre zariadenie ET BOX 2i.



Obr. 5.2 Zachytenie priebehu merania kalibračnej mierky vyrobenej vyiskrovaním

5.1.1.1 Konfigurácia meracieho prístroja

- Určenie počiatkových súradníc merania.

Presun meracieho prístroja a samotnej kontrolnej sondy v ručnom režime na budúcu počiatkovú meraciu oblasť. Pomocou programu následne vynulovať súradnice a určiť počiatkový bod merania [0; 0].

- Určenie oblasti merania.

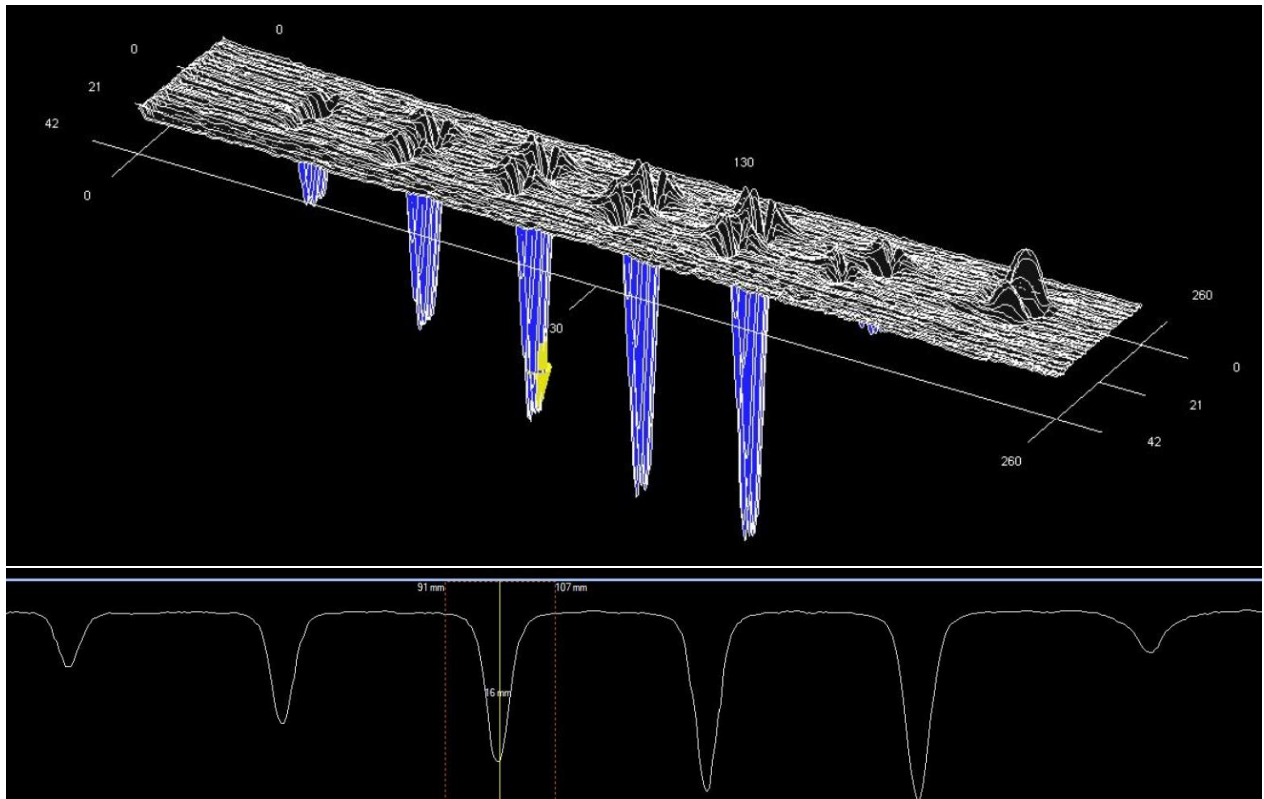
Pre určenie skúšobnej oblasti na kalibračnej mierke, po ktorej sa bude pohybovať snímač, je potrebné nastaviť oblasť merania so súradnicami [260 mm; 85 mm]. Pre kontrolu je zvolená rýchlosť posunu sondy v osi X 40 mm/s a v osi Y sa snímač bude pohybovať rýchlosťou 5 mm/s, s krokom merania v oboch smeroch 0,5 mm.

- Voľba meracej frekvencie.

Po určení oblasti merania je potrebné zvoliť meracie frekvencie. Meracie frekvencie sú stanovené na základe prepočtu hĺbky vniku vírivých prúdov do materiálu a vlastností jednotlivých sond. Zvolené meracie frekvencie sú 50 kHz, 80 kHz, 120 kHz a 200 kHz. Hlavná meracia frekvencia je 120 kHz, pri tejto hodnote je veľmi dobrá citlivosť na vonkajšie defekty. Frekvencie 50 kHz, 80 kHz a 200 kHz slúžia ako pomocné, doplnkové pre spoľahlivé určovanie typu chýb a odlišovanie kvantifikovaných indikácií od nekvantifikovaných.

Pred spustením samotného merania na kalibračnej mierke je potrebné namerať materiál v mieste bez defektu. Tento údaj posluží ako takzvaná hardvérová nula (vyváženie signálov od

jednotlivých cievok do vzájomnej rovnováhy), s ktorou budú následne porovnané namerané hodnoty. Namerané hodnoty po spustení merania sú zobrazené formou časového priebehu napät'ovej odozvy viz obrázok *Obr. 5.3*.



Obr. 5.3 Časový priebeh napät'ovej odozvy

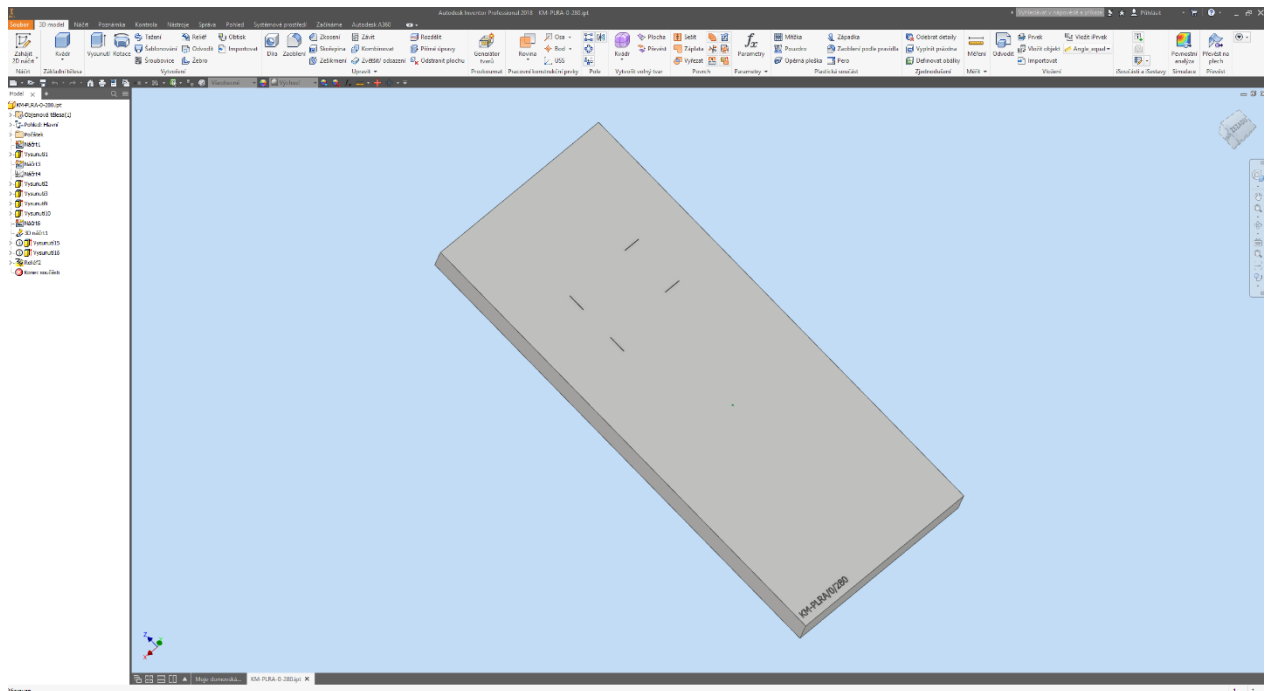
5.1.2 Návrh plochej testovacej mierky

Návrh testovacej mierky vychádza z doposiaľ používanej kalibračnej mierky vyrobenej vyiskrovaním. Údaje z merania kalibračnej mierky a samotné defekty slúžia ako podklad pri návrhu testovacej mierky.

Navrhnutá testovacia mierka je vytvorená v programe Inventor od spoločnosti Autodesk. Testovacia mierka obsahuje štyri pokusné defekty, ktoré možno vidieť na *Obr. 5.4*. Všetky navrhnuté defekty nazvané ako drážky majú dĺžku 10 mm, s požadovanou šírkou 0,2 mm a rôznu hĺbku. Minimálna hĺbka navrhnutej drážky je 1 mm, maximálna hĺbka drážky je 4 mm. Presné údaje o navrhnutej testovacej mierke sa nachádzajú v tabuľke *Tab. 5.1*.

Tab. 5.1 Technické údaje navrhnutej mierky

Technické označenie KM-PLRA-0-280	Rozmery: dĺžka x šírka x hĺbka [mm]
Mierka	270 x 115 x 15
Drážka č.1	10 x 0,2 x 1
Drážka č.2	10 x 0,2 x 2
Drážka č.3	10 x 0,2 x 3
Drážka č.4	10 x 0,2 x 4
Materiál mierky	08CH18N10T



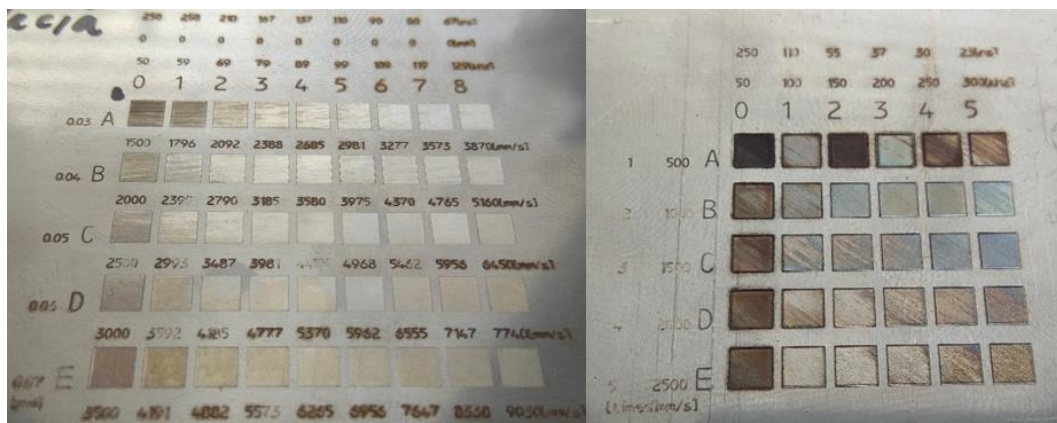
Obr. 5.4 Navrhnutá plochá testovacia mierka

5.1.3 Výroba plochých testovacích mierok laserom

Výroba testovacích mierok laserom bola realizovaná v spoločnosti TRUMPF, v laboratóriu využívajúcu laserovú techniku v meste Košice. Pre výrobu bolo použité zariadenie TruMark Station 5000 s výkonom 5 kW obsahujúcim pevnolátkové aktívne prostredie.

Pred zvolením pracovných parametrov pre výrobu drážok boli otestované dva pracovné režimy s názvom gravúra a ablácia. Oba režimy boli použité v kombinácii s rôznymi parametrami laseru ako sú napríklad frekvencia impulzu, trvanie impulzu, hatching (šrafovanie lúčom) a rýchlosť prechodu laserového lúča po materiáli.

Výsledky tohto testu boli vizuálne pozorované a skúšané s použitím zväčšovacej aparatúry a hodnotená bola kvalita drážky, natavenie hrán drážky a pretavenie alebo slabé natavenie materiálu. Na záver bola hodnotená účinnosť použiteľnosti laseru na daný materiál. Pokusy oboch pracovných režimov s rôznymi parametrami sú zobrazené na obrázku Obr. 5.5, kde sa na ľavej strane obrázka nachádza pokus z testovania ablácie a na pravej strane je zobrazený pokus gravúry.



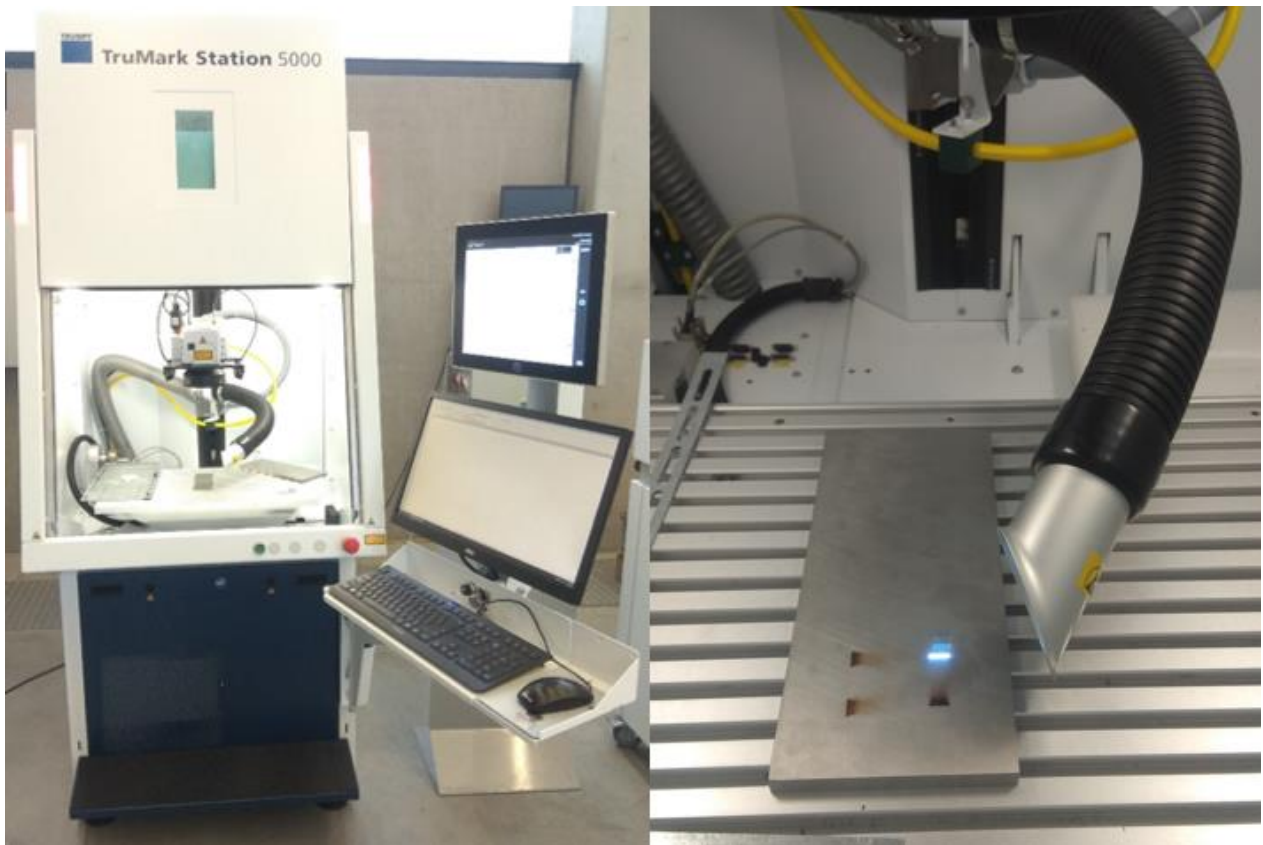
Obr. 5.5 Test pracovných režimov

Po zhodnotení výsledkov z oboch pracovných režimov bol pre výrobu testovacej mierky zvolený pracovný režim ablácia. Použité pracovné parametre pre výrobu štyroch drážok boli dĺžka impulzu 250 ns, frekvencia impulzu 50 kHz, šrafovanie 0,03 a rýchlosť posuvu lúča 1500 mm/s.

Pri výrobe pokusných drážok vždy laser vykonal niekoľko krokov. Tento krok v sebe zahŕňal 200 prechodov lúčom po zvolenej trajektórii drážky a zmenu vzdialenosti šošovky od vzorky o 0,2 mm v uhle 90 °. Popis počtu krokov a celkového počtu prechodov lúčom po jednotlivých drážkach je uvedený v tabuľke *Tab. 5.2*.

Tab. 5.2 Parametre krokov pri výrobe laserom

Číslo drážky	Počet krokov	Celkový počet prechodov lúča
1.	7	1400
2.	11	2200
3.	13	2600
4.	16	3200



Obr. 5.6 Použitý laser TruMark Station 5000

5.1.4 Úprava testovacích vzoriek

Pre kontrolu vyrobených testovacích vzoriek pod mikroskopom za účelom posúdenia kvality vyhotovenia drážok bolo nutné vykonať niekoľko krokov. Tieto kroky popisujú nutné technologické úpravy, ktoré boli vykonané na testovacích mierkach vyhotovených laserom. Všetky kroky technologickej úpravy boli vykonané v laboratóriách štruktúrálnej analýzy firmy VUJE.

5.1.4.1 Výrez testovacích mierok

Na povrchu vyrobených testovacích vzoriek laserom sa v okolí drážok nachádzali skondenzované pary odstraňovaného kovu a strusky. Tieto nežiadúce oxidy materiálu boli odstránené brúsnym leštiacim papierom so zrnitosťou 4000.

Po predbežnej povrchovej úprave testovacej mierky sa jednotlivé drážky zo základného materiálu vyrezali pomocou elektroiskrovej drôtovej rezačky. Táto rezačka využíva pre rezanie neustále sa odvíjajúci mosadzný drôt v kombinácii s elektrickým oblúkom. Prostredie rezania je chladené demineralizovanou vodou, pričom rezaný objekt musí byť elektricky vodivý. Výsledkom je rez s presnosťou 1 μm . Použitá elektroiskrová drôtová rezačka je zobrazená na obrázku *Obr. 5.7*.



Obr. 5.7 Elektroiskrová drôtová rezačka

5.1.4.2 Metalografické spracovanie mierky

Po vyrezaní drážok boli mierky zalisované do termoplastu, povrch s drážkou bol špeciálne zbrúsený a vyleštený pre potreby kontroly mikroskopom. Zalisovanie mierky do termoplastu prebehlo v zariadení Struers LaboPress-3, vyrezaná drážka sa umiestnila do spodnej časti formy do ktorej sa umiestnili dva druhy termoplastu výrobného názvu RESIN. V zariadení následne prebehol cyklus ohrevu po dobu siedmich minút s teplotou 180 $^{\circ}\text{C}$ po ktorom nasledovalo chladenie zatavenej drážky.

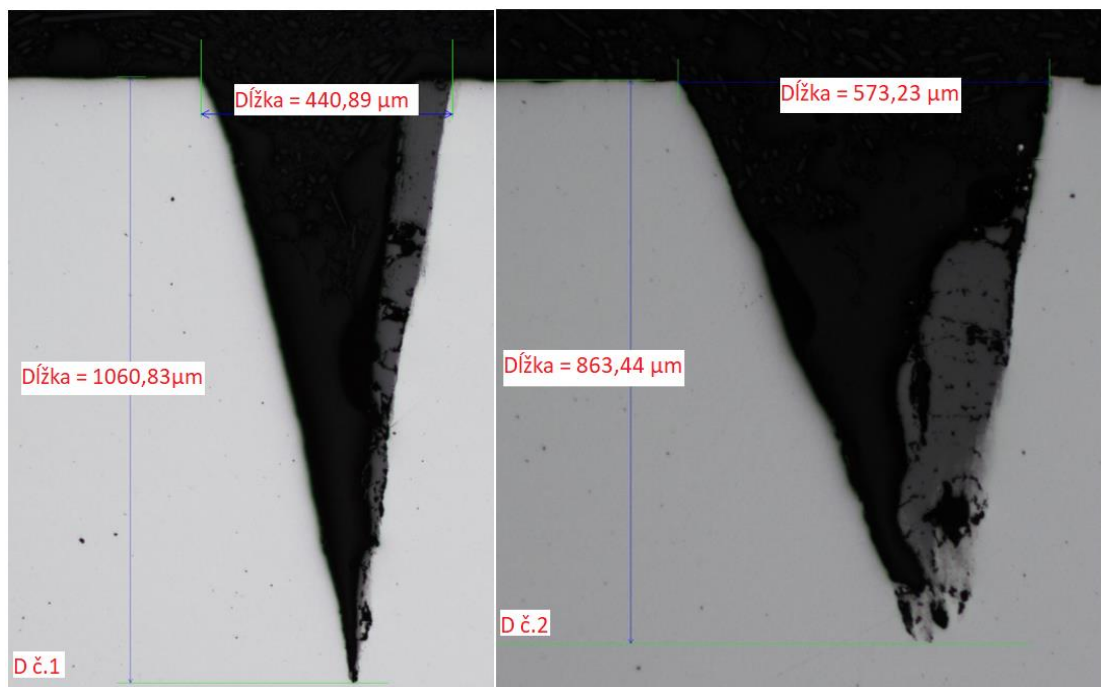
Vzniknuté kapsle s drážkou v spodnej časti sa podrobili niekoľkým cyklom brúsenia s použitím brúsneho papiera so zrnitosťou od 400 do 1200. Po brúsení nasledovali dva druhy leštenia povrchu na zariadení Struers LaboPol-5 s leštiacim kotúčom a diamantovou suspenziou s finálnou zrnitosťou 3 a 1 μm , pre veľmi dobré odstránenie prípadných nedokonalostí na povrchu drážky. Výsledné vzniknuté kapsle s drážkou sa nachádzajú na obrázku *Obr. 5.8*.



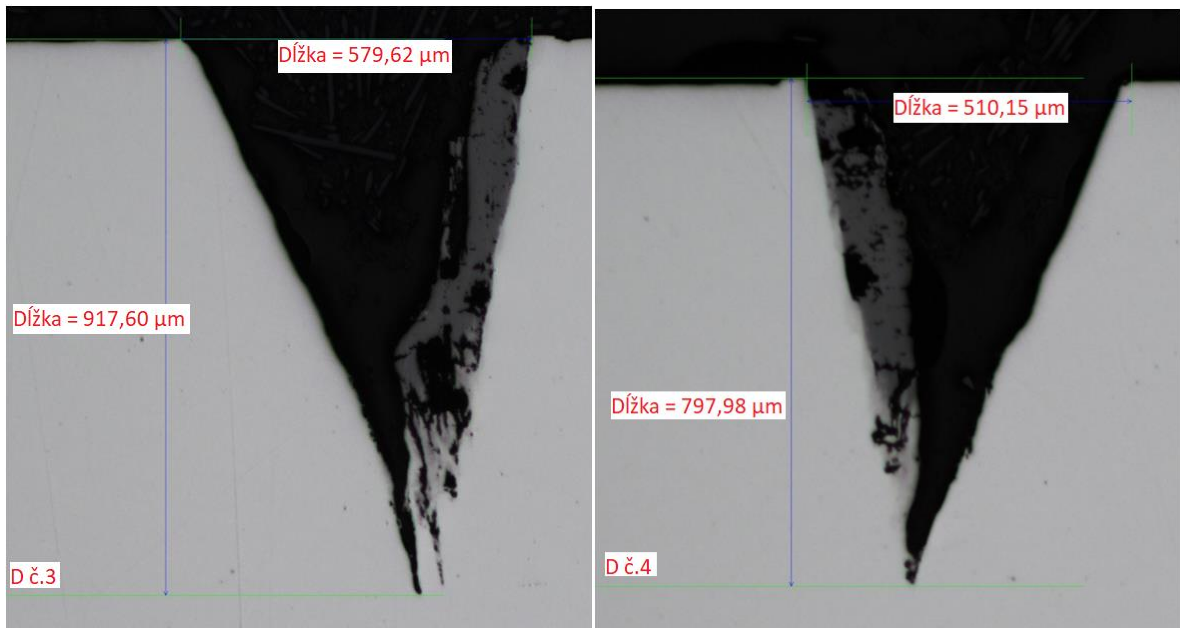
Obr. 5.8 Kapsle s drážkou

5.1.4.3 Kontrola mikroskopom

Kontrola vyrobených drážok s upraveným povrchom prebehla na svetelnom invertovanom optickom mikroskope Nikon MA200. Vyhodnotenie kontroly drážok pomocou mikroskopu ukázalo, že vyrobené drážky pomocou lasera nespĺňajú nami kladené požiadavky na hĺbku drážky a predovšetkým na najdôležitejší parameter a to šírku tejto drážky.



Obr. 5.9 Zobrazenie drážky č.1 a č.2 mikroskopom



Obr. 5.10 Zobrazenie drážky č.3 a č.4 mikroskopom

5.1.5 Zhodnotenie výroby plochej testovacej mierky

Hlavným požiadavkám na výrobu drážky laserom bola šírka drážky s veľkosťou 0,2 mm pri rôznych hĺbkach. Týmto pokusom sa prišlo k zisteniu že do väčších hĺbok materiálu sa pri danej šírke nemožno dostať. Odparovaný materiál sa nemá možnosť z hĺbky drážky odpariť a zostáva v drážke kde sa neustále pretavuje.

Porovnanie údajov o požadovaných rozmeroch drážok a o skutočne dosiahnutých rozmeroch sa nachádzajú v tabuľke Tab. 5.3.

Tab. 5.3 Porovnanie rozmerov drážok

	Požadované rozmery		Dosiahnuté rozmery	
	Hĺbka	Šírka	Hĺbka	Šírka
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Drážka č.1	1	0,2	1,0608	0,4408
Drážka č.2	2	0,2	0,8634	0,5732
Drážka č.3	3	0,2	0,9176	0,5796
Drážka č.4	4	0,2	0,7979	0,5101

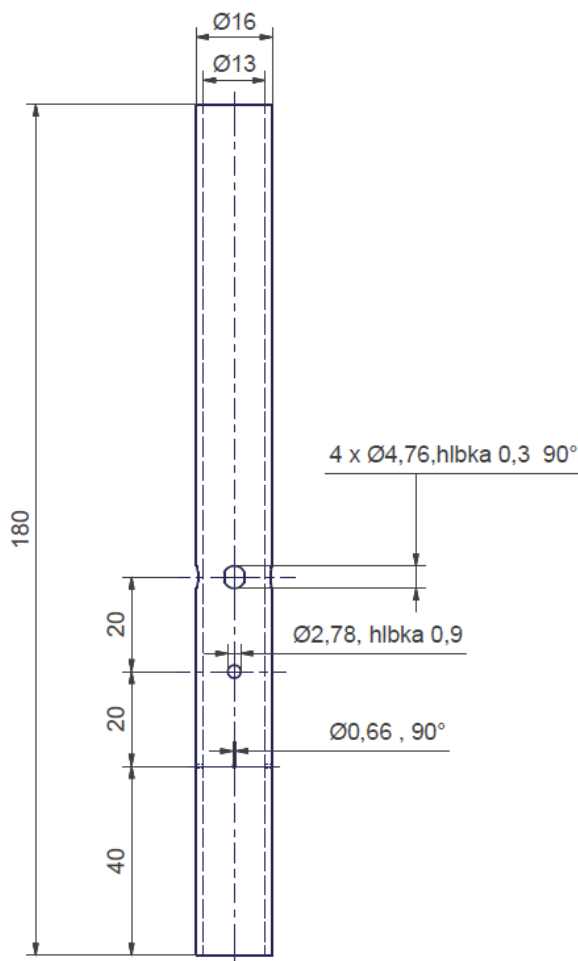
5.2 Výroba valcových kalibračných mierok

Z poznatkov získaných v kapitole 5.1.5 vyplýva, že vhodnejšie použitie laseru by bolo pri vytváraní defektov s väčšími povrchovými rozmermi a menšou hĺbkou. Tento typ umelo vytvorených defektov možno uplatniť pri výrobe valcovej kalibračnej mierky. Defekty na mierke takéhoto typu sú okrúhleho charakteru s plochým dnom, ich účelom je simulovať mechanické poškodenia rúrok. Príklad takéhoto poškodenia je opotrebenie vznikajúce pri vibráciách rúrky o podperný systém rúrok tepelných výmenníkov. Tento spôsob opotrebenia sa nazýva „Fretting“ mechanické opotrebenie materiálu vplyvom pohybu rúrok pod podperou.

Rádus rúrky spôsobuje, že opotrebenie nie je v celom obvode v rovnakej hĺbke od vonkajšieho povrchu rúrky. Z tohto dôvodu boli pre ďalšiu výrobu zvolené mierky valcového charakteru s väčšou odoberanou plochou, ktoré majú uplatnenie pri kalibrácii sondy typu bobbin používanej pri meraní vírivými prúdmi na teplovýmenných rúrkach parogenerátora.

5.2.1 Návrh valcovej testovacej mierky

Navrhnutá valcová testovacia mierka odpovedá valcovej kalibračnej mierke používanej v praxi. Navrhnutie valcovej testovacej mierky prebehlo v programe Inventor od spoločnosti Autodesk. Testovacia mierka obsahuje šesť pokusných defektov, ktoré možno vidieť na obrázku *Obr. 5.11*. Navrhnuté defekty sú okrúhleho charakteru: defekt č.1 s priemerom 0,66 mm má 100 % prienik skrz materiál, defekt č.2 má priemer 2,78 mm s 60 % úbytok materiálu steny trubky, defekt č.3 sa štyrikrát pravidelne opakuje po obvode mierky a jeho priemer je 4,76 mm s 20 % úbytkom materiálu. Materiál mierky je oceľ 08Ch18N10T.



Obr. 5.11 Navrhnutá valcová testovacia mierka

5.2.2 Výroba valcových pokusných vzoriek laserom

Pred výrobou valcovej mierky bolo vytvorených niekoľko pokusných vzoriek. Tieto vzorky slúžia k overeniu použiteľnosti lasera pre výrobu defektu simulujúceho korózne poškodenie rúrok. Korózia vstupuje do materiálu približne rovnako po celom obvode rúrky. Defekt sa odlišuje rádiusom dna, ktoré odpovedá rádiusu rúrky.

Pre výrobu pokusných vzoriek bolo použité zariadenie TruMark 1110 o výkone 1100 kW, s pevnolátkovým aktívnym prostredím. Použité pracovné parametre pre výrobu piatich defektov boli frekvencia impulzu 20 kHz, rýchlosť posuvu lúča 100 mm/s, veľkosť bodu v ohnisku 70 mikrometrov. Pri výrobe defektu laser vykonal niekoľko opakovaní prechodu po zvolenej trajektórii s prírastkom uhla šošovky 17 °. Požadované rozmery a počet opakovaní prechodu laserového lúča pre jednotlivé defekty je uvedený v tabuľke Tab. 5.4.

Tab. 5.4 Výrobné parametre pokusných vzorkou

Číslo dielu	Defekt	Priemer [mm]	Hĺbka [mm]	Počet opakovaní
D1	č.1	0,66	1,5	20
D2	č.1	2,78	0,9	30
	č.2	2,78	0,9	40
D3	č.4	4,76	0,3	40



Obr. 5.12 Valcové pokusné vzorky vyrobené laserom

Pre kontrolu dosiahnutých rozmerov defektov na valcových pokusných vzorkách vyrobených laserom bol použitý merací nástroj výchylkomer. Príklad z merania rozmerov je uvedený na obrázku Obr. 5.13, dosiahnutá presnosť hĺbky defektu č.2 je 94 %, odchýlka od požadovanej hodnoty je 6 %. Výsledok použitia laseru pre výrobu defektu s väčšou odoberanou plochou ale menšou hĺbkou vykazuje dobrú presnosť pri vytváraní požadovaných rozmerov.



Obr. 5.13 Meranie výchylkometerom

5.2.3 Výroba valcovej testovacej mierky laserom

Pre výrobu valcovej testovacej mierky laserom boli využité laboratóriá laserovej techniky, v Nemecku patriace spoločnosti TRUMPF. K výrobe bolo použité zariadenie TruMark Station 5000 s laserom TruMark 5050 o výkone 5 kW obsahujúcim pevnolátkové aktívne prostredie. Valcová testovacia mierka bola vyrobená podľa návrhu nachádzajúceho sa v kapitole 5.2.1.

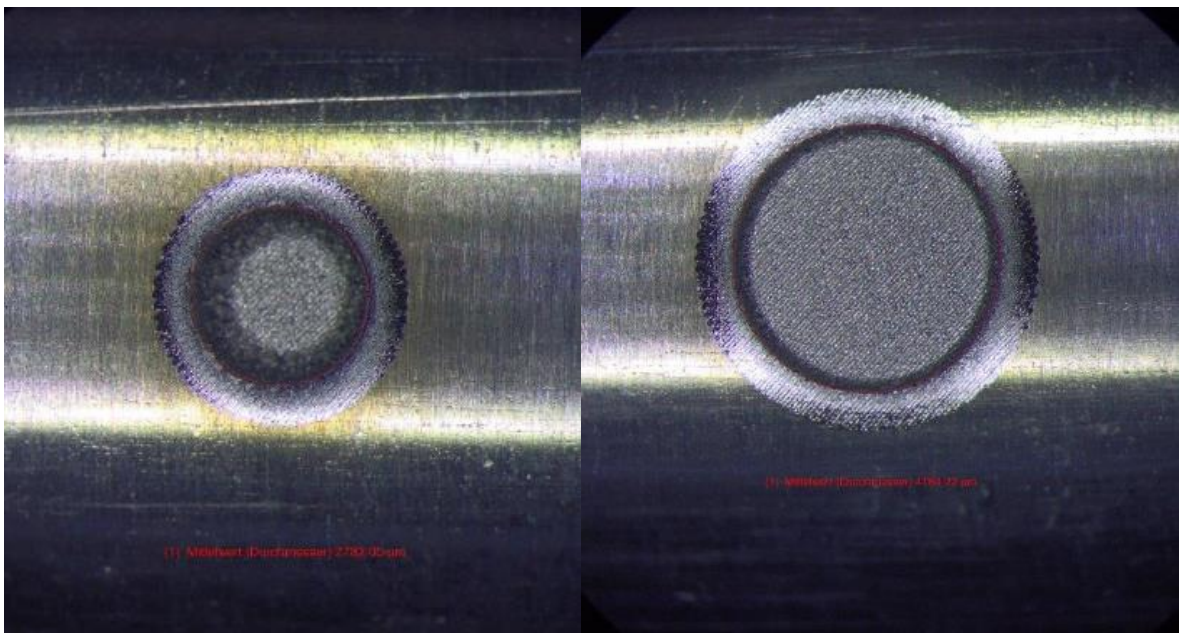


Obr. 5.14 TruMark Station 5000 s laserom TruMark 5050

Použitý pracovný režim pre výrobu bol gravúra, bližšie údaje o dĺžke impulzu lasera, frekvencií impulzu, šrafovaní alebo rýchlosti posunu lúča spoločnosť neuviedla. Celková doba výroby defektov bola približne päť minút a zahrňovala aplikáciu laserového lúča v niekoľkých krokoch a rotáciu mierky pre zmenu uhlu dopadu lúča k vytvoreniu plochého dna defektu. Konečný postup výroby zahŕňal použitie čistiaceho parametru lasera pre odstránenie nečistôt na defekte a v jeho blízkom okolí. Vyrobená mierka je zachytená na obrázku *Obr. 5.15*, na obrázku *Obr. 5.16* sa nachádzajú detailné pohľady na defekt č.2 (60 % úbytok materiálu) a č.3. (20 % úbytok materiálu).



Obr. 5.15 Valcová testovacia mierka vyrobená laserom



Obr. 5.16 Detailný pohľad na defekt č.2 a defekt č.3

5.2.4 Výroba valcovej testovacej mierky metódou vyiskrovania

Pre potrebu porovnania a určenia relevantnosti výsledkov získaných z valcovej testovacej mierky vyrobenej laserom, bola vyrobená valcová testovacia mierka metódou vyiskrovania. Výroba testovacej mierky bola realizovaná v spoločnosti Supratek s.r.o., ktorá sa nachádza v meste Trnava. Valcová testovacia mierka bola vyrobená podľa návrhu nachádzajúceho sa v kapitole 5.2.1.

K výrobe mierky bola použitá technológia vyiskrovania so zahĺbením elektródy. Táto technológia využíva elektro-erózne obrábanie materiálu pomocou elektródy. Obrábaný materiál musí byť elektricky vodivý. Ako nástroj obrábania je použitá elektróda, ktorá sa približuje

k materiálu, následkom čoho dôjde k preskoku iskry. Iskra odparí s povrchu obrábaného mierky malú časť materiálu. Veľkosť odstráneného materiálu závisí od veľkosti elektrického prúdu použitého pre vznik iskry. Z dôvodu zabránenia vzniku elektrického oblúku je potrebné intenzívne chladenie v okolí elektródy.



Obr. 5.17 Valcová testovacia mierka vyrobená metódou vyiskrovania

5.2.4.1 Kontrola valcovej testovacej mierky

Kontrola dosiahnutých rozmerov defektov na valcovej testovacej mierke vyrobenej metódou vyiskrovania prebehla pomocou meracieho nástroja výchylkomera. Výsledný rozmer pre daný defekt je maximálna hodnota niekoľkých opakovaných meraní. Porovnanie údajov o požadovaných rozmeroch defektov a o skutočne dosiahnutých rozmeroch sa nachádzajú v tabuľke Tab. 5.5.

Tab. 5.5 Porovnanie rozmerov valcovej mierky

	Požadované rozmery		Dosiahnuté rozmery	
	Hĺbka	Priemer	Hĺbka	Priemer
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Defekt č.1	1,5	0,66	1,5	0,69
Defekt č.2	0,9	2,78	0,93	2,86
Defekt č.3	0,3	4,76	0,32	4,86

Z porovnania požadovaných a nameraných rozmerov defektov vyplýva že táto metóda je veľmi presná. Použitím iskry pre odstránenie materiálu sa dosiahlo hlavného požiadavku na hĺbku pri zachovaní požadovaného tvaru defektu.

6 KALIBRÁCIA MERANIA METÓDOU VÍRIVÝCH PRÚDOV

Táto kapitola je zameraná na meranie metódou vírivých prúdov na testovacích mierkach vyrobených laserom a na mierkach vyrobených vyiskrovaním. V kapitole je ďalej uvedené porovnanie získaných údajov z merania a ich zhodnotenie.

6.1 Meranie plochých testovacích mierok vyrobených laserom

Meranie na testovacej mierke vyrobenej laserom prebehlo obdobným spôsobom ako na kalibračnej mierke vyrobenej vyiskrovaním. Pre meranie bolo použité zariadenie Manipulátor testovania sond (MATES) s dvoma druhmi príložných meracích sond s vnútorným usporiadaním cievok v tvare x a +. Použitý softvér k zobrazeniu dát bol opäť TEDDY od firmy TECHATOM, meranie prebiehalo v module programu s prístrojom ET BOX 2i.

Postup konfigurácie meracieho prístroja bol taktiež obdobný a skladal sa z niekoľkých bodov:

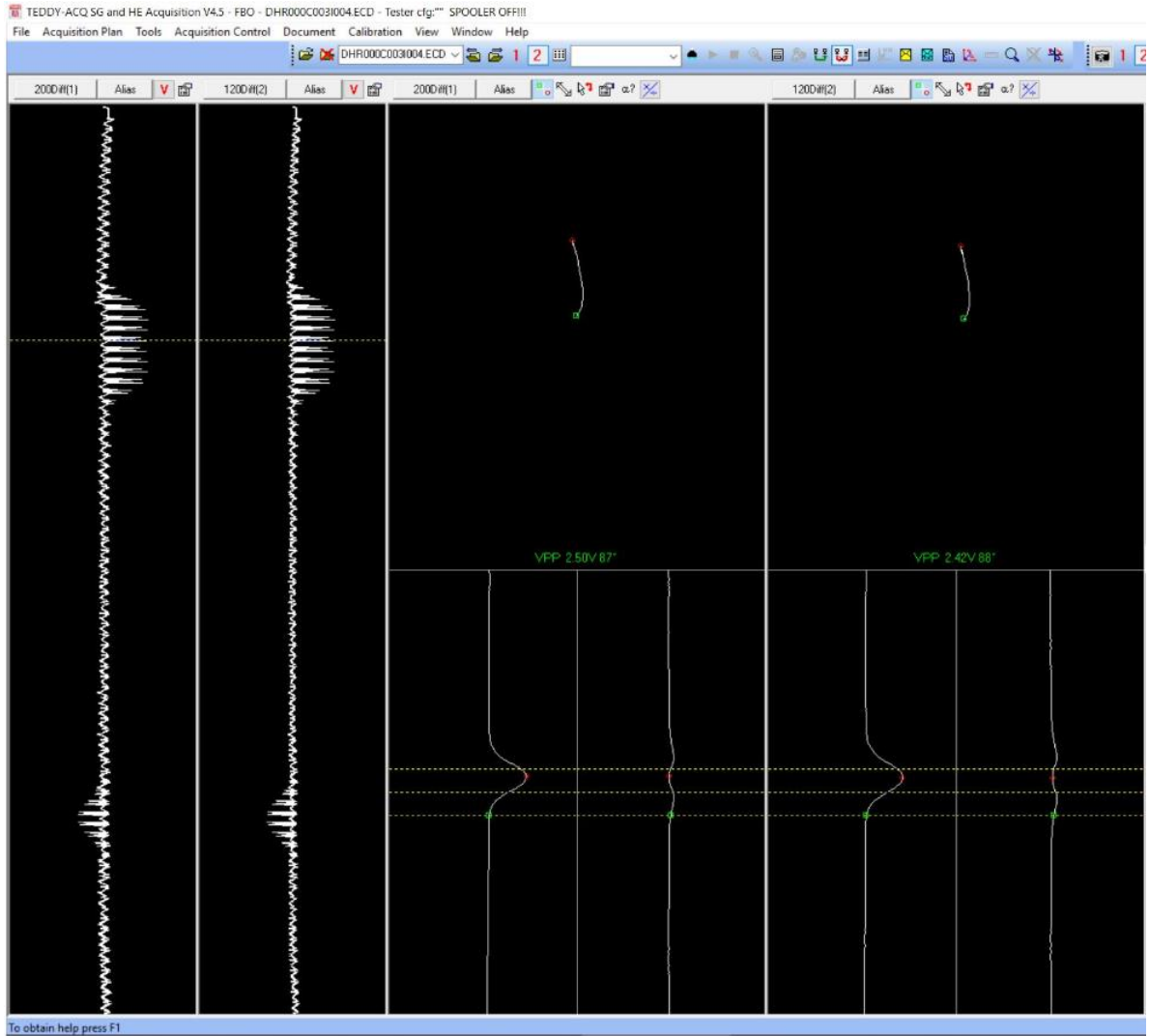
- Určenie počiatočných súradníc merania.
- Určenie oblasti merania.
- Voľba meracej frekvencie.

Po meraní mierky nasledovalo nastavenie interpretácie nameraných signálov. Toto nastavenie prebehlo pomocou dát nemeraných na pôvodnej kalibračnej mierke vyrobenej vyiskrovaním. Pre interpretáciu bol využitý ako referenčný umelý defekt č.9 s rozmermi drážky 0,2 x 10 x 2 mm. Čo predstavuje 10 mm dĺžku drážky, 2 mm hĺbku a 0,2 mm šírku drážky. Kalibrácia signálu drážky s fázou 90 ° a amplitúdu 5 V, čím sa nameranému signálu prisúdila požadovaná veľkosť odozvy.

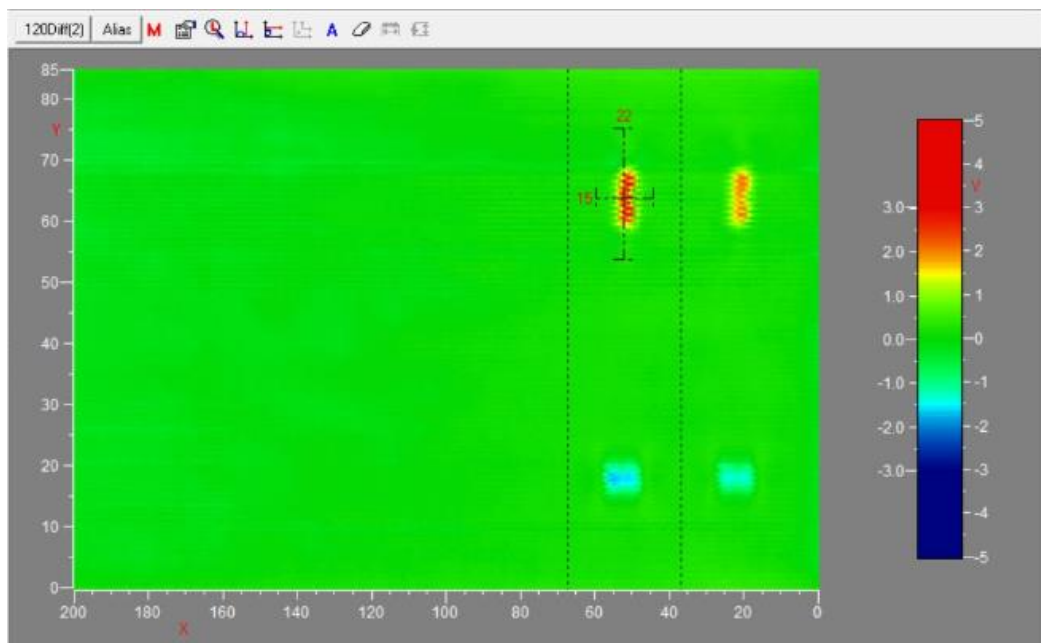
6.1.1 Porovnanie nameraných údajov plochej mierky

Získané údaje z merania na vyiskrenej mierke a na mierke vyrobenej laserom sú vo forme časového priebehu napät'ovej odozvy a vo forme C-scan celej nameranej oblasti. Z časového priebehu napät'ovej odozvy je pre porovnanie významná oblasť v strede časového priebehu, konkrétne oblasť v maxime odozvy, kde amplitúda dosahuje najväčšej hodnoty pre daný priebeh signálu. Táto oblasť odpovedá drážke na mierke, ktorá tvorí najväčšiu prekážku pre tok vírivých prúdov. Namerané údaje vo forme C-scan prehľadne zobrazujú amplitúdu signálu. Zmena hrúbky materiálu znamená zmenu prekážky pre tok vírivých prúdov a vplyv na amplitúdu signálu.

Príklad zobrazenia nameraných údajov z mierky vyrobenej laserom sa nachádzajú na obrázkoch *Obr. 6.1*, *Obr. 6.2*. Na obrázku *Obr. 6.1* sa na ľavej časti nachádza časový priebeh napät'ovej odozvy umelého defektu č.2 pre meracie frekvencie 120 kHz a 200 kHz. Na pravej strane obrázka *Obr. 6.2* sa nachádza detailný pohľad na amplitúdu signálu v maxime odozvy.



Obr. 6.1 Časový priebeh napät'ovej odozvy mierky vyrobenej laserom (drážka č.2)



Obr. 6.2 C-scan mierky vyrobenej laserom (drážka č.2)

Porovnanie údajov získaných meraním kalibračnej vyiskrenej plochej mierky a plochej mierky vyrobenej laserom sa nachádzajú v tabuľke Tab. 6.1. Pri porovnaní drážky č.2 vyrobenej laserom s drážkou č.8 na kalibračnej mierke možno pozorovať že jej napät'ová odozva na vírivé prúdy je veľmi podobná. Avšak drážka č.8 na kalibračnej mierke má polovičnú šírku ako drážka vyiskrená. Túto skutočnosť je možno odôvodniť tým že drážka vyrobená vyiskrovaním sa postupne rozširuje smerom do materiálu a drážka vyrobená laserom je širšia na povrchu a postupne sa zužuje do hĺbky materiálu. Z toho vyplýva, že úbytok materiálu je rovnaký a táto drážka sa teda javí ako rovnaká prekážka pre tok vírivých prúdov. U ostatných drážok táto zhoda nenastala a ich napät'ová odozva pri porovnaní s kalibračnou mierkou je veľmi malá.

Tab. 6.1 Porovnanie nameraných údajov

Plochá kalibračná mierka vyrobená vyiskrením (Etalon)						
Použité meracie frekvencie [kHz]		50	80	120	200	Rozmery drážok [mm]
Napät'ová odozva [V]	Drážka č.1	2,73	2,81	2,78	2,92	1 x 0,2
	Drážka č.8	2,22	2,38	2,44	2,57	1 x 0,2
	Drážka č.2	5,7	5,37	5,16	5,06	2 x 0,2
	Drážka č.9	5	5	5	5	2 x 0,2
Plochá testovacia mierka vyrobená laserom						
Použité meracie frekvencie [kHz]		50	80	120	200	Skutočné rozmery drážok [mm]
Napät'ová odozva [V]	Drážka č.1	1,53	1,57	1,55	1,65	1,0608 x 0,4408
	Drážka č.2	2,35	2,44	2,42	2,5	0,8634 x 0,5732
	Drážka č.3	1,53	1,42	1,46	1,52	0,9176 x 0,5796
	Drážka č.4	1,86	1,75	1,8	1,89	0,7979 x 0,5101

Týmto pokusom sa prišlo k poznatku že použitie lasera na výrobu úzkych drážok na plochom materiáli nie je vhodné. Laser dobre napodobil morfológiu trhlín, ale má obmedzenia v dosiahnutí požadovaných rozmerov. Drážky vyrobené laserom nedosiahli nami požadovanú hĺbku pri zadanej šírke drážky. Odparovaný materiál sa nemá možnosť z väčšej hĺbky drážky odpariť a zostáva v drážke vo forme oxidov.

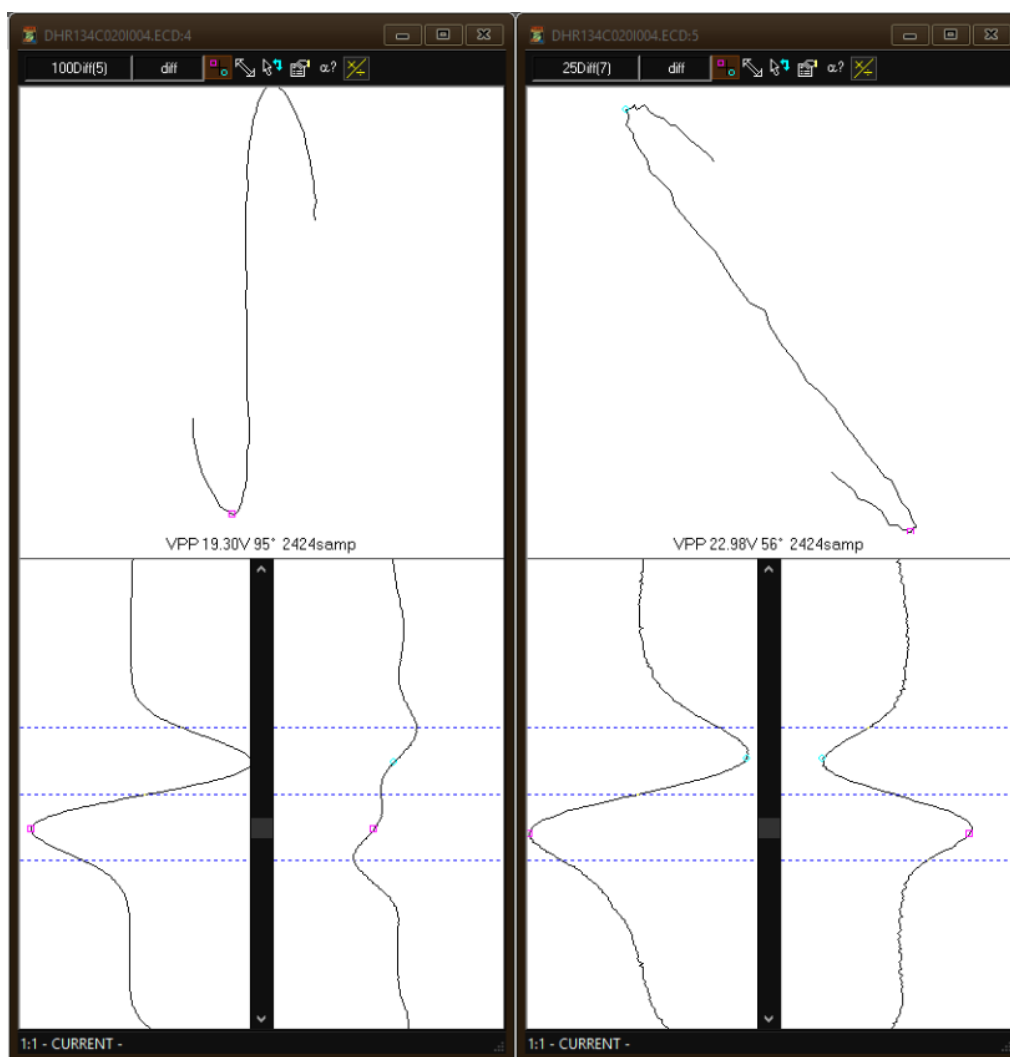
6.2 Meranie valcovej testovacej mierky vyrobenej vyiskrovaním

Meranie na valcovej testovacej mierke prebehlo pomocou prechodovej vírivo prúdovej sondy typu bobbin s označením OD3-PGR-11,5. Použitá rýchlosť posunu sondy trubkou bola 400 mm/s zo vzorkovacíou frekvenciou merania 920 vzoriek/s. Zvolené meracie frekvencie pre meranie boli 25 kHz, 100 kHz, 200 kHz a 400 kHz. Použité frekvencie boli zvolené na základe vniku vírivých prúdov do materiálu a pokrývajú celú hrúbku materiálu. Použitý softvér k zobrazeniu dát bol TEDDY od firmy TECHATOM, meranie prebiehalo v module programu s prístrojom ET BOX 2i. Rovnakým postupom prebehlo meranie na valcovej kalibračnej mierke vytvorenej vyiskrovaním (Etalon), získané údaje z tohto merania následne poslúžia pri porovnaní nameraných údajov.

Po prebehnutí merania nasledovala interpretácia nameraných dát. K interpretácii boli použité údaje získané z merania na etalone ako referenčný bol zvolený defekt č.1. Referenčný defekt č.1 predstavuje 100 % prienik skrz materiál s priemerom otvoru 0,66 mm. Pre požadovanú veľkosť odozvy sa použila kalibrácia signálu s fázou 40° a amplitúda 10 V.

6.2.1 Porovnanie nameraných údajov valcovej mierky vyrobenej vyiskrovaním

Údaje získané z merania na valcovej mierke a na valcovej kalibračnej mierke sú vo forme diferenciálneho priebehu. Pre jeden defekt existujú vždy štyri priebehy odpovedajúce štyrom zvoleným meracím frekvenciám. Potrebné informácie získané z jednotlivých priebehov sú amplitúda výstupného napätia sondy a fázový posun tohto napätia. Príklad zobrazenia získaných údajov z merania sa nachádza na obrázku *Obr. 6.3*. Na obrázku sa nachádzajú dva diferenciálne priebehy pre použitú frekvenciu merania 25 kHz a 100 kHz, obe odpovedajúce defektu č.1 s 20 % úbytkom materiálu.



Obr. 6.3 Diferenciálny priebeh signálu pre defekt č.1, meracia frekvencia 25 kHz, 100 kHz

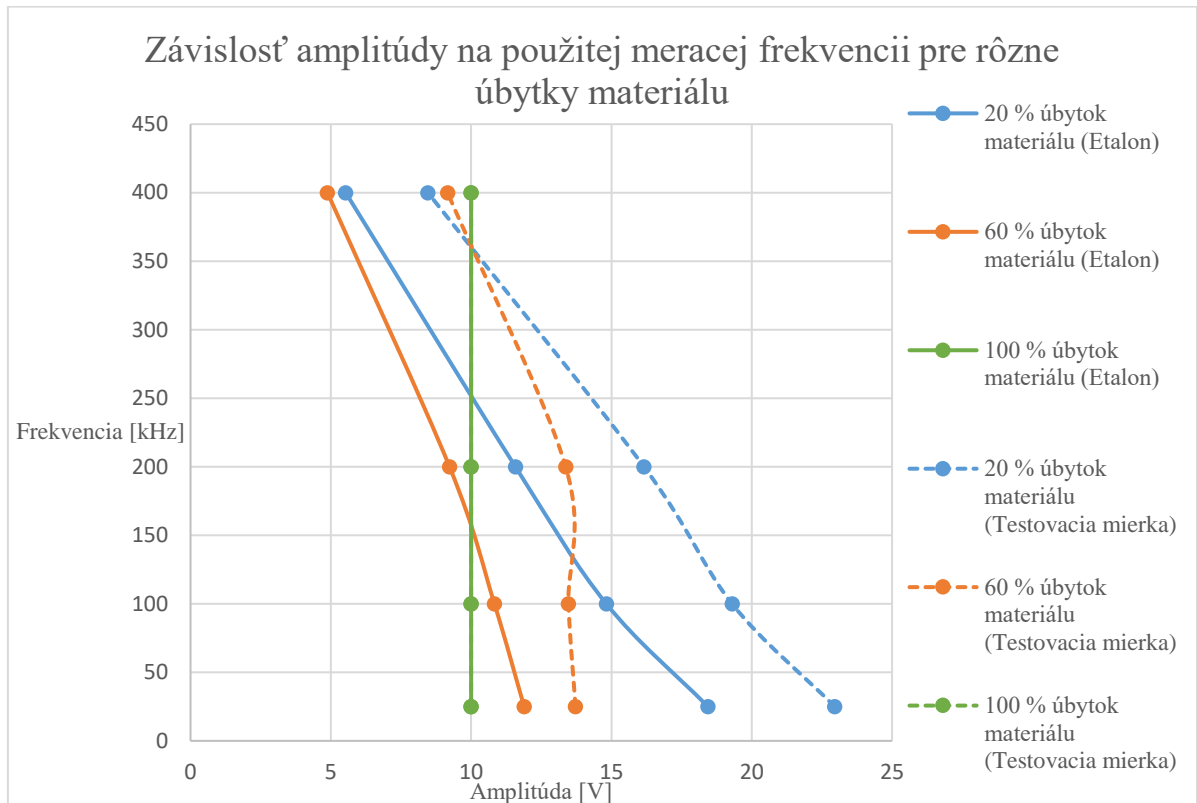
Porovnanie získaných údajov z merania vírivými prúdmi na valcovej kalibračnej mierke a na valcovej testovacej mierke vytvorenej vyiskrovaním sa nachádzajú v tabuľke *Tab. 6.2*. Namerané hodnoty sa od seba mierne odlišujú, táto odlišnosť je spôsobená rozdielmi v rozmeroch. Rozdiel v hĺbke defektu medzi požadovanými a nameranými rozmermi viz *Tab. 5.5*, sa pohybuje

v rozmedzí 0,02 mm až 0,03 mm. Tento rozdiel ovplyvňuje odlišnosť medzi hodnotami fázy signálu. Rozdiel v odbere materiálu, čiže priemer defektu zasa ovplyvňuje amplitúdu signálu.

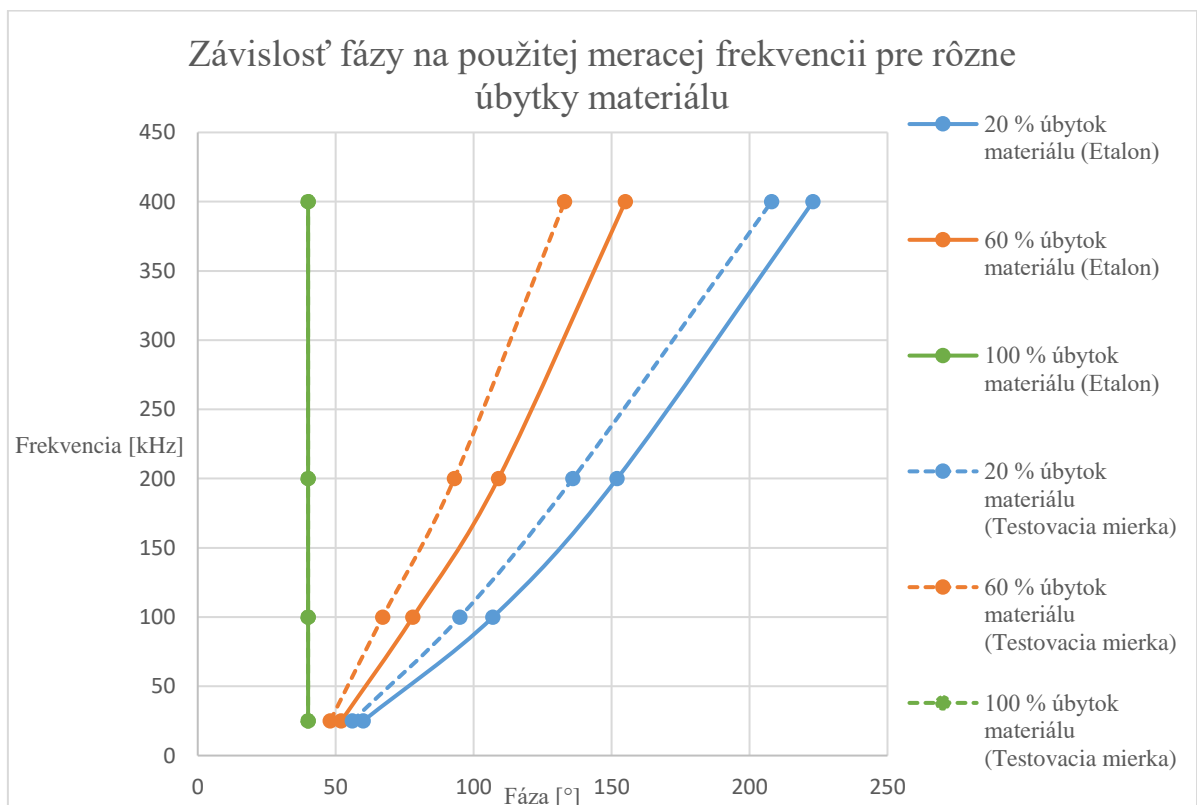
Tab. 6.2 Porovnanie nameraných údajov signálov valcovej mierky

Valcová kalibračná mierka vyrobená vyiskrením (Etalon)						
Použitá meracie frekvencie [kHz]	Defekt č.1 100 % úbytok materiálu		Defekt č.2 60 % úbytok materiálu		Defekt č.3 20 % úbytok materiálu	
	Fáza [°]	Amplitúda [V]	Fáza [°]	Amplitúda [V]	Fáza [°]	Amplitúda [V]
25	40	10	52	11,89	60	18,44
100	40	10	78	10,83	107	14,82
200	40	10	109	9,23	152	11,58
400	40	10	155	4,88	223	5,53
Valcová testovacia mierka vyrobená vyiskrením						
Použitá meracie frekvencie [kHz]	Defekt č.1 100 % úbytok materiálu		Defekt č.2 60 % úbytok materiálu		Defekt č.3 20 % úbytok materiálu	
	Fáza [°]	Amplitúda [V]	Fáza [°]	Amplitúda [V]	Fáza [°]	Amplitúda [V]
25	40	10	48	13,72	56	22,96
100	40	10	67	13,47	95	19,3
200	40	10	93	13,37	136	16,16
400	40	10	133	9,16	208	8,46

Ďalším výstupom zobrazenia dát sú dva grafy vyobrazujúce závislosť amplitúdy a fázy na použitej meracej frekvencii, pre rôzne úbytky materiálu viz Obr. 6.4, Obr. 6.5. Zo zobrazenia je zrejmé, že namerané hodnoty testovacej mierky sa približujú hodnotám kalibračnej mierky. Najväčšie rozdiely sú pozorovateľné v amplitúde signálu, z čoho možno usúdiť že po správnej úprave priemeru defektu (leptaním, brúsením) by sa dosiahlo zmenšenia rozdielu.



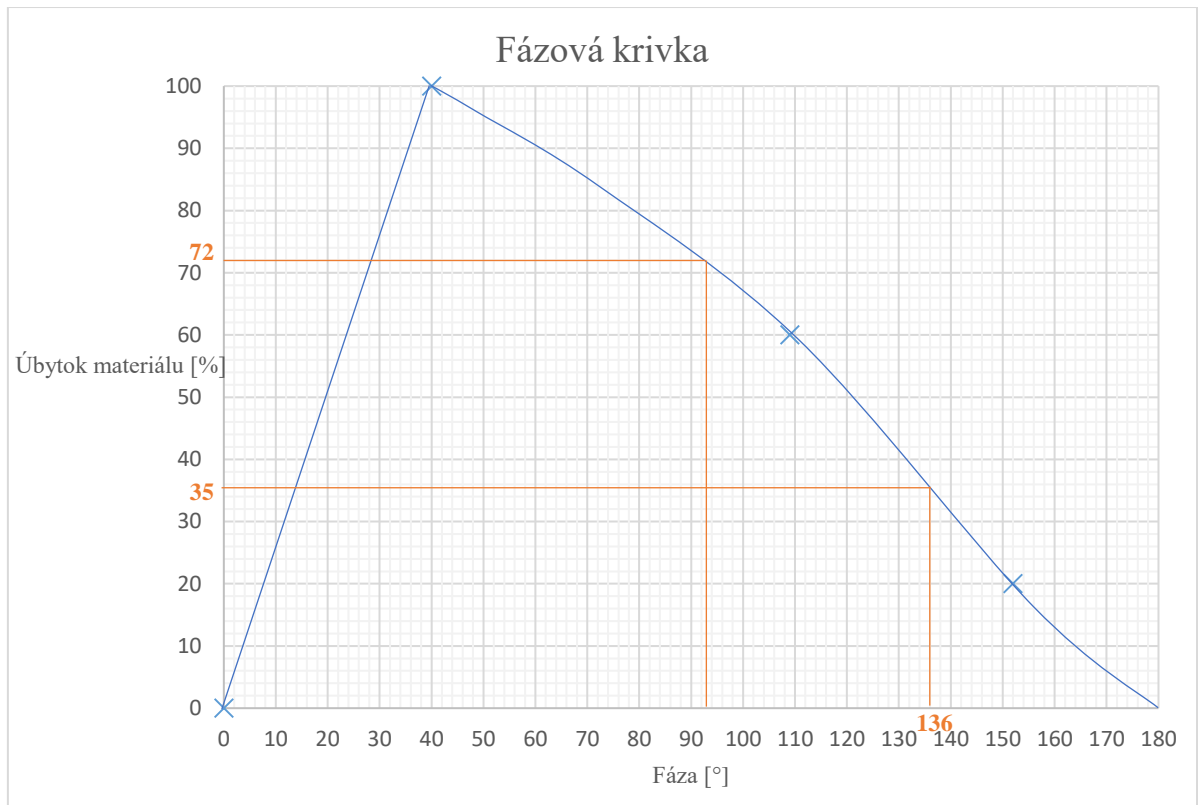
Obr. 6.4 Závislosť amplitúdy signálu na použitej meracej frekvencii



Obr. 6.5 Závislosť fázy signálu na použitej meracej frekvencii

Na obrázku *Obr. 6.6* sa nachádza fázová krivka (závislosť fáze signálu na úbytku materiálu pre Etalon). Krivka je zobrazená pre hodnoty získané pri použití meracej frekvencie 200 kHz. Táto frekvencia slúži ako hlavná meracia pre danú hrúbku materiálu mierky, jej výsledky majú najväčšiu výpovednú hodnotu.

V praxi sa veľkosť defektu určuje vytvorením fázovej krivky kalibračnej mierky, do ktorej sa následne dosadia získané hodnoty fáze signálu z nameraných hodnôt na reálnom zariadení. Dosadené hodnoty určia úbytok materiálu defektu tak ako je to zobrazené na obrázku *Obr. 6.6*.



Obr. 6.6 Fázová krivka

7 ZÁVER

Cieľom diplomovej práce bolo nájsť využitie laserovej technológie pri výrobe kalibračných mierok. Kalibračné mierky sa využívajú pri skúšaní vírivými prúdmi na zariadeniach v jadrovej energetike. Práca sa zameriava na objasnenie témy kalibračných mierok, ich výrobu, úpravu a metodiku ich využitia pri meraní vírivými prúdmi.

Teoretická časť práce je zameraná na metódu skúšania vírivými prúdmi. Táto kapitola obsahuje obecnú klasifikáciu metódy, popis vzniku vírivých prúdov, určenie rozsahu použitia a obmedzenia tejto metódy kontroly. Ďalej je práca zameraná na rozdelenie snímačov a metód používaných pri kontrole ako aj popis vplyvov, ktoré ovplyvňujú vykonávanie tejto kontroly. Na záver sa teoretická časť práce zaoberá fyzikálnym princípom lasera, jeho druhmi, použitím a využiteľnými pracovnými režimami pre výrobu kalibračných mierok.

Praktická časť práce je zameraná na návrh a výrobu testovacích kalibračných mierok s využitím laserovej technológie. Prvá časť praktickej práce sa zaoberá vývojom a výrobou plochej kalibračnej mierky. Táto mierka bola navrhnutá na základe už existujúcej a používanej kalibračnej mierky vyrobenej technológiou vyiskrovaním. Pred samotnou výrobou plochej mierky boli otestované dva pracovné režimy s názvom gravúra a ablácia. Po zhodnotení výsledkov z testovania pracovných režimov sa došlo k záveru že vhodný pracovný režim pre výrobu plochej mierky je ablácia. Pri voľbe režimu bola hodnotená kvalita drážky, natavenie hrán drážky a pretavenie alebo slabé natavenie materiálu. Na vyrobenej plochej mierke laserom bolo vykonané meranie metódou vírivých prúdov. Meranie pozostávalo z kalibrácie meracieho prístroja a nastavenia interpretácie nameraných signálov. Pre interpretáciu bola využitá plochá kalibračná mierka vyrobená vyiskrovaním.

Získané údaje z merania boli vo forme časového priebehu napät'ovej odozvy a vo forme C-scanu meranej oblasti. Porovnaním nameraných údajov plochej testovacej mierky vyrobenej laserom a plochej kalibračnej mierky vyrobenej vyiskrovaním sa prišlo k poznatku, že použitie lasera na výrobu úzkych drážok na plochom materiáli nie je vhodné. Laser dobre napodobil morfológiu trhlín, ale má obmedzenia v dosiahnutí požadovaných rozmerov. Drážky vyrobene laserom nedosiahli požadovanú hĺbku pri zadanej šírke drážky. Odparovaný materiál sa nemal možnosť z väčšej hĺbky drážky odpariť a zostával v drážke vo forme oxidov. Pre presné zistenie dosiahnutých rozmerov drážok boli drážky zo základného materiálu vyrezané, metalograficky spracované a kontrolované optickým mikroskopom. Kontrola potvrdila poznatky získané z merania vírivými prúdmi, z ktorých vyplýva že použitie lasera pre výrobu plochých mierok nie je vhodné. Taktiež sa prišlo k dôležitému zisteniu, že vhodnejšie použitie lasera by bolo pri vytváraní defektov s väčšími povrchovými rozmermi a menšou hĺbkou, ktoré sa uplatňujú pri valcových kalibračných mierkach.

Druhá časť praktickej práce je zameraná na výrobu valcových pokusných vzoriek. Vzorky slúžili k overeniu použiteľnosti lasera pre výrobu defektu simulujúceho korózne úbytky materiálu. Korózia vstupuje do materiálu približne rovnako po celom obvode rúrky. Defekt sa odlišuje rádiusom dna, ktoré odpovedá rádiusu rúrky. Kontrola dosiahnutých rozmerov preukázala že odchýlka medzi požadovanými a dosiahnutými rozmermi defektu sa pohybuje v rádoch stotín milimetra. Výroba takéhoto typu defektu pomocou vyiskrovania je náročná. Výsledok pokusu bol veľmi pozitívny, laser umožňuje vytvárať rôzne napodobenie korózie pri zachovaní rovnakej hĺbky po celom obvode mierky. Výroba defektu tohto typu je veľmi perspektívna a bude mať uplatnenie vo výrobe valcových kalibračných mierok simulujúcich korózne úbytky.

V tretej časti praktickej práce sa nachádza výroba valcovej kalibračnej mierky. Táto mierka bola navrhnutá na základe už existujúcej a používanej kalibračnej mierky vyrobenej technológiou vyiskrovaním. Prvá valcová testovacia mierka bola vyrobená metódou vyiskrovaním. Dosiagnuté rozmery tejto mierky dosahujú dobrú presnosť. Na mierke bolo vykonané meranie vírivými prúdmi. Namerané údaje sú amplitúda a fáza získaného diferenciálneho signálu. Táto mierka bola vyrobená za účelom porovnania nameraných údajov s valcovou mierkou vyrobenou laserom. Mala sa hodnotiť presnosť vytvorených vád, namerané dáta, potrebná úprava ako aj celková kvalita mierky. Valcová testovacia mierka vyrobená laserom bohužiaľ nedorazila v požadovanom čase, preto sa toto porovnanie v práci nenachádza.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] BOHÁČOVÁ, Marie a Bernard KOPEC. *Zkoušení vířivými proudy: odborná studijní monografie*. V Brně: VUT ve spolupráci s Českou společností pro NDT, 2017. ISBN 978-80-214-5509-2.
- [2] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [3] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení: defektoskopie : encyklopedický přehled metod nedestruktivního zkoušení materiálů a výrobků. 2. doplněné vydání*. Brno: Česká společnost pro nedestruktivní testování, 2015. ISBN 1213-3825.
- [4] LAMMERANER, J a M ŠTAFL. *Vířivé proudy*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964.
- [5] VĚCHET, Mojmir, Jaroslav KESL a Lumír ŠPIKA. *Defektoskopie v otázkách a odpovědích*. Praha: SNTL, 1989. ISBN 80-030-0100-5.
- [6] FENDRYCHOVÁ, Michaela. *Současný stav inspekcí palivových souborů na jaderných elektrárnách ve světě*. Brno, 2014, 44 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Ing. Karel Katovský, Ph.D.
- [7] IAEA. *Eddy Current Testing at Level 2: Manual for the Syllabi Contained in IAEA-TECDOC-628.Rev. 2: Training guidelines for non Destructive Testing Techniques*. Training Course series 48. Vienna, 2014.
- [8] ZLESÁK, Jakub. *Trendy Vývoje LASERové Technologie*. Brno, 2008, 67 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Karel Osička.
- [9] LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi*. *Fyzika.upol.cz* [online]. Společná laboratoř optiky FzÚ AV ČR a UP Olomouc, 2010 [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [10] URBAN, Jan. *Realizace laserové technologie*. Brno, 2012, 77 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce ING. KAREL OSIČKA, Ph.D.
- [11] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1869-9.

-
- [12] Typy laserů: Dělení dle aktivního prostředí. *WikiSkripta* [online]. 2018 [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Typy_laser%C5%AF
- [13] Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing: Principles of Operation of Eddy Current Testing. *mdpi* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/11/3/2525/htm>
- [14] Chetvorno. *Wikimedia: Laminated core eddy currents* [online]. 2015 [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laminated_core_eddy_currents.svg
- [15] *Theseverngroup: Eddy Current Testing* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://www.theseverngroup.com/eddy-current-testing-101/>
- [16] *TRUMPF: gravírovanie* [online]. [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/no_cache/sk_SK/meta/hladat/?q=grav%C3%ADrovanie
- [17] *MEGAFLEX: Laserové gravírovanie* [online]. [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: <https://www.megaflex.cz/lasery/sk/laserove-gravirovanie/>
- [18] BUDAY, Jakub. *Optomechanická konstrukce pro zobrazování laserem buzeného plazmatu*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Pavel Pořízka, Ph.D.
- [19] SÝKORA, Ota. *Návrh a realizace software pro řízení ablační cely*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.
- [20] Neverejné firemné materiály podliehajúce utajeniu