

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Moderní techniky NDT

Autor: **Jitka KLAISNEROVÁ**
Vedoucí práce: **Ing. Petr BENEŠ, Ph.D.**

Akademický rok 2018/2019

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jitka KLAISNEROVÁ**

Osobní číslo: **S16B0068P**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**

Název tématu: **Moderní techniky NDT.**

Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Definice oblasti NDT, základní rozdělení metod NDT.
2. Průmyslové NDT ve vztahu k jiným vědním oborům.
3. Nejnovější trendy v oblasti NDT, podrobný popis nejvýznamnějších moderních metod NDT, predikce vývoje metod.
4. Ekonomické hodnocení vybraných moderních technik NDT.
5. Závěr

Rozsah grafických prací: fotodokumentace, obrázky

Rozsah kvalifikační práce: 30-40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Shull, J., Peter, *Nondestructive Evaluation, Theory, Techniques, and Applications*, Marcel Dekker, 2002.

Kopec, B., *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*, Akademické nakladatelství CERM, 2008.

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

<https://www.ndt.org>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant bakalářské práce: Ing. Jiří Hodač

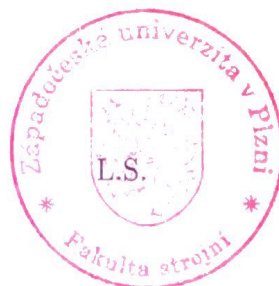
Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Datum zadání bakalářské práce: 5. října 2018

Termín odevzdání bakalářské práce: 24. května 2019



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž
vedoucí katedry

V Plzni dne 30. října 2018

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne: 24.5.2019

.....
podpis autora

Poděkování

Mé poděkování patří Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za odborné vedení, věcné připomínky, vstřícnost při konzultacích a trpělivost, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval. Dále také děkuji Centru výzkumu Řež s.r.o. za možnost praktické ukázky některých metod.

V neposlední řadě bych ráda poděkovala své rodině za podporu nejen během psaní bakalářské práce, ale také během celého studia.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Klaisnerová	Jméno Jítka		
STUDIJNÍ OBOR	B2301 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Beneš, Ph.D.	Jméno Petr		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KMM			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ		Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Moderní techniky NDT			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	57	TEXTOVÁ ČÁST	57	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Bakalářská práce obsahuje soupis tradičních a moderních metod nedestruktivního testování. Je popsán princip metod, používané pomůcky, jejich využití a aplikace. Vybrané metody moderního NDT jsou podrobně popsány a jsou ekonomicky zhodnoceny. Na závěr je uvedena predikce výboje metod NDT.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>NDT, metody nedestruktivního testování, defektoskopie, MMM, kapilární metoda, metoda rozptylových toků, vizuální metody, ultrazvuk, prozařování, těsnost, UAV, drony, Phased Array, CT, tomografie</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Klaisnerová	Name Jitka	
FIELD OF STUDY	B2301 „Department of Material Science and Technology“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Beneš, Ph.D.	Name Petr	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Modern NDT techniques		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2019
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	57	TEXT PART	57	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis dissert on design of bodywork of a two-axies middle-class bus in three variants, computer simulation of circumfluence around the bus-body and calculating of chosen drive-parameters. Aerodynamic characteristics and the coefficient of air resistance were obtained by software Fluent.
KEY WORDS	NDT, non-destructive testing methods, defektoskopy, MMM, capillary method, magnetic leakage flux method, visual methods, ultrasound, radiation, tightness, UAV, drones, Phased Array, CT, tomography

Seznam symbolů a zkratk

AC	Střídavý proud
ACFM	Alternating Current Field Measurement. Metoda měření střídavého proudu
AE	Akustická emise
CCD	Charge Coupled Device. Nabíjecí zařízení
CMM	dotykové skenery
CT	Computed Tomography. Počítačová tomografie
DC	stejnoseměrný proud
DDA	Plochy digitální detektor
FDK	Feldkamp-Davis-Kress. Algoritmus
FHD	Full High Definition. Plně vysoké rozlišení
FMC	Full Matrix Capture. Zachycení plné matice
FPV	First Pilot View. Aktuální pohled pilota
HD	High Definition. Vysoké rozlišení
$H_p(x,y)$	Tangenciální složka signálu SMLF
IR	Infrared radiation. Infračervené záření
LDA	Lineární detektor
MMM	Metal Magnetic Memory. Kovová magnetická paměť
NDT	Non-Destructive Testing. Nedestruktivní testování
NMAB	The National Advisory Board. Americký výbor ustanovený za účelem nedestruktivního zkoušení při Národním poradním orgánu pro materiály
PA	Phased Array. Fázové pole
RTG	Rentgen
SCZ	Stress Concentration Zone. Zóny koncentrace napětí
SMLF	Self – Magnetic Leakage Field. Magnetické rozptylové pole
TFM	Total Focusing Method. Metoda celkového zaostření
TSC	Tester of Stress Concentration. Tester napěťové koncentrace
UAV	Unmanned Aerial Vehicles. Bezpilotní letecké vozidlo

Obsah

1	Úvod	4
2	Defektoskopie	5
2.1	Definice nedestruktivního zkoušení	5
2.2	Klasifikace metod	5
3	Základní metody NDT	7
3.1	Kapilární metoda	7
3.1.1	Úvod	7
3.1.2	Princip	7
3.1.3	Kapilární prostředky	8
3.2	Metoda rozptylových toků	9
3.2.1	Úvod	9
3.2.2	Vznik rozptylového pole nad vadou	9
3.2.3	Způsob magnetizace	9
3.2.4	Druhy magnetizačního proudu	10
3.2.5	Druhy a vlastnosti detekčních prostředků	11
3.3	Vizuální metody	12
3.3.1	Úvod	12
3.3.2	Pomůcky pro přímou vizuální kontrolu	12
3.3.3	Průmyslové endoskopy	13
3.4	Zkoušky ultrazvukem	14
3.4.1	Úvod	14
3.4.2	Princip ultrazvuku	14
3.4.3	Ultrazvukové sondy	14
3.4.4	Metody ultrazvukové defektoskopie	14
3.5	Zkoušky prozařováním	16
3.5.1	Úvod	16
3.5.2	Radiologické metody	16
3.5.3	Charakteristika záření	16
3.5.4	Film	17
3.5.5	Hodnocení výsledků	17
3.6	Zkoušení těsnosti	18
3.6.1	Úvod	18
3.6.2	Měření a hledání netěsnosti	18
3.6.3	Metody hledání a měření netěsnosti	19
4	Současné trendy v oblasti NDT	19

4.1	NDT povrchového stavu materiálu	19
4.1.1	Bakteriální buněčné filmy	19
4.1.2	Vizuální kontrola drony	21
4.1.3	Infračervená termografie	21
4.1.4	Random Forest	22
4.1.5	Skenování povrchu	22
4.1.6	Vzdálená vizuální kontrola	23
4.1.7	Metoda ACFM	24
4.2	NDT podpovrchového a objemového stavu materiálu	25
4.2.1	Metoda MMM	25
4.3	NDT objemového stavu materiálu	26
4.3.1	Phased Array	26
4.3.2	Metoda Impakt-Echo	26
4.3.3	Počítačová tomografie	27
4.3.4	Digitální radiografie	27
5	Moderní metody NDT	29
5.1	Vizuální kontrola drony	29
5.1.1	Historie	29
5.1.2	Části dronu	30
5.1.3	Kamery používané drony	30
5.1.4	Využití	31
5.1.5	Vývoj UAV	34
5.1.6	Ekonomické zhodnocení	35
5.2	Metoda MMM	35
5.2.1	Úvod	35
5.2.2	Princip	35
5.2.3	Měření	36
5.2.4	Výhody a nevýhody metody MMM	37
5.2.5	Příklady využití	37
5.2.6	Ekonomické zhodnocení	41
5.3	Počítačová tomografie	41
5.3.1	Úvod	41
5.3.2	Způsob získávání obrazu CT skenu	41
5.3.3	Tvary používaných rentgenových zařízení	42
5.3.4	Software	43
5.3.5	Využití CT	44

5.3.6	Ekonomické zhodnocení.....	45
5.4	Phased array.....	46
5.4.1	Úvod	46
5.4.2	Princip.....	46
5.4.3	Použití Ahased array.....	46
5.4.4	Sondy a skenery.....	47
5.4.5	Využití	48
5.4.6	Zachycení plné matice a metoda naprostého zaostření	49
5.4.7	Ekonomické zhodnocení.....	51
6	Predikce vývoje NDT.....	51
7	Závěr.....	53
8	Citovaná literatura.....	54

1 Úvod

Zajištění kvality, spolehlivosti a životnosti výrobků ve strojírenství je z hlediska bezpečnostní i finanční stránky velmi důležité. Tyto faktory jsou ovlivněny výskytem vad. Ty mohou vznikat vlastnostmi a strukturou materiálu, při nedokonalém technologickém postupu či jeho nedodržení.

Vady mohou být viditelné pouhým okem, mikroskopické, nacházející se na povrchu i vnitřní. Řadíme sem například trhliny, vměstky, bubliny nebo staženiny. Tyto vady způsobují zeslabení nosného průřezu, netěsnost spojů a vyvolávají vrubové účinky. Můžeme se jim vyhnout pomocí zkoušek.

Předcházení vad zajišťují destruktivní zkoušky, např. statické zkoušky tahem nebo dynamické zkoušky únavové. Ty prověřují mechanické a technologické vlastnosti materiálu.

Kontrolu již vyrobených součástí zajišťuje obor defektoskopie, který se zabývá odhalováním vad bez porušení materiálu. Díky možnosti automatizace lze zkontrolovat 100 % výrobků i během výroby.

Metod nedestruktivního zkoušení je celá řada a navzájem se doplňují, jelikož jedna metoda nedokáže odhalit veškeré přítomné defekty.

Mezi nejčastější současné metody v oblasti povrchových vad patří metoda kapilární, elektromagnetická a vizuální. Vnitřní vady se odhalují například ultrazvukem či prozářením. Dále se často využívá zkouška těsnosti. Všechny tyto zkoušky budou později v této práci ještě probírány.

Od poloviny 19. století, kdy se lidé začali defektoskopií zabývat, se technologie i samotné materiály posunuly dopředu a jsou zaváděny nové postupy kontroly produktů, které pomáhají odhalovat defekty i v kompozitních materiálech či lepených spojích.

Tato bakalářská práce probírá základní současné metody a jejich aplikovatelnost. Zaměřuje se na jednotlivé nejnovější trendy vnitřní i vnější defektoskopie, jejich využití v různých oborech, předpokládaný progres a ekonomičnost.

2 Defektoskopie

2.1 Definice nedestruktivního zkoušení

Nedestruktivní zkoušení (non-destructive testing – NDT) je souhrn metod používaných pro zkoušení určitého produktu, materiálu nebo systému bez narušení jejich budoucí použitelnosti.

Pro zjištění necelistvosti materiálu využívají přiměřenou formu energie, ať už pro zjištění materiálových vlastností nebo pro indikování přítomnosti materiálových diskontinuit. [1]

2.2 Klasifikace metod [1]

Americký výbor ustanovený za účelem nedestruktivního zkoušení při Národním poradním orgánu pro materiály (The National Materials Advisory Board – ad hoc Committee on Nondestructive Evaluation – NMAB) vytvořil systém klasifikace NDT do šesti hlavních metodických kategorií:

1. Vizuální
2. Pronikavé záření (radiace)
3. Magneticko-elektrické
4. Mechanické vibrace
5. Termální
6. Chemické/elektrochemické

Každá metoda je komplexně charakterizována v termínech pěti základních faktorů:

FAKTOR	PŘÍKLAD
Zdroj energie (médiu použité k sondování předmětů)	Rentgenové paprsky, ultrazvukové vlny, termální zařízení
Charakter signálu, zobrazení nebo předznamenání vyplývající ze vzájemného působení s předmětem	Útlum rentgenových paprsků, útlum ultrazvukových vln, odraz ultrazvuku
Prostředky k detekování nebo snímání výsledných signálů	Fotoemulze, piezoelektrický krystal, indukční cívka
Prostředky indikování nebo zaznamenání signálů	Měření odchylky, stopa na osciloskopu, radiograf
Základna pro interpretaci výsledků	Přímá nebo nepřímá indikace kvalitativní nebo kvantitativní a přiměřené vzdálenosti

Cílem každé metody je zjistit informace o jednom nebo více parametrech z následujících parametrů:

1. Diskontinuity a separace (trhliny, dutiny, městky, štěpení, dělení na vrstvy)
2. Struktura neboli vadná struktura (krystalická struktura, velikost zrna, mezilamelární vzdálenost perlitu, segregace, přesazení)
3. Rozměry a metrologie (tloušťka, průměr, mezera, spáry, rozměr přerušované souvislosti)
4. Fyzikální a mechanické vlastnosti (odrazivost, vodivost, modul pružnosti, rychlost zvuku)

5. Složení a chemická analýza (identifikace slitin, nečistoty, příměsi, elementární distribuce, rozdělení)
6. Pnutí a dynamická odezva (zbytkové pnutí, nárůst trhlin, opotřebení, vibrace)
7. Analýza zobrazení (obsah zobrazení, frekvenční spektrum, konfigurace pole)
8. Abnormální zdroje tepla

Každá z metod je vymezena podmínkami, které musí být pro aplikaci splněny, a požadavky na přizpůsobení sondy nebo média pro sondu a zkoušený předmět. Při použití nesprávné metody je správná detekce a charakteristika vady omezena.

Žádná metoda NDT není schopna odhalit veškeré vady. V některých případech postačí metoda jedna, ve většině případů je však nutno použít kombinaci dvou nebo několika metod pro zajištění kompletní nedestruktivní zkoušky.

KATEGORIE	OBEJKT ZJIŠTĚNÍ
ZÁKLADNÍ	
Mechanické a optické	Barva, trhliny, rozměry, tloušťka filmu, kalibrování, odrazivost, rozdělení napětí vyvolávající deformace a jeho velikost, jako povrchu, povrchové vady, průchozí trhliny
Pronikavé záření	Trhliny, hustota a chemická kolísání, rozdělování prvků, cizí předměty, vměstky, mikroskopická pórovitost, nesprávné seřízení, chybějící části, segregace, selhání funkčnosti, smršťení, svaštění, tloušťka, dutiny
Elektromagnetické a elektronické	Obsah slitiny, anizotropie, dutiny, studený spoj, místní napětí, tvrdost, kompozice, kontaminace, koroze, praskliny, hloubka trhliny, krystalická struktura, elektrická vodivost, vločky, tepelné zpracování, trhliny, vměstky, iontová koncentrace, přeložky, napětí mřížky krystalu, tloušťka vrstvy, vlhkost, polarizace, švy, segregace, smršťení, stav vulkanizace, pevnost v tahu, tloušťka, dutiny
Zvukové a ultrazvukové	Iniciace a šíření trhlin, dutiny, trhliny, útlumový faktor, stupeň vytvrzování, impregnace a slinování, dělení vrstev, hustota, rozměry, modul pružnosti, velikost zrna, vměstky, mechanická degradace, pórovitost, degradace záření, struktura kompozic, pevnost v tahu, smyku, stříhu a tlaku, opotřebení, mezilamelární vzdálenost perlitu, mez únavy
Infračervené a termální	Anizotropie, spoje, kompozice, emisní schopnost, tepelné hranice, tloušťka pokovování, pórovitost, tloušťka, dutiny, trhliny, štěpení, tepelné zpracování, stav vulkanizace, vlhkost, koroze
Chemické a analytické	Identifikace slitiny, kompozice, trhliny, analýza a rozdělení prvků, zrnitost, vměstky, makrostruktura, pórovitost, segregace, povrchové anomálie
PŘÍDAVNÉ	
Vytváření obrazu	Rozměrové kolísání, dynamický výkon, anomální charakterizace, rozložení a šíření, konfigurace magnetického pole
Analýza obrazu signálu	Výběr údajů, zpracování a zobrazení signálu, anomální mapování, korelace a identifikace, vystupňování obrazu, separace několikanásobných proměnných, analýza předznamenání obrazu

3 Základní metody NDT

3.1 Kapilární metoda

3.1.1 Úvod

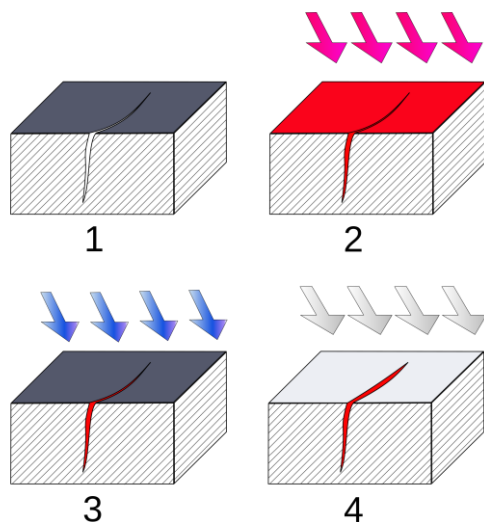
Tato metoda patří mezi nejstarší metody nedestruktivních zkoušek a své počátky má v 19. století, kdy se za pomoci petroleje a vápenného mléka ověřovala těsnost spojů a odlitků.

Využívá se zde kapilárních vlastností některých kapalin, které nazýváme penetranty. Pomocí nich se dají zjišťovat povrchové vady, jako jsou trhliny, studené spoje, porezity atd. Testování vnitřních vad, které nemají spojení s povrchem není možné.

Výhodou metody je její univerzálnost, jelikož nezáleží na tvarové složitosti a chemickém složení zkoumaného objektu. Je jednoduchá a ekonomická, jelikož je relativně levná, rychlá a hodnocení zkoušky se většinou obejde bez problémů. [1]

3.1.2 Princip

Zkouška je založena na vzlínavosti a smáčivosti určitých kapalin (penetrantů), jejich barevnosti, popřípadě fluorescence. Tyto kapaliny jsou aplikovány na povrch zkoušeného předmětu, odstraní se přebytky a po aplikaci vývojky vzlíná penetrant, který vnikl do vad. Vývojka je kontrastní k penetrantu, takže společně indikují vadu barevně nebo fluorescencí. Indikace vad se hodnotí vizuálně. Schéma kapilární zkoušky je znázorněno na obr. 1. [1]



Obr. 1 – Schéma kapilární zkoušky [62]

3.1.3 Kapilární prostředky [1]

3.1.3.1 Rozdělení kapilárních prostředků

Kapilární prostředky jsou všechna činidla, která jsou potřeba pro provedení kapilární zkoušky. Tyto prostředky dohromady tvoří kapilární soubor (set), který je vhodný použít od jednoho výrobce.

Patří sem:

1. penetranty
2. vývojky
3. čističe (odmašťovače a rozpouštědla)
4. emulgátory

3.1.3.2 Penetranty

Penetrant je kapalina, která je aplikována na povrch zkoušeného materiálu, vniká do vad a setrvává v nich v dostatečné míře i po odstranění přebytku. Díky vzlínivosti pak tuto vadu identifikuje.

Skládají se ze směsí kapalných ropných produktů a organických rozpouštědel. Směs je obarvena na červeno nebo je v ní rozpuštěn luminosfór.

Penetrantů je celá řada a rozdělují se například podle typu indikace, kterou vytvářejí:

1. penetranty barevné – vytvářejí barevný kontrast s bílou vývojkou
2. penetranty fluorescenční – světélkují při ozáření ultrafialovým světlem
3. penetranty dvojúčelové – s příměsí luminosféru, který je zároveň barevný, dá se využít tedy jako oba předchozí penetranty

3.1.3.3 Vývojky

Vývojka je činidlo, které se nanáší na zkoušený povrch očištěný od přebytečného penetrantu. Napomáhá vzlínání penetrantu z vady a vytváří tak kapilární indikaci.

Základ tvoří práškovitá složka bílé barvy, jemného zrnění, která nesmí být hydroskopická. Nejčastěji se používají oxid zinečnatý, hořečnatý, uhličitán hořečnatý, vápenatý (křída) aj.

3.1.3.4 Odmašťovače a čističe

Odmašťovač je činidlo, které odstraňuje tuk nebo olej ze zkoušeného povrchu před nanesením penetrantu. Používá se organických rozpouštědel jako je benzin, aceton aj, nebo anorganických chemikálií jako jsou vhodně zředěné louhy sodný a draselný.

Čistič je kapalina určená k odstranění penetrantu ze zkoušeného povrchu nebo odstranění nežádoucího pozadí. Základem je organické rozpouštědlo, často kombinované emulgátorem. V některých případech se používá samotné organické rozpouštědlo.

3.1.3.5 Emulgátory

Emulgátory jsou povrchově účinné látky, které usnadňují rozptýlení pevných nebo kapalných látek v kapalině (obvykle vodě), v níž se normálně nerozpouští. Při kapilární zkoušce napomáhají odstranění přebytku penetrantu.

Dělí se na emulgátory lipofilní (rozpuštěné v tucích) a hydrofilní (rozpuštěné ve vodě).

3.2 Metoda rozptylových toků

3.2.1 Úvod

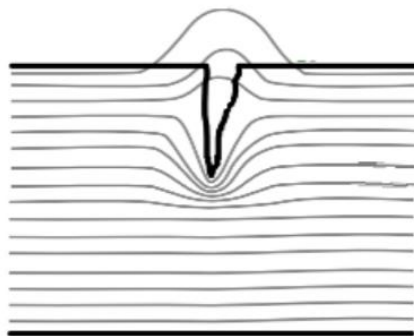
Metoda rozptylových toků se nazývá také magnetická metoda prášková. Používá se pro detekování vad na povrchu nebo blízko povrchu pouze pro feromagnetické materiály.

Při zmagnetizování zkoušeného materiálu magnetickým polem se v místě vady vytvoří magnetický rozptylový tok. Ten vystupuje z materiálu nad jeho povrch a je možný indikovat pomocí magnetického prášku nebo sondami. [1]

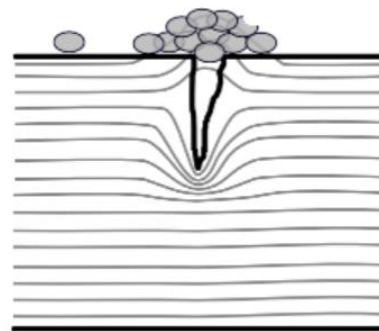
3.2.2 Vznik rozptylového pole nad vadou

Po zmagnetizování materiálu jeho průřezem prochází magnetický tok. Vada na povrchu představuje prostředí s poměrnou permeabilitou $\mu_r = 1$ a má vyšší magnetický odpor než okolní materiál. Celková velikost magnetického toku po celé jeho dráze zůstává konstantní, tudíž nastává nad vadou zhuštění siločar a část jich vystupuje nad povrch v oblasti vady. Tyto vystupující siločáry vytvářejí tzv. rozptylový tok vady, v místě siločar vznikají magnetické póly (obr. 3).

Nanesený jemný feromagnetický prášek se zachytí působením rozptylového toku v oblasti vzniklých magnetických pólů a vykreslí tvar vady (obr. 4). [1]



Obr. 3 – Rozptylový tok vady [66]



Obr. 4 – Zachycený feromagnetický prášek [66]

3.2.3 Způsob magnetizace [1]

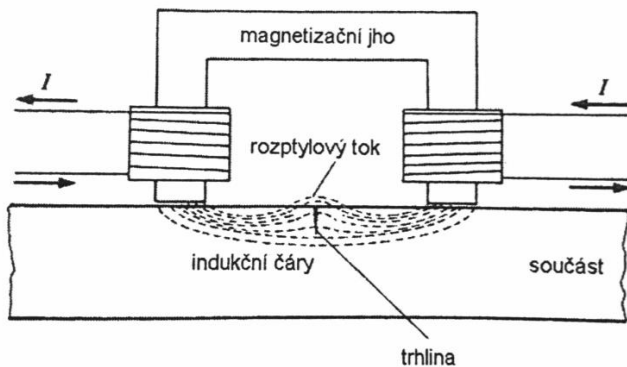
Rozptylové pole se vytvoří magnetováním zkoušeného předmětu, pokud možno kolmo na směr zjišťované vady. Pokud je vada rovnoběžná se směrem magnetického pole, nebude zjištěna, jelikož nenaruší magnetické pole.

Rozeznáváme dva základní způsoby magnetizace – pólovou a cirkulární.

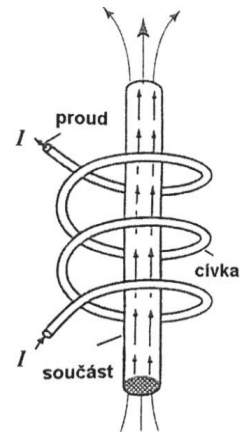
3.2.3.1 Pólová magnetizace

Při pólové magnetizaci se ve zkoušeném předmětu vytvoří magnetické pole s magnetickým tokem procházejícím skrz zkoušený povrch i mimo něj. Vznikají magnetické póly v místech vstupu a výstupu magnetických siločar. Kontrolovaný předmět má po zmagnetování své vlastní magnetické pole.

Pólovou magnetizaci dosahujeme za pomoci cívky (obr. 5) nebo magnetizačního jha (obr. 6).



Obr. 5 – Pólová magnetizace cívkou [1]

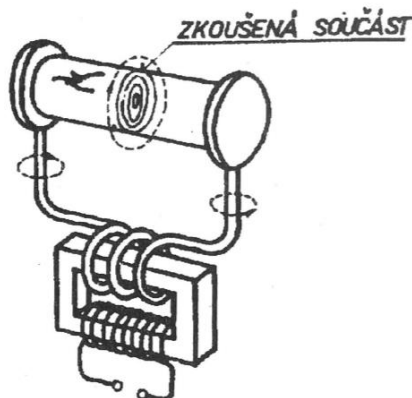


Obr. 6 – Magnetování magnetizačním jhem [1]

3.2.3.2 Cirkulární magnetizace

U cirkulární magnetizace je magnetický tok uzavřen ve zkoušeném předmětu. Nevznikají magnetické póly. Zkoušený předmět zůstane po zkoušení zmagnetován.

Cirkulární magnetizace se dosahuje přímým průchodem proudu kontrolovaným předmětem. Používá se k tomu pomocný vodič nebo indukce proudu v kontrolovaném předmětu. Schéma zmagnetování je znázorněno na obr. 7.



Obr. 7 – Cirkulární magnetizace [3]

3.2.4 Druhy magnetizačního proudu [1]

Pro buzení magnetického pole ve zkoušené součásti se používá střídavý i stejnosměrný elektrický proud. Na druhu proudu závisí průnik magnetického pole do materiálu. To ovlivňuje indikaci vad i nároky na odmagnetování kontrolovaných výrobků.

3.2.4.1 Střídavý proud AC

Téměř u všech druhů magnetizačních zařízení se využívá o frekvenci 50 Hz. Průnik pole pod povrch je omezen. U ocelových výrobků je hloubka průniku okolo 2 mm, proto se dá snadno odmagnetovat.

Nevýhodou je obtížnější detekování vad pod povrchem, hlouběji pod povrchem nejsou vůbec zjistitelné. Další nevýhoda spočívá ve značném zahřátí výrobku vlivem vířivých proudů.

3.2.4.2 Stejnoseměrný proud DC

DC se používá zřídka. Magnetován je celý průřez tělesa, což napomáhá detekování vad i hlouběji v tělese.

Nevýhodou je obtížnější odmagnetování, velká hmotnost zdroje, a tak i robustnost celého zařízení. DC se získává z akumulátorů nebo častěji usměrňováním střídavého proudu.

3.2.5 Druhy a vlastnosti detekčních prostředků [1]

Nejčastější detekční prostředek je feromagnetický prášek. Ten může být buď suchý nebo je obsažen ve vhodné kapalině. Dále je možné použít sondy jako je vzduchová cívka, feromagnetická sonda nebo Hallova sonda.

3.2.5.1 Magnetické prášky

Magnetický prášek musí tvořit dobře viditelné a ostře vykreslené indikace vad. Musí být feromagnetický, mít dobré optické vlastnosti a velikost zrna musí být o trochu větší než šířka zjišťované vady. Pokud by byla zrna příliš velká, slabý rozptylový tok zrno neudrží. Dále by neměl prášek ulpívat na nerovnostech povrchu.

Používají se prášky barevné, tedy černé, šedé a červenohnědé. Barva závisí na způsobu výroby a druhu výchozího materiálu. Výchozí materiál bývá čisté železo nebo jeho oxidy (např. oxid železitý, železato-železitý).

Dále se používají prášky fluorescenční, které mají na povrchu zrn nanesenou luminiscenční barvu. Tyto prášky září nejčastěji žlutozeleně, občas modrozeleně a oranžově.

Mimo suchých prášků se používají olejové suspenze, vodní suspenze, magnetické barvy a polymerové prostředky.

3.2.5.2 Detekční sondy

Sondy se používají při automatizované kontrole. Lokalizace vady probíhá skenováním sledovaného povrchu pomocí manipulačního zařízení. Nejčastěji se tak zkouší rotačně symetrická tělesa jako jsou tyče a roury.

Využívá se vzduchových cívek kruhového nebo obdélníkového tvaru s N závitů, kde je zabezpečen pohyb vůči zkoušenému povrchu. Rozptylový tok, který se vytvoří nad trhlinou, indukují v této cívce napětí. Tyto sondy jsou konstrukčně jednoduché, ale díky rychlému vývoje v oblasti polovodičových prvků se používají zřídka.

3.2.5.3 Feromagnetická sonda

Feromagnetická sonda je velmi citlivý převodník magnetického pole na elektrické napětí. Je asi 1000krát citlivější než Hallova sonda.

Skládá se ze dvou feromagnetických jader vyrobených z kvalitního feromagnetického materiálu (např. magneticky měkký ferit), ovinutých stejným počtem závitů a umístěných do vnější cívky.

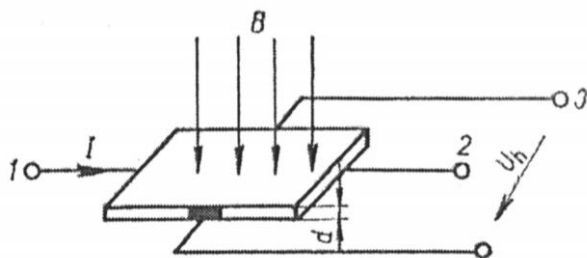
Sonda reaguje pouze na nehomogenní pole vytvořené vadou, čímž se eliminuje snímání rušivých polí, jako je vliv zemského magnetického pole.

Nevýhodou této sondy je složitější elektronická vyhodnocovací jednotka.

3.2.5.4 Hallova sonda

V současnosti představuje tato sonda nejvýhodnější volbu, jelikož v jednom čipu se nachází integrovaná jednotka s Hallovo sondou a zesilovač.

Využívá Hallova jevu, který se projevuje hlavně u polovodičů. Sondu tvoří tenká polovodičová destička, kterou prochází v jednom podélném směru stejnosměrný proud. Po vložení destičky do magnetického pole působí na pohybující se nosič Lorentzova síla a jejich dráhy se vychylují ve směru kolmého k vektoru magnetické indukce a pohybu těchto nábojů. Tím vzniká na protilehlých stranách destičky Hallovo napětí. To lze měřit citlivým měřicím přístrojem (milivoltmetrem), který je kalibrován pro určitou sondu.



Obr. 8 – Princip Hallovy sondy [1]



Obr. 9 – Ventilátor motoru s Hallovou sondou [63]

3.3 Vizuální metody

3.3.1 Úvod

Pokud využíváme vizuální metody pro stanovení shody výrobku se specifikovanými požadavky, jako je stav povrchu výrobku, geometrický tvar výrobku a provedení lícovacích ploch, dělíme je na přímé a nepřímé.

Přímá vizuální kontrola je definována jako kontrola, při které není přerušena optická dráha mezi okem pozorovatele a kontrolovanou plochou. Může se provádět bez pomůcek nebo s pomůckami jako jsou lupy, zrcadla, endoskopy, videoskopy nebo přístroje s optickými vlákny.

Nepřímá metoda je definována jako kontrola, při níž je dráha mezi okem pozorovatele a kontrolovaným povrchem přerušena. Používá se v případech, kdy není přímá vizuální kontrola proveditelná z důvodu nepřístupnosti, kdy se například zkoumají potrubní systémy nebo tlakové nádoby, nebo z důvodu bezpečnosti (ionizující záření atd.). Používá se pomůcek jako jsou videoskopy, přístroje s optickými vlákny a zahrnuje také využití fotografie, videa i roboty. [1]

3.3.2 Pomůcky pro přímou vizuální kontrolu

Nejjednodušším optickým přístrojem je lupa. Slouží ke zvětšení zorného úhlu malých blízkých předmětů. Je to konvexní čočka s malou ohniskovou vzdáleností a obraz je vidět za předmětem, vzpřímený a zdánlivý.

Lupy pro vizuální kontrolu mají zvětšení 2krát až 15krát a používají se nejčastěji tzv. čtenářské lupy, které mají pevné ohnisko a jsou opatřeny vnitřním měřítkem.

Zrcadla používaná pro vizuální kontrolu mají vysokou schopnost odrazit světlo. Využívají se rovinná a kulová (sférická). Rovinné zrcadlo poskytuje obraz neskutečný, vzpřímený, stejně velký a souměrný s předmětem, ale stranově převrácený. Kulová zrcadla se dělí na vypuklá (konvexní) a dutá (konkávní). Vypuklá odrážejí paprsky na vnější části povrchu zrcadla. Vytvořený obraz je vždy vzpřímený, zmenšený a zdánlivý. Dutá zrcadla odrážejí paprsky na vnitřní části povrchu. Velikost, poloha a typ vytvořeného odrazu závisí na vzdálenosti předmětu od zrcadla. Při vzdálenosti větší, než

je poloměr křivosti, je obraz zmenšený, převrácený a skutečný. Při vzdálenosti menší než poloměr křivosti a větší než ohnisková vzdálenost, je obraz zvětšený, převrácený a skutečný.

Lidské oko je při vizuální kontrole nejdůležitější zdroj příjmu informací. Z hlediska optiky lze oko považovat za spojnou optickou soustavu s měnitelnou ohniskovou vzdálenost. [1]

3.3.3 Průmyslové endoskopy

Endoskopy se využívají pro kontrolu těžko přístupných míst, bezdemontážní diagnostiku různých zařízení, sledování postupu koroze a posouzení kvality svarů. Provádí se s nimi přímá i nepřímá vizuální kontrola. Je možné k nim připevnit fotoaparát nebo barevnou průmyslovou televizní kameru.

Z hlediska konstrukce se dělí na pevné a ohebné.

Pevné endoskopy (boroskopy) přenáší obraz klasickou optickou soustavou. Mají vysokou rozlišovací schopnost a vysokou světelnost. Vyrábějí se v různých délkách a průměrech inspekční trubice. Patří k nim široké optické vybavení s rozsahem zorného úhlu 20° až 140°.

Ohebné endoskopy (fibroskopy) používají pro přenos obrazu svazek optických vláken, inspekční trubice je tedy ohebná. Využívají se při komplikovaném přístupu k pozorované oblasti. Natáčení do požadovaného směru je zajištěno výměnným objektivem, který je umístěn na konci fibroskopu a je dálkově ovládaný. Objektivy endoskopů jsou obvykle vyměnitelné a používají se v různých kombinacích zorného pole a úhlu pohledu.

Pro inspekci, kde je potřeba obraz vyšší kvality, než jaký mohou poskytnout fibroskopy, se používají videoskopy. Videoskopy poskytují obraz v nejvyšší kvalitě v oblasti věrnosti barev a z hlediska rozlišování. Přenos obrazu zajišťuje miniaturní barevná kamera s CCD čipem (Charge Coupled Device), která se nachází na konci endoskopu. Videoskopy jsou ohebné, mohou se dálkově ovládat a mohou měnit optické parametry. [1]



Obr. 10 – Pevný endoskop s vláknovou optikou [67]



Obr. 11 – Ohebný endoskop s funkcí videa [68]

3.4 Zkoušky ultrazvukem

3.4.1 Úvod

Zkoušení ultrazvukem se zavedlo kvůli potřebě zjišťovat skryté vnitřní defekty rozměrných výkovků a vývalků, které nebylo možné prozařovat a jejichž vady mohly vést k havárii nebo by byly objeveny při třískovém obrábění. První myšlenky použití ultrazvukové vlny ve zkoušení materiálů vznikly již v 30-tých letech dvacátého století. V roce 1942 Firestone jako první aplikoval princip echolokace na vyhledávání vad v materiálu. Do té doby byla echolokace používána ve vojenském námořnictví.

První ultrazvukový impulsový defektoskop vážil 136 kg, v 70. letech minulého století vážil okolo 6 kg a byl vybavený obrazovkou, bez možnosti ukládání dat a na konci devadesátých let vážil 1,5 kg, s možností ukládání dat do počítače. Moderní přístroje zahrnují do své oblasti zkoušení nejen kovové materiály, ale také např. kompozitní materiály. [1]

3.4.2 Princip ultrazvuku

Ultrazvuk je možné chápat jako zvukové vlny o frekvenci nad mezí slyšitelnosti šířící se prostředím, které je alespoň částečně slyšitelné.

Za pomoci sondy, která vysílá ultrazvukové vlny a další, která je přijímá, je detekována vada, která má příčné rozměry kolmé na směr šíření vlnění větší než poloviční délka vlny. V případě menší vady dochází k ohybu ultrazvukových vln a vada není detekována. [1]

3.4.3 Ultrazvukové sondy

Ultrazvuková sonda je součástí každého ultrazvukového defektoskopického zařízení. Její funkcí je vysílání vlnění do materiálu a přijímání echa od chyb.

Sonda musí generovat pulzy velké amplitudy, aby bylo možné přezvučit značné tloušťky zkoušeného materiálu při dobrém poměru signálu k šumu. Tato vlastnost je důležitá u materiálů s velkým útlumem, jako je např. austenitická ocel, litina a také plasty a kompozitní materiály.

Dále je nutné, aby sonda vysílala co nejkratší impuls, aby se zabezpečila dobrá hloubková rozlišovací schopnost. To je důležité pro rozeznání jednotlivých vad ležících blízko sebe.

Sonda musí být dostatečně mechanicky odolná a konstrukčně řešená tak, aby nevznikaly parazitické odrazy vnitřní sondy. Neexistuje univerzální sonda vhodná pro všechny zkoušky ultrazvukové defektoskopie.

Sondy můžeme podle způsobu generování ultrazvuku dělit na:

1. Sondy, jejichž základem je piezoelektrický měnič
2. Sondy s magnetostrikčním měničem
3. Sondy s elektrodynamickým měničem [1]

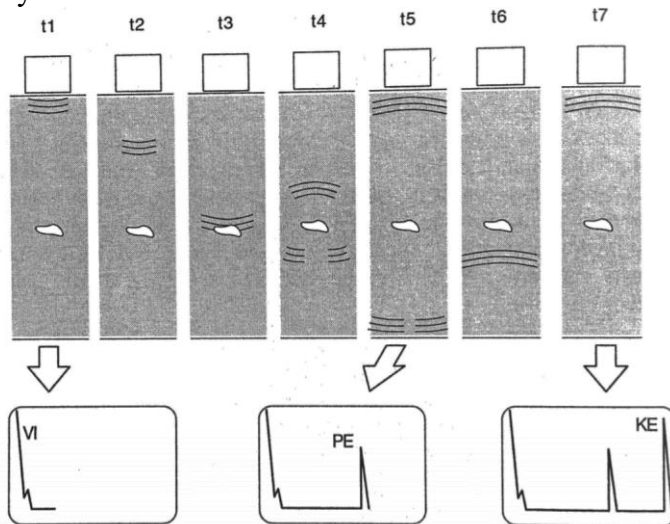
3.4.4 Metody ultrazvukové defektoskopie [1]

3.4.4.1 Průchodová metoda

Tato metoda je založena na zeslabení ultrazvuku při průchodu místa materiálu s chybou. Využívá dvě sondy umístěné proti sobě. Jedna sonda vysílá vlnění a druhá přijímá jeho část prošlou materiálem.

Metodu je možné použít pouze při zkoumání součástí s vhodnými protilehlými povrchy. Nevýhodou může být větší vzdálenost vady od přijímací sondy. Pokud je průřez vady menší než průřez ultrazvukového svazku, chyba nebude zaznamenána.

Výhodou v porovnání s odrazovou metodou je fakt, že ultrazvuk urazí poloviční dráhu, takže je méně oslabený. Je vhodná pro zkoušení těžko prozvučitelných materiálů, např. gumy.



Obr. 12 – Schéma průchodové metody – princip zobrazování ech [1]

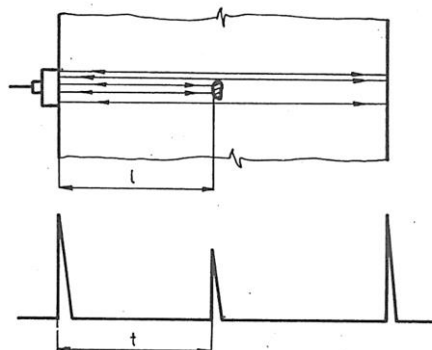
3.4.4.2 Odrazová metoda

Tato metoda je založena na zjišťování odrazů (ech) způsobených chybami materiálu. Přijímací sonda může, ale nemusí být i vysílací sonda.

Pro zkoušení je použit jen jeden volný povrch.

Nevýhodou je dvojnásobná vzdálenost, kterou urazí ultrazvuk a také existence mrtvého pásma, které vzniká za nalezenou chybou. Tato nevýhoda se dá zlepšit pomocí dvojité sondy, u které prakticky neexistuje mrtvé pásmo.

Pro zobrazování získaných dat se používá A-scan, B-scan a C-scan. Nejčastější zastoupení má A-scan, který zobrazuje amplitudy signálů získaných v jednom bodě v závislosti na čase, tedy závisí na hloubce materiálu. [1], [2]



Obr. 13 – Schéma odrazové impulzové metody a odpovídající A-scan [2]

3.5 Zkoušky prozařováním

3.5.1 Úvod

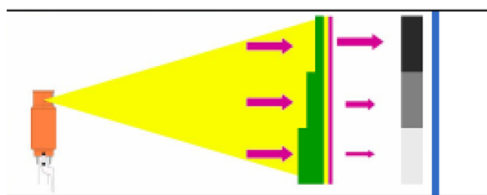
Tato metoda je používána hlavně pro zkoušení svarů a odlitků. Využívá záření rentgenové, gama a neutronové. Zdrojem těchto záření jsou rentgeny, betatrony a radioizotopy.

Využití této metody je významné ve slévárenství, svařování, hutních provozech, stavebnictví a oboru plastických hmot. [3]

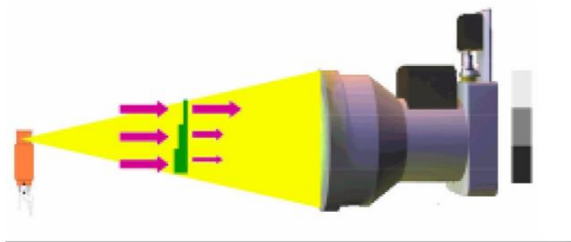
3.5.2 Radiologické metody [4]

Podle druhu použitého zdroje pronikavého záření a podle registrace obrazu zkoušeného výrobku dělíme radiologické metody na:

1. Metody radiografické – fotografický film se nachází těsně za prozařovacím objektivem (schéma metody na obr. 14)
2. Metody radioskopické – pomocí zařízení se převádí RTG záření do oblasti viditelného světla a pracuje se se zvětšením (schéma metody na obr. 15)
3. Metody ionizační – registrace prošlé intenzity záření zkoušeným materiálem indikátorem záření, založeným na principu ionizace



Obr. 14 – Metoda radiografická [4]



Obr. 15 – Metoda radioskopická [4]

3.5.3 Charakteristika záření [3]

Záření je obecně definované jako šíření energie prostorem. Záření může být korpuskulární, kdy nositelem zářivé energie jsou hmotné částice nabitě i nenabitě (elektrony, pozitrony, neutrony, α částice). Elektromagnetické záření nemá jako nositele zářivé energie hmotné částice, je to vlnové záření. Rozlišujeme přírodní (např. radioaktivní) a umělé (rentgenové) záření.

V oboru defektoskopie se využívá γ složky záření radioaktivních izotopů a rentgenového záření.

3.5.3.1 Gamagrafie

Zdrojem γ záření jsou radioaktivní zářiče. Radioaktivní záření vzniká z jádra radioaktivního prvku. V praxi jsou využívány izotopy, vyzařující převážně paprsky gama. Kvalitu záření gama určuje energie, aktivita a poločas rozpadu.

Energie zářiče je dána radioisotopem a určuje prozařitelnost materiálu (vlnovou délku záření – tvrdost záření).

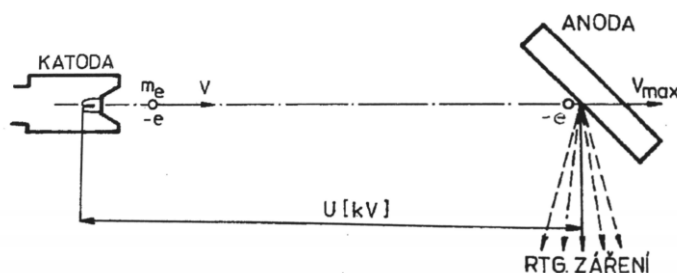
Nejčastějšími radionuklidy používanými v oblasti nedestruktivního zkoušení jsou rádium, kobalt, cesium, iridium, thulium a yterbium.

Gamazářiče jsou chráněné speciálními kryty z vysoce absorpčních materiálů, jako je olovo nebo slitina wolframu s uranem a jsou vybaveny různými ovládacími mechanismy pro ovládání na dálku.

3.5.3.2 Rentgenografie

Pronikavost rentgenových paprsků se posuzuje podle vlnové délky λ . Vlnová délka je nepřímo úměrná energii elektronu dopadajícího na anodu.

Pro získání velmi tvrdých rentgenových paprsků je třeba vysokých energií. Využívá se k tomu lineární nebo kruhové urychlovače. Schéma vzniku rentgenového záření je znázorněno na obr. 16.



Obr. 16 – Schéma vzniku rentgenového záření [3]

3.5.4 Film

Detekce rentgenového a gama záření umožňuje interakce fotonů s detekční látkou, což je oboustranná filmová emulze, pomocí ionizačních účinků fotonů, které zprostředkovane působí na vlastnosti detekční látky.

Jednou z vlastností filmu je citlivost, která je definována jako dávka, kterou potřebuje film k dosažení zčernání.

Filmy se vyvolávají v temné komoře za pomoci vývojky ručně. Při větším počtu snímků za den (okolo 100) se využívá automatové vyvolávání. [3]

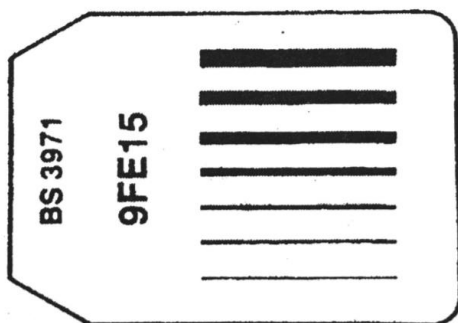
3.5.5 Hodnocení výsledků

První se na snímku hodnotí dosažená rozeznatelnost za pomoci drátkové měrky (obr. 17). Jakost radiogramu se určuje na základě nejmenšího na radiogramu ještě patrného průměru drátku a je ho možno vyjádřit číselně jako rozeznatelnost R , která se určí podle vztahu

$$R = (\rho/d) \cdot 100[\%],$$

kde ρ značí průměr nejmenšího ještě viditelného drátku na radiogramu a d je tloušťka stěny prozařovaného výrobku.

Rozměry vad ve směru záření se stanovují za pomoci drážkových měrek, které mají odstupňovanou hloubku drážky (defektometr). [3]



Obr. 17 – Drátová měrka [1]

3.6 Zkoušení těsnosti [1]

3.6.1 Úvod

Těsnost je odpor stěn a spojů různých materiálů, proti pronikání tekutin (plynů, par, kapalin) ze strany jejich větší koncentrace na stranu menší koncentrace. Netěsnost je tedy ztráta, nebo zhoršení této vlastnosti.

Velikost netěsnosti (vady) je definována intenzitou průtoku, ale ne geometrií. Přijatelný proud kapaliny netěsností se liší podle toho, co a kde se těsnost zkouší. Například jiné nároky na těsnost má říční remorkér a jiné pouzdro kardiostimulátoru.

Netěsnost tvoří shluky o průměrech různé velikosti. Velikost průtoku každým kanálkem určuje nejmenší průřez. Pravděpodobně se jedná o vady ve vazbě zrn a krystalů materiálu.

Zkoušení těsnosti je obor, který se zabývá zkoušením během výroby, montáže, uvádění do provozu a během provozování dílů, sestav a technologických celků. S rozvojem tohoto oboru se dařilo měřit stále menší průtoky, takže se prokázalo, že nulová těsnost není reálná.

3.6.2 Měření a hledání netěsnosti

Při měření netěsnosti se snažíme zjistit její velikost, tedy průtočné množství tekutiny, ale její polohu zanedbáváme. Naopak při hledání netěsnosti určujeme polohu výtoku tekutiny a velikost proudu je druhořadá. Některé postupy a metody mohou netěsnost lokalizovat i změřit.

Historicky nejstarší metody (např. bublinkový test) dokázaly určit polohu netěsnosti, ale její velikost byla možná pouze odhadnout.

Pokud je to možné, místo netěsnosti se nelokalizuje, protože je to drahé a časově náročné. Hledat netěsnost lze pouze na malém úseku. Nejprve se vyloučí místa bez netěsnosti a poté se metoda věnuje netěsnostem.

Jsou běžné situace, kdy je velice obtížné a někdy nemožné najít místo netěsnosti. Prokázal lze existenci úniku, ale ne poloha. Do těchto situací patří například:

1. Netěsnost na trubce ve svazku trubkového aparátu, kvůli nepřístupnosti k netěsné trubce

2. Netěsnost svarů příruby navařené na trubku dvojicí svarů, protože vnitřní svar je při tlakování nepřístupný a vnější nelze tlaku vystavit, jelikož je kořen oddělen vnitřním svarem
3. Netěsnost závěrného svaru na větším hermetickém systému, kde nelze aplikovat akumulaci zkoušku

Uvedené situace jsou pouze malým zlomkem příkladů. Ve většině případů lze nedostatky odstranit vhodnou konstrukční úpravou.

3.6.3 Metody hledání a měření netěsnosti

1. Akustická metoda – založena na akustické detekci úniku zvukové či ultrazvukové energie unikající v místě netěsnosti při úniku rozpínajícího se plynu
2. Bublínový test – detekce vady za pomoci unikajících bublin netěsností např. při ponoření zkoumaného objektu do vodní lázně nebo nanesení mýdlového roztoku na zkoumaný objekt a následné natlakování objektu
3. Pokles tlaku – detekce netěsností za pomoci kompresoru a tlakoměru, založena na principu změny tlaku vlivem přítomnosti netěsností
4. Zkoušky netěsnosti za pomoci halogenu – zkušební vzorek je naplněn halogenem a poté zkoumán infračerveným detektorem přítomnosti značkovacího halogenového plynu
5. Zkoušky netěsnosti za pomoci helia – objekt je naplněn heliem a poté zkoumán detekčním systémem
6. Lokalizace netěsností za pomoci vodíku – objekt je naplněn vodíkem a unikající plyn je detekován polovodičovým detektorem [5], [6]

4 Současné trendy v oblasti NDT

4.1 NDT povrchového stavu materiálu

4.1.1 Bakteriální buněčné filmy

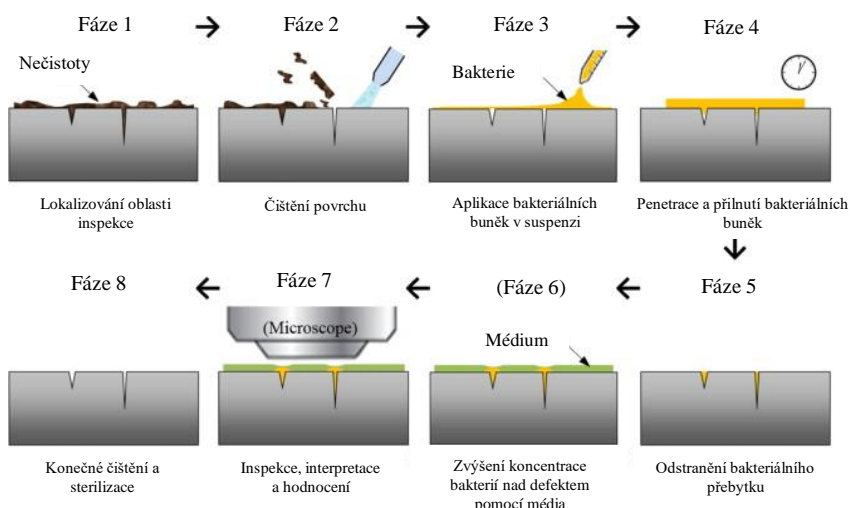
S rostoucí poptávkou po drobných výrobcích, které jsou vyrobené z pokročilých materiálů, roste i potřeba detekovat a charakterizovat defekty mikroskopických rozměrů, jako jsou mikrotrhliny o rozměrech od 5 do 10 μm . Například v oblasti ortodontie způsobují mikrotrhliny hromadění potravních odpadů, které má za následek vznik zubního plaku a infekce. U kloubních protéz povrchové vady snižují odolnost proti opotřebení. V elektrotechnice způsobují mikro-vady poruchy signálu.

Stávající techniky NDT mají špatnou citlivost zjišťování vad v tak malých rozměrech, proto jsou nevhodné pro detekování v mikrosvětě. Z toho důvodu byla vyvinuta nová technika založena na kapilární metodě.

Jako penetrant sloužila suspenze bakteriálních buněk. Bakteriální buňky jsou schopny přilnout k jiným buňkám a povrchům a prostřednictvím exopolymerní matrice tvoří strukturu nazývanou biofilm.

V prvotních pokusech byla použita suspenze bakteriálních buněk *R. erythropolis* a fluorescenční nukleonové kyseliny, které barví suspenzi na zelenou barvu. Byly vybrány tři materiály, které jsou v průmyslu běžně používány v mikroaplikacích: nerezová ocel, hliníková slitina a elektrolytická tyč. Defekty byly uměle vytvořeny diamantovým pravidelným čtyřbokým jehlanem (tvrdost podle Vickerse) a různým zatížením se vytvořily vtisky různých rozměrů.

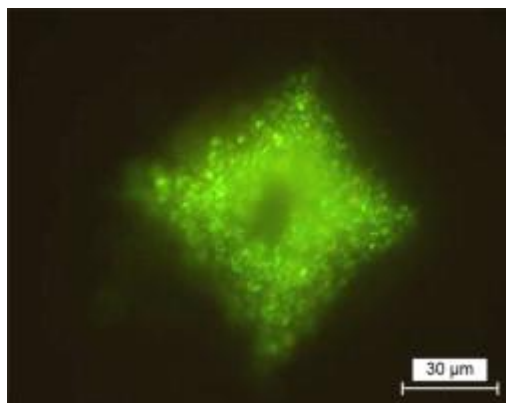
Postup metody je znázorněn na obr. 18. Povrch zkoumaného materiálu byl očištěn alkoholem a vysušen na vzduchu (fáze 1-2). Dále byla nanášena suspenze buněk na každou skupinu defektů a okolní povrch (fáze 3) a nechala se působit 0,5 až 5 minut (fáze 4). Čas prodlevy musel být tak dlouhý, aby umožnil vstup buněk do vad, ale dostatečně krátký, aby nedošlo k adhezi buněk k povrchu. Delší prodleva může způsobit biologickou korozi. Přebytková suspenze byla po uplynutí vhodného času odstraněna ubrousky (fáze 5). Detekování vad probíhalo za pomoci fluorescenčního mikroskopu (fáze 7) a poté byl odstraněn biofilm z vad.



Obr. 18 – Schéma postupu při detekci vad za pomoci bakteriálních filmů [7]

Experiment potvrdil, že suspenze bakteriálních buněk *R. erythropolis* je vhodná pro detekování mikroskopických povrchových defektů v oceli a hliníku (obr. 19). Měď se chová baktericidně, proto je pro ni použití bakterií pro detekci značně omezeno.

Tato technika je ekologická, jelikož se zde nepoužívají žádné škodlivé kapaliny a nejsou vytvářeny aerosoly. Dále je technika zcela neškodná, co se zdraví obsluhy týče, protože se zde používají pouze nepatogenní bakteriální kmeny. Testování může provádět i osoba bez specifické odbornosti v manipulaci s bakteriemi. [7]



Obr. 19 – Pozorování bakterií uvnitř uměle vytvořeného defektu [7]

4.1.2 Vizuální kontrola drony

V průmyslu a stavebnictví je potřeba kontrolovat často velké plochy, těžko přístupná místa a prostory, které by mohly být zdraví škodlivé. Patří sem například potrubní doprava, sluneční elektrárny nebo místa s vysokou teplotou. Pro zkoumání takových míst se v současnosti začaly používat bezpilotní letouny (Unmanned aerial vehicles – UAV) – drony.

Dronem se rozumí letadlo bez posádky, které se může ovládat na dálku nebo létat podle naprogramované trasy. Dron je vybaven kamerou, například detekující obraz v infračerveném spektru a kamerou detekující obraz ve spektru viditelného světla. Obraz se následně nahrává na úložní jednotku nebo přenáší Wi-Fi sítí přímo do počítače.

Jelikož je tento způsob NDT na velkém vzestupu, bude podrobně probíráán v další části této práce.

4.1.3 Infračervená termografie

Infračervená termografie je bezdotyková NDT technika založena na registraci teplotních rozdílů mezi zkoumanou součástí a defektem. Rozděluje se do dvou základních přístupů – aktivní a pasivní.

Pasivní přístup slouží ke zkoumání materiálů, které mají jinou teplotu než okolí. Nejčastěji se pasivní přístup využívá pro hodnocení stavu budov, infrastruktur, údržbu potrubní dopravy a strojů. Ve většině případech se používá pro kvalitativní hodnocení, například netěsnosti v potrubí přepravující médium jiné teploty než okolí.

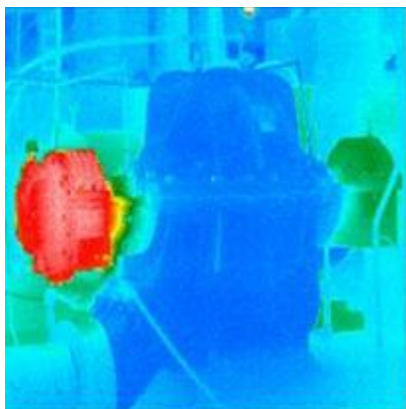
Aktivní přístup využívá externí zdroj tepla stimulu, které vyvolají příslušný teplotní kontrast. Jsou to například zábleskové lampy nebo tepelné lampy. Jelikož je možné provádět ohřev nebo chlazení v reálném čase, může se aktivním přístupem zhodnotit kvantita podpovrchových defektů.

Výhodou infračervené termografie je možnost kontrolovat velké plochy v krátké době, což vede k úspoře času, lidí a práce. Infračervené záření je bez rizika, jelikož není třeba žádného nebezpečného záření (např. rentgenového). Zaznamenáno je pouze infračervené záření vysílané ze zkoumaného materiálu.

Nevýhodou je omezená hloubka detekce, která je několik milimetrů. S přibývajícím tloušťkou materiálu se účinnost techniky sníží. Další nevýhodou může být v pasivním přístupu vliv atmosféry, např. rychlost větru, vliv slunečního záření a oblačnosti.

Vliv na tuto metodu má i tepelná vodivost materiálu. Kovy mají například vyšší tepelnou vodivost oproti kompozitům, které ji mají nižší. [8]

Ve strojírenství je jedním z využití termografie kontrola ložisek (obr. 20). Abnormální tření uvnitř ložiska vytváří teplo, které je detekováno termokamerou. Toto teplo způsobuje například vadné ložisko, nedostatečné nebo nadměrné mazání nebo špatná údržba. [9]



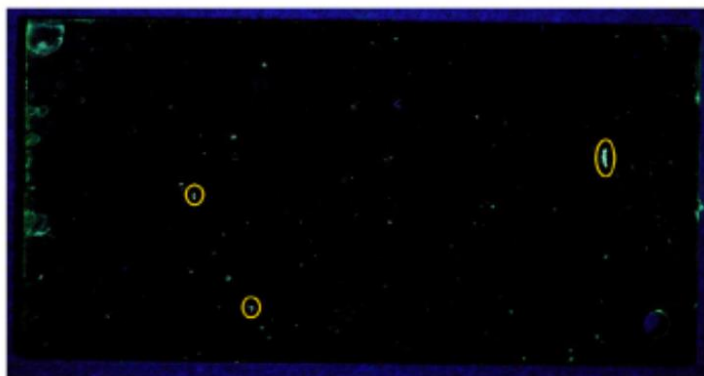
Obr. 20 – Lokalizace vadného ložiska infračervenou termografií [9]

4.1.4 Random Forest

Při použití fluorescenční kapilární metody v leteckém průmyslu se vyskytuje problém v šumu, který se objevuje na pozadí snímku (obr. 21). Způsobují ho geometrické nerovnosti a nedostatečnému očištění zkoumaného povrchu, tudíž selhání lidského faktoru.

Algoritmus Random Forest je v současné době testovaný na hladkých titanových deskách podrobených fluorescenční kapilární metodou. Na výsledných digitálních snímcích je schopen rozlišovat vadu a šum pozadí, přestože zatím testoval velmi málo nácvikových příkladů. Prognóza je taková, že s vyšším počtem nácvikových příkladů se zvýší přesnost algoritmu. Jeho aktuální přesnost je srovnatelná s lidskou.

Za pomoci této metody bude možné efektivně kontrolovat vady na součástkách určených pro vesmírný program. [10]



Obr. 21 – Ukázka metody Random Forest, vady zakroužkovány [10]

4.1.5 Skenování povrchu

Skenování povrchu se řadí mezi NDT vizuální metody. V oblasti průmyslu se používá pro kontrolu kvality výrobků. Využívá se pro detekci trhlin a geometrických nedostatků na povrchu součástí, např. pro kontrolu a hodnocení svařovacích ploch.

Metoda spočívá v naskenování povrchu výrobku a porovnání s CAD návrhem. Využívá se k tomu například barevná mapa odchylek, 3D měření v prostoru nebo vyhodnocení geometrických tolerancí. Nejmodernější bezkontaktní skenery poskytují rozlišení až 0,05 mm.

Výhodou 3D skenerů je jejich mobilita, která umožňuje skenovat téměř cokoli i mimo závod nebo laboratoř. Skenování může probíhat v závodě, laboratoři, mimo podnik i v extrémních podmínkách.

Skenery se mohou rozdělovat podle maximálních skenovacích rozměrů, které mohou skenovat, takže záleží na velikosti skenovaného objektu. Po překročení maximálních skenovacích rozměrů se zhoršuje přesnost měření.

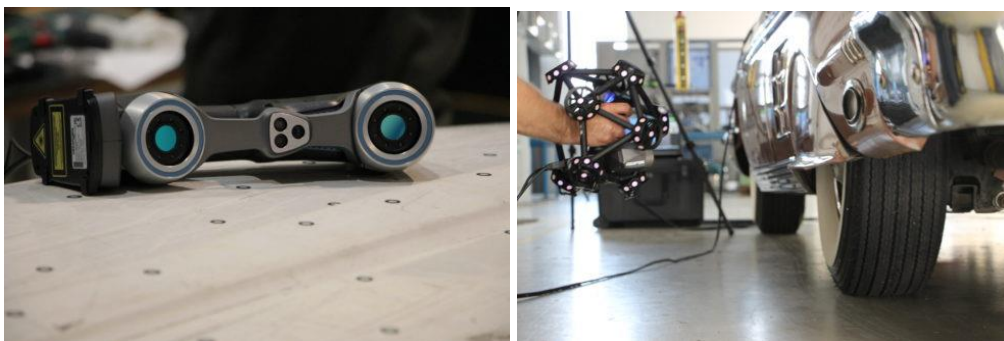
Dotykové skenery (CMM) se využívají pro kontrolu tvarově náročných výrobků. Při použití tohoto skeneru se nezachycuje celá součást, ale pouze jednotlivá místa na kontrolovaném objektu.

Pro souhrnnou kontrolu součástí s vysokou přesností se používají bezkontaktní laserové skenery. Laserové skenery kombinují řízené laserové paprsky a laserový dálkoměr.

Optické skenery skenují vysokou rychlostí. Měření nejsou tak přesná jako u laserových skenerů, ale urychlují proces kontroly. Princip optických skenerů je založen na měření intenzity světla odraženého od skenovaného povrchu. Tyto skenery jsou omezeny rozložením osvětlení dopadajícího na zkoumaný povrch.

Ukázky skenerů je možné vidět na obr. 22 a 23.

Získaná data se ukládají do předem určených formátů, které se liší podle skeneru, který data exportuje. Data mohou být vyjádřena pomocí trojúhelníkové sítě nebo mračna bodů. [11], [12], [13], [14]



Obr. 22 a 23 – Ukázka ručních 3D skenerů [13]

4.1.6 Vzdálená vizuální kontrola

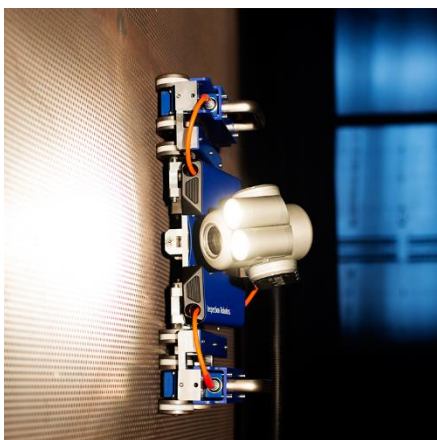
Běžné endoskopy, používané pro vizuální kontrolu, jsou součástí tyče nebo ohebné trubice. To omezuje rozsah kontroly. Vizuální kontrola má přitom 80% zastoupení v NDT potrubní dopravy. Průmyslové endoskopy mohou být nahrazeny inspekčními roboty.

Inspekční roboti umožňují kontrolu těžko přístupných míst, ke kterým člověk nemá přístup. Tyto místa jsou například omezena svou velikostí, teplotou, nacházejí se v kapalině nebo jsou člověku nebezpečná. Inspekční roboti významně podporují bezpečnost inspektorů.

Konstrukce inspekčních robotů je vybavena magnetickými koly pro kontrolu stropů a stěn (ukázka na obr. 24), místem pro upevněním kamery a osvětlením pro zlepšení navigace. Některé modely jsou uzpůsobeny tak, aby překonávaly překážky jako jsou například schody. Mohou také překovávat konvexní i konkávní rohy v úhlu 90° díky dvoum řadám magnetických kol (obr. 25).

Nevýhodou těchto robotů je omezení pouze na kontrolu konstrukcí z feromagnetických materiálů.

Nejčastější kontrolované objekty jsou ropné plošiny, lodní trupy, ocelové mosty, nádrže, rafinerie a potrubí. [15], [16]



Obr. 24 – Inspekční robot FAST RVI na svislé stěně [15]



Obr. 25 – Inspekční robot BIKE PLATFORM [16]

4.1.7 Metoda ACFM

V průmyslu mnoho konstrukcí a komponentů podléhá rutinním kontrolám. Inspekce se provádí za účelem zjištění zhoršení integrity daného systému a včasné poskytuje varování, které umožní provést nápravu ještě před poškozením celého systému. Inspekce musí být spolehlivá a musí minimálně narušit provoz zkoumaného systému.

Na konci 80. let byla potřeba vyvinout NDT techniku pro kontrolu ropovodů a plynovodů vedených pod vodou, protože současné NDT techniky nebyly možné použít. Zároveň byla potřeba vyvinout techniku, při které není potřeba odstraňovat nátěr, což je drahé a časově náročné. Pro tyto účely byla vyvinuta NDT metoda měření střídavého proudu, která byla následně použita i v dalších oblastech NDT.

Metoda ACFM (Alternating Current Field Measurement) je elektromagnetická kontrola pro detekci a určení velikosti defektů, často trhlin, na povrchu materiálu nebo v některých případech těsně pod povrchem materiálu.

Principem metody je protékání střídavého proudu v povrchu zkoumaného objektu. Trhlina tento jinak rovnoměrně rozložený proud narušuje. Elektrické pole indukuje magnetické pole a společně s narušením elektrického proudu se tím naruší i magnetické pole. Magnetické pole je měřeno pomocí senzorů, které detekují přerušování magnetického pole nad trhlinou a tím detekují samotnou trhlinu.

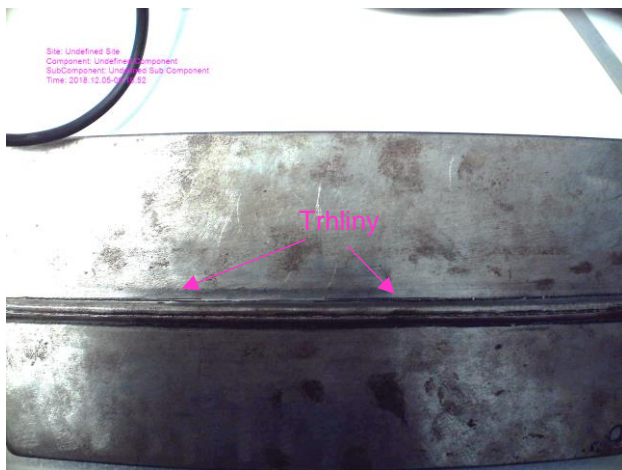
Běžně se používá sonda se dvěma snímači pole, které se nachází v hlavě sondy. Sonda také zavádí střídavý proud do kontrolovaného objektu. Pro kontrolu svarových trhlin se sonda posouvá podél svaru. Pro zesilování signálu se využívá přístroj, který zesiluje a digitalizuje údaje snímače.

Pro zobrazování výsledku zkoušky se používá speciální software. Na jedné straně obrazovky se vynášejí hodnoty B_x a B_z (obr. 27). B_x odpovídá hloubce vady, B_z zobrazuje začátek a konec trhliny. Pro usnadnění interpretace jsou hodnoty B_x a B_z vyneseny proti sobě na druhé straně obrazovky. Tím je vytvořena charakteristická smyčka zvaná „motýlí graf“ (obr. 28). Po identifikaci defektu se zadá délka vady, aby mohla být určena hloubka.

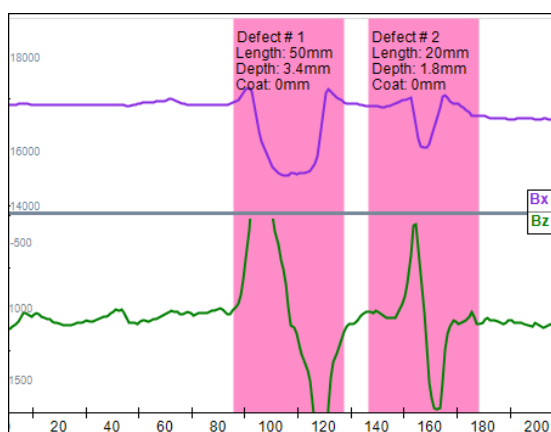
Výhodou metody ACFM je, že nevyžaduje žádný elektrický kontakt s povrchem. To napomáhá kontrole objektů, které mají na sobě nevodivý povlak až do tloušťky 5 mm. Další výhodou je možnost provádět metodu ACFM pod vodou.

Příklady nejčastějšího využití jsou kontroly závitů, trubic a svarů.

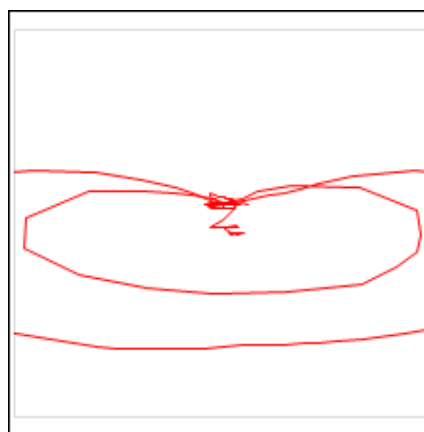
Reálný příklad kontroly svaru je možné vidět na obr. 26. Pomocí metody ACFM byly podél svaru nalezeny dvě trhliny s délkami 50 a 20 mm a hloubkami 3,4 a 1,8 mm. [17], [18]



Obr. 26 – Kontrolovaný svar [18]



Obr. 27 – Vynesené hodnoty B_x a B_z detekující dvě vady [18]



Obr. 28 – Vzniklý „motýlí graf“ [18]

4.2 NDT podpovrchového a objemového stavu materiálu

4.2.1 Metoda MMM

Tradiční metody NDT, jako je metoda rozptylových toků, zkoušky ultrazvukem nebo prozařováním, slouží pro detekování vad již vzniklých a určením těchto vad nelze zabránit poškození způsobené únavou materiálu zkoumaného výrobku nebo konstrukce.

Hlavním zdrojem vad a defektů v provozu jsou zóny s koncentrací napětí (stress concentration zone – SCZ), které vznikají v důsledku změny vlastností materiálu (koroze, únava a tečení materiálu). Detekce SCZ předchází vadám konstrukcí a zařízení.

Metoda kovové magnetické paměti (Metal Magnetic Memory – MMM) slučuje možnost NDT a lomové mechaniky, čím podporuje předcházení defektů způsobené únavou materiálu.

Využívá se v mnoha případech, kdy je nemožné použít zkoušky těsnosti kvůli nepřístupnosti.

Tato metoda bude probírána podrobně v další části této práce. [19]

4.3 NDT objemového stavu materiálu

4.3.1 Phased Array

Běžně používané metody zkoušení pomocí ultrazvuku jsou založeny na šíření akustického vlnění testovaným objektem a registrací změn, které jsou vyvolány interakcí mezi dvěma prostředími s rozdílnými akustickými vlastnostmi, např. mezi zkoumaným materiálem a bublinou, trhlinou nebo vměstkem. Konvekční ultrazvukové sondy mají pevně dané úhly ultrazvukových svazků.

Metoda Phased Array (PA) získává data postupnou změnou úhlu ultrazvukového svazku, zachycuje tedy oproti běžným ultrazvukovým metodám podstatně více informací o odražejících objektech (vadách), pomocí mnoha úhlů přímého dopadu, která vysílá PA sonda.

Tato metoda bude dále probírána v další části této práce. [20], [21]

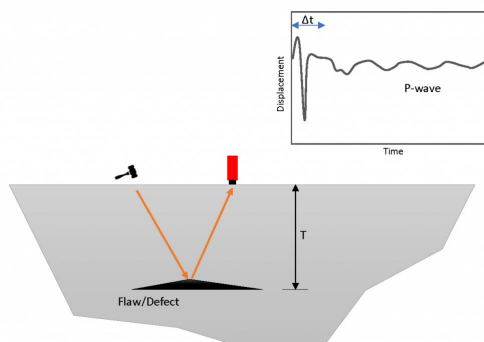
4.3.2 Metoda Impakt-Echo

Metoda Impakt-Echo se řadí mezi akustické NDT metody pro kontrolu betonových konstrukcí a zdiva.

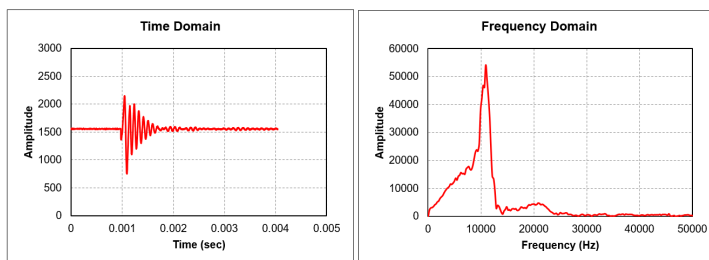
Zkouška využívá napětíové vlny (zvuk), které vznikají nárazovým úderem (Impakt) a šíří se betonem. Následně jsou zaznamenány odrazy a lomy zvukových vln z vnitřních defektů nebo od hranice vnějšího povrchu (Echo). Impuls generovaný rázem vzniká v jenom bodě a následné vlny se šíří ve všech směrech. Nejlepší uplatnění této metody je při zkoumání štíhlých prvků.

Schéma metody je znázorněno na obr. 29 a výsledný graf na obr. 30. Pomocí poklepání na malou ocelovou kouli proti povrchu zkoumaného betonu nebo zdiva vznikne mechanický náraz s krátkou dobou trvání. Tento mechanický ráz se využívá pro generování nízkofrekvenčních napětíových vln, které se šíří konstrukcí a odraží se od vad a od vnějšího povrchu. Povrchové posuny způsobené odrazy těchto vln se zaznamenávají pomocí snímače, který je umístěn blízko místa rázu. Analýza dat se provádí v časové nebo frekvenční oblasti.

Metoda Impakt-Echo je vhodná pro měření tloušťky betonových desek a stěn, ostění tunelů, vyhledávání defektů v betonových konstrukcích a dále pro vyhodnocování jejich stavu. [22], [23]



Obr. 29 – Schéma metody Impakt-Echo [23]



Obr. 30 – Vzniklé grafy závislosti amplitudy na čase (*vlevo*) a frekvenci (*vpravo*) detekující vadu [23]

4.3.3 Počítačová tomografie

Počítačová tomografie (Computed Tomography – CT) byla dříve rozšířenou metodou pro diagnostiku hlavně v medicíně. Nově se tato technika rozšiřuje i do oblasti NDT.

Základní princip je shodný pro medicínu i NDT. Rozdíl představuje skener. Lékařský skener představuje komplexní systém rotačního rentgenového zdroje a detekčního portálového systému. Tento komplex se využívá kvůli zabezpečení pacienta ve stabilní poloze. Průmyslové CT využívá možnosti otáčet zkoumaným objektem na otočném talíři.

Počítačová tomografie je důležitým nástrojem pro zajištění nejvyšší kvality výrobku. Umožňuje detekci vnitřních defektů a určení jejich kvantity za pomoci 3D modelů. Tyto 3D modely je následně možné porovnávat s původním CAD návrhem.

Tato technika bude dále probírána v další části této práce. [24]

4.3.4 Digitální radiografie

Digitální radiografie představuje pokrok v oblasti zkoušek prozařováním. Tato pokročilá technologie je založena na digitálních detektorových systémech, kdy je rentgenový obraz zobrazen přímo na obrazovce. Odpadá tak nutnost používání chemikálií pro vyvolání filmu, snižuje se doba nutná na vyvolání filmu, redukuje se dávka rentgenového záření a výsledné obrazy jsou poskytnuty ve vyšší kvalitě.

Digitální obraz vzniká pomocí detekčního senzoru, přes který je převedeno rentgenové záření na ekvivalentní elektrický náboj. Využívá se elektronických zobrazovacích detektorů, kterými jsou polovodičové čipy, které jsou citlivé na světlo nebo rentgenové záření.

Plochý panelový detektor, na který je převeden digitální snímek, poskytuje vysoce kvalitní digitální obraz s lepším poměrem odstupu signálu k šumu ve srovnání s jinými zobrazovacími zařízeními. Také poskytuje vylepšený dynamický rozsah, který zajišťuje vysokou citlivost.

Dle metody zpracování RTG záření se rozlišují dvě metody – přímý a nepřímý převod obrazu.

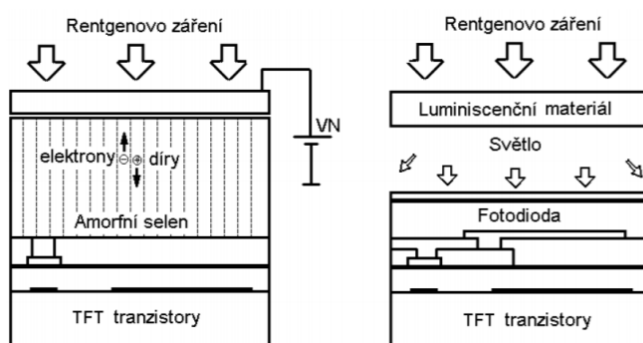
Detektory s nepřímou digitalizací využívá kazety podobné filmovým. Tyto kazety obsahují paměťovou fólii. Výhodou je možnost integrace systém s nepřímou digitalizací do nynějších rentgenových přístrojů.

Paměťové folie jsou vyrobeny z rentgenově stimulačního fosforového materiálu. Po pohlcení rentgenového záření se uvolňují elektrony do excitační energetické hladiny, v krystalické mřížce folie se vytvoří vrstva zadržení a elektrony zadržené ve folii v ní

zůstanou v řádech hodin. Latentní obraz je tvořen reliéfem elektronů rozmístěných v základní i excitační energetické hladině.

Kazeta s filmem je poté umístěna do čtecího zařízení, kde se latentní obraz převede na světelný signál pomocí neonového laseru. Vzniklé světelné záblesky jsou zesíleny a převedeny na analogový elektrický signál, který je převeden na digitální, a ten je zpracováván počítačem a výsledný obraz je zobrazen na monitoru.

Detektory pracující s přímou digitalizací využívají obrazové detektory, které jsou sestaveny do ploché matice (flat panel). Dělí se dále na detektory s přímou konverzí, které převádějí rentgenové záření na elektrický signál, a detektory s nepřímou konverzí, kde k pohlcení rentgenového záření dochází ve scintilátoru a vzniklé světelné záblesky jsou převedeny na elektrický signál. Schéma flat panelu s přímou a nepřímou konverzí je znázorněno na obr. 31.



Obr. 31 – (zleva) Schéma konstrukce flat panelu s přímou konverzí a nepřímou konverzí [26]

Flat panely s přímou konverzí zajišťují převod rentgenového záření na elektrický signál pomocí polovodičových obrazových elementů, které jsou vyrobeny z amorfniho selenu. Rozlišovací schopnost obrazu je závislá na počtu obrazových elementů na flat panelu.

Přeměna rentgenového záření na elektrický signál se provádí pomocí vnitřního fotoelektrického jevu v elektronovém obalu selenu. Při tomto jevu je generována dvojice nábojových nosičů elektron – díra.

Před ozářením je na selenovou vrstvu přivedeno vysoké elektrostatické pole pomocí horní elektrody. Vlivem pole jsou generované nábojové nosiče nasměrovány se sběrným elektrodám. Vlivem tvarujícího elektrického pole uvnitř selenové vrstvy vzniká vzájemná separace detekčních elementů. Dvojice elektron – díra jsou ovlivňovány siločárami vnějšího elektrického pole, takže nedochází k jejich bočním pohybům a jsou nasměrovány přímo ke sběrným elektrodám. Detekční vrstva selenu silná 250 μm pohltí 95% fotonů.

Flat panel s nepřímou konverzí pracuje na principu přeměny energie rentgenového záření v luminiforu na světelnou energii. Světelné záblesky vstupují do polovodičových fotodiod z amorfniho křemíku. Zde se uvolní elektrický náboj pomocí vnitřního fotoefektu.

Mezi nejčastější luminifory patří amorfni luminifor, který má horší rozlišovací schopnost, a luminifor s krystalickou strukturou, který pomocí paralelního upořádání krystalů omezuje rozptyl světla.

Mezi výhody digitální radiografie patří detekce vad v reálném čase, kratší doba expozice, absence chemikálií pro vyvolání filmu, tudíž šetří čas a nezatěžuje životní prostředí. Dále také zvyšuje produktivitu, vylepšuje se ukládání dat a poskytuje okamžitou zpětnou vazbu.

Aplikace této metody je možná například v leteckém a kosmickém průmyslu, pro detekci koroze pod izolací a jejího šíření, lokalizací cizích objektů a vad při odlévání a svařování a kontrolu kompozitů a vyztužených komponentů.

Nevýhodou této metody jsou vysoké pořizovací náklady rentgenových přístrojů, čtecího zařízení a monitoru. Dále je nevýhodou také složitost vybavení, nákladný servis a potřeba zabezpečení dat. [25], [26]

5 Moderní metody NDT

5.1 Vizuální kontrola drony

5.1.1 Historie

První bezpilotní letadla byla zkonstruována během první světové války pro vojenské účely. První modely vzlétávaly pomocí katapultu nebo letecky pomocí radiového ovládání. V roce 1918 zahájila americká armáda výrobu bezpilotních torpéd a byl vyvinut model Kettering Bug, který byl úspěšný v zátěžových testech. Další vývoj tohoto modelu zastavil konec války.

V meziválečném období vyrobili Britové řadu rádiově řízených letadel, které se používali jako cvičné cíle během výcviku, stejně tak pokračovali i ve Spojených státech amerických. Mezi tyto UAV patřil i model DH.82B Queen Bee (obr. 32)



Obr. 32 – Hydroplán Havilland Queen Bee L5984 [27]

Ve vietnamské válce byly poprvé nasazeny ve velkém měřítku průzkumné drony. V té době se drony začaly používat v různých rolích, jako například pro boj s nástrahami, spouštěním střel na pevné cíle a vypouštěním letáků.

Po této válce začal vývoj dronů i v dalších státech. Nově vyvinuté modely byly sofistikovanější, vylepšila se vytrvalost a schopnost udržovat výšku.

Nyní mají drony mnoho funkcí. Monitorují změnu klimatu, provádějí operace po přírodních katastrofách, fotografují, natáčejí a dodávají zboží. Jejich kontroverzní použití je v oblasti armády, kde jsou využívány pro průzkum, sledování a cílené útoky. [27]

5.1.2 Části dronu

Základní část dronu tvoří rám. Slouží jako kostra, na kterou jsou umístěny všechny prvky dronu tak, aby byl dron vyvážený. Rám má tvar čtyřúhelníku, mívá různou strukturu, ale má vždy minimálně tři otvory pro umístění vrtulí.

Další důležitou částí jsou motory. Ty jsou nezbytné pro otáčení vrtule. Počet vrtulí odpovídá počtu motorů, jelikož je každá vrtule poháněna samostatně.

Elektronický regulátor otáček je elektronická řídicí deska, která reguluje rychlost motoru, tedy i rychlost vrtulí. Dále umožňuje zastavení dronu ve vzduchu.

Vrtule bývá nejčastěji konstruována jako listy, které vytvářejí rozdíl tlaků mezi horní částí rotoru a dnem. V horní části je nižší tlak ve srovnání se spodní částí, proto se dron vznese do vzduchu.

Mnoho dronů je vybaveno funkcí „návrat domů“. Tuto funkci umožňuje letová deska, která provádí záznam místa startu a pokud je potřeba, dron se do tohoto místa vrátí, aniž by byl nasměrován.

Ovládání dronu umožňuje rádiový vysílač, což je kanálový vysílač a komunikátor. Dron potřebuje k efektivnímu provozu minimálně 4 kanály. Každý kanál má svou účinnou frekvenci pro vedení dronu v určitém pohybu.

Zdrojem energie dronu je baterie. Ta dodává energii všem elektronickým zařízením ve struktuře za pomoci rozvodových kabelů. Na počátku se používaly baterie typu nikl-metal hydrid nebo nikl-kadmium, ale jejich využití se snížilo, když se začaly využívat lithiové baterie. Ty mohou na rozdíl od prvních dvou typů baterií ukládat vyšší množství energie.

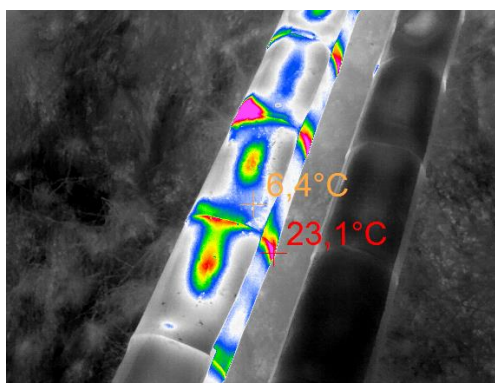
Nemálo je důležité přistávací zařízení. Je to konstrukce určená pro bezpečné přistání dronu. Nejvýznamnější jsou dva druhy – pevné přistávací zařízení a zatahovací podvozek.

Pro snímání videa je k dronu připojena kamera, která mívá dvojí účel. Nejčastěji se používá k pořizování fotografií a videozáznamu. Další možnost, jak ji použít, je usnadnění řízení dronu, kdy technik řídicí dron pomocí videopřenosu vidí aktuální polohu dronu a ovládá jej, jako by byl na palubě dronu (FPV – First Pilot View). Kamery musí být lehké a odolné, což umožňuje absence displeje. [28], [29]

5.1.3 Kamery používané drony

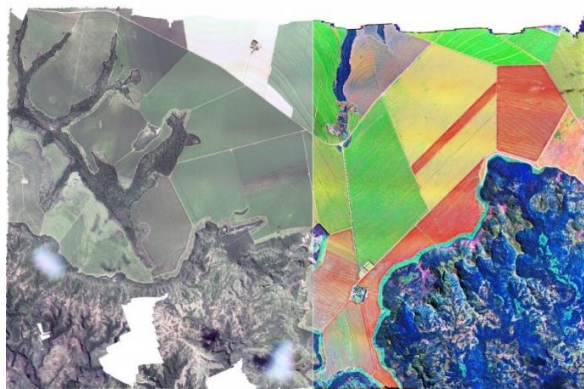
Nejvýznamnější parametr, ve kterém se odlišují videokamery je rozlišení. Nejnižší rozlišení mají kamery HD (High Definition), které mají 1280x720 pixelů a hodí se spíše pro soukromé účely na levné drony. Full HD kamery (FHD) mají 1920x1080 pixelů, tedy jsou lepší než HD, ale stále ještě je můžeme řadit mezi kamery pro běžné používání. V oblasti NDT se využívají 4K (4K UHD) kamery, které mají čtyřikrát více pixelů, než FHD, 3840x2160 pixelů. Tato hranice je již překročena C4K s 4096x2160 pixely. Vývoj videokamer se neustále posouvá, proto se předpokládá, že brzy bude k dispozici ještě lepší rozlišení. [29]

V případě použití infračervené termografie musí termokamery mít odolné provedení, protože prostředí, ve kterém snímají, jsou často prašné a náročné. Konstrukce je ale velmi podobná jako u klasické kamery. Tepelné záření je objektivem promítáno na detektor záření, kde se mění jeho intenzita. Následně je tato informace zdigitalizována a převedena na termogram. Termogram je složen z pixelů, kde jednotlivé pixely odpovídají povrchové teplotě zkoumaného povrchu. [30]



Obr. 33 – Ukázka snímku potrubí termální kamerou [30]

Multispektrální a hyperspektrální kamery rozdělují světelné spektrum do více vlnových pásem. To umožňuje kameře zaznamenat kompletní spektrum světla na každém pixelu, zaznamenat unikátní spektrální signaturu zkoumaného objektu a určit tak jeho materiálové složení. Největší uplatnění UAV s multispektrální a hyperspektrální kamerou je v zemědělství. Umožňují určit množství zelené biomasy v ploše pixelu, velikost úrody, obsah vody a určit množství plevelu. Multispektrální kamera zaznamenává data několika jednotek spektrálních pásem a hyperspektrální několik desítek až stovek. [31], [32], [33], [34]



Obr. 34 – Rozdíl mezi multispektrálním (vlevo) a hyperspektrálním mapováním [74]

5.1.4 Využití

Drony se využívají v případě, že je kontrolované místo nepřístupné, například je na velké ploše bez přístupu dopravy, či je na místech vysoko nad zemí, kde není možné využít vysokozdvizných zařízení.

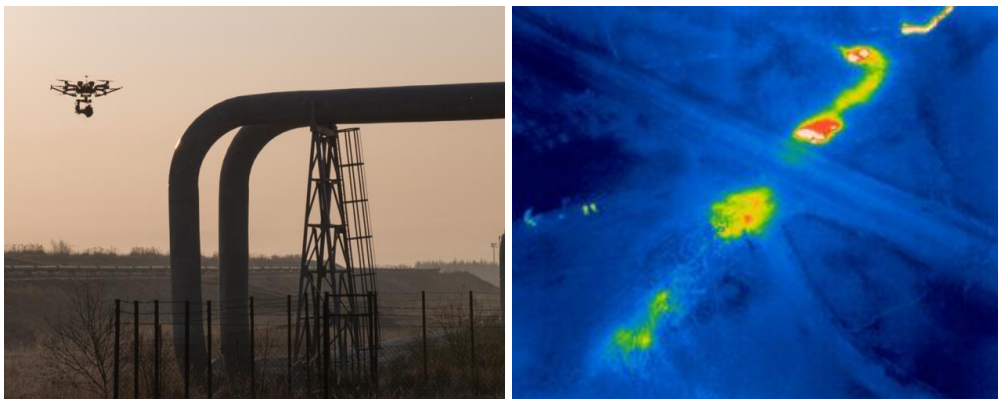
5.1.4.1 Potrubí

Často jsou kontrolovanými objekty dálkové sestavy potrubní dopravy. Spolehlivost potrubí ovlivňuje špatná konstrukce, nevhodně zvolený materiál, atmosférické vlivy a poškozená izolace.

Dron dokáže snímat potrubí a posílat snímky provozovateli dronu v reálném čase. Provozovatel má tedy okamžitý přehled o stavu potrubí a při detekování vady ji může detailně zaměřit a poté se dané místo prohlédne osobně. Tradičními kamerami pro

viditelné spektrum se odhalí jen zlomek vad. Nemohou odhalit únik média pod povrch země nebo ztenčení izolace.

Pro tyto účely se výhodně používá měření pomocí infračervené termografie, která je vhodná, pokud médium v potrubí má jinou teplotu než okolí. Pokud je potrubí nad zemí, může se zkoumat poškození izolace a místa tepelných ztrát. V případě podzemního vedení je možné detekovat únik média, které zahřívá postiženou oblast. To ulehčuje a zlevňuje detekci úniku média, jelikož v dřívějších dobách se vykopávaly kilometry potrubí, aby bylo místo úniku nalezeno. [30]



Obr. 35 – Inspekce potrubí dronem [70]

Obr. 36 – Termogram potrubí s teplou vodou [70]

5.1.4.2 Mostní konstrukce

Inspekce mostů byly dřív náročné, jelikož vyžadovaly uzavření mostu, těžkou techniku nebo provádění kontroly v noci, aby nebyl přerušen provoz. Bylo zjištěno, že odstavení čtyřproudového dálničního mostu v metropolitní oblasti v USA stojí okolo 14 600 dolarů na 10 hodin, což je doba odpovídající inspekce celého mostu. Tato manuální kontrola stojí 18krát více, než když je použit dron a je k němu potřeba dvakrát více lidí. Výhoda dronů v inspekci mostů je kromě finanční stránky i bezpečnost pracovníků provádějící inspekci.

Pomocí dronu jsou při inspekci pořizeny snímky s vysokým rozlišením i v těžko přístupných oblastech.

Většina inspekčních dronů je vybavena termálními a vysokorychlostními RGB kamerami. Firma Giatech Scientific vybavuje drony systémem iCOR, který detekuje korozi v železobetonových konstrukcích a mapuje postup koroze. [35]



Obr. 37 – Kontrola spodní části mostu Foresthill [35]

Obr. 38 – Most Foresthill [73]

5.1.4.3 Oblast energetiky

Reaktorové budovy jaderné elektrárny Prairie Island společnosti Xcel Energy se dříve kontrolovaly pomocí jeřábů. Celá inspekce trvala obvykle jeden týden.

Pomocí dronu se celá tato inspekce zkrátila na dva dny. Byly pořízeny kvalitní fotky s vysokým rozlišením navíc v reálném čase, což zlepšuje kvalitu kontrol a kontroly jsou bezpečnější a levnější.

Xcel Energy úspěšně používá drony ke kontrole větrných turbín, vedení zemního plynu a stožárů elektrického vedení.

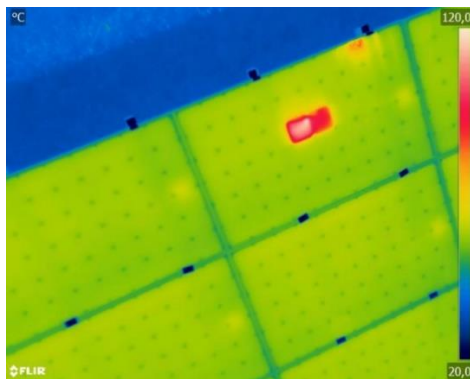
Kontrola pole větrných turbín může trvat i několik měsíců. Inspektor musí vylézt až k turbíně a pořídit snímky často svým mobilním telefonem. Snímky mohou být nekvalitní, vystoupat na jednotlivé větrné turbíny je fyzicky náročné a nebezpečné.

V takových případech se používají speciální drony, které jsou upraveny na špatné povětrnostní podmínky. [36], [37]



Obr. 39 – Obraz snímající dronem při kontrole větrné turbíny [37]

Inspekce dronů vybavených infračervenými kamerami se využívají pro inspekci velkých fotovoltaických systémů. Termokamera zachycuje rozdíly teplot panelu a zobrazuje je v termografu. Správně fungující panel má homogenní rozložení teploty, zatímco na poškozeném modulu jsou jasně vidět teplotní rozdíly. [38]



Obr. 40 – Termogram poškozeného solárního panelu snímáný dronem [38]

5.1.5 Vývoj UAV

Některé technické aspekty dronů je třeba vylepšit. Jde například o bezpečnost a citlivost vrtulí. Vrtule jsou nejcitlivější část konstrukce. Mohou způsobit zranění a při setkání s cizím tělesem, např. větví, způsobují pád UAV.

Problémy vrtulí může vyřešit návrh Marcuse Kunga, který vytvořil koncept Impeller Drone. Pohon tohoto dronu je založeno na principu odstředivého čerpadla, kdy je médium hnáno radiálními lopatkami do svého obvodu, kde je tvarovaným statorem usměrňován. Celý tento princip je snadno představitelný na vysoušeči vlasů.

Výhodou těchto dronů je bezpečnost a tichý chod. Vhodný je tedy tento model pro amatérské využití a filmaře.

Nevýhodou je účinnost dronu, takže je potřeba další vývoj této techniky.

Další bezvrtulový dron předvedl Edgar Herrena, který místo vrtulí použil Dysonovu turbínu. Principem je nasávání velkého množství vzduchu přes dutý prstenec a vhnání jej za něj pomocí duté štěrby v prstenci. [39]



Obr. 41 – Pohon dronu na principu odstředivého čerpadla [39]



Obr. 42 – Použití Dysonových turbín pro pohon dronu [39]

Další modernizací v oblasti konstrukce dronů je model Elios Drone. Elios je první protikolizní dron, který umožňuje kontrolovat složitá, nepřístupná, přeplněná místa, která byla dříve pro kontrolu dronem nebezpečná nebo nemožná.

Konstrukce dronu je doplněna o ochrannou klec, která využívá gimbal mechanismus pro udržení kolizí ze všech směrů. Pomocí duálních optických a tepelných senzorů se dron může ovládat v uzavřených prostorech bez rizika pádu. Při nárazu do překážky se odrazí, čímž nevznikají škody jak na letadle, tak i na překážce. Elios je odolný proti prachu, stříkající vodě, snadno se ovládá a odolává teplotám od 0°C do 50°C. Dron je vybaven palubním osvětlením pro možnost kontroly v tmavých prostorech. [40]

Elios byl úspěšně nasazen například pro kontrolu skladovacích a potravinářských nádrží, lodních prostorů na detekci koroze a kontrolu vnitřních prostorů kotlů. [41]



Obr. 43 – Dron Elios s ovládáním [40]



Obr. 44 – Kontrola skladovacích nádrží [41]

5.1.6 Ekonomické zhodnocení

Z hlediska bezpečnosti a rychlosti mohou drony jednoznačně nahradit vizuální kontrolu za pomoci těžké techniky a nebezpečného výstupu na vyšší objekty. Šetří čas a z dlouhodobého hlediska i peníze, jelikož několikanásobně zkracují kontrolu objektů.

Drony se hodí pořídit do větších firem, například státních podniků zaměřených na konstrukce a potrubní dopravu.

Pro menší firmy by nákup dronů nemusel být výhodný, jelikož mimo samotného dronu je nutné mít vyškoleného zaměstnance s pilotním průkazem. Vzhledem k tomu, že tento jediný pilot může nahradit řidiče výškové techniky, lezce i několik obsluhujících dělníků, může být vyškolení nebo zaměstnání tohoto pilota velkou investicí například pro podnik poskytující NDT techniky.

5.2 Metoda MMM

5.2.1 Úvod

Koncept magnetické paměti kovu byl představen poprvé v roce 1994. Po představení tohoto technického konceptu byly zavedeny pojmy „magnetická paměť země“ v archeologii, „magnetická paměť“ v záznamu zvuku a „účinek tvaru paměti“ podmíněný orientovaným vnitřním pnutí v kovových produktech.

Metoda MMM byla založena na vlivu výskytu anomální magnetizace kovu v oblasti velkých deformací materiálu v důsledku působení pracovních zatížení.

Výskyt anomální magnetizace kovu může být například pozorován v oblasti cyklického napětí kovového drátu. V místě rozlomení drátu po cyklickém ohýbání v různých směrech vznikne teplo a pomocí magnetometru se zde detekuje magnetizace kovu. Dalším příkladem vzniku magnetizace kovu je řezání kovu rámovou pilkou na kov a místo tření ozubených kol.

5.2.2 Princip

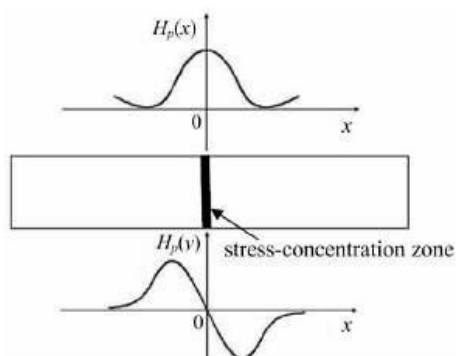
Metoda MMM je založena na analýze magnetického rozptylového pole (self – magnetic leakage field – SMLF), které se vyskytuje v zónách stabilních pásů posuvných dislokací, určených působením pracovního zatížení.

SMLF vzniká při tvorbě doménových hranic při hromadění dislokací s vysokou hustotou. SMLF bylo detekováno i na nově vyrobených strojírenských výrobcích. Přirozená magnetizace při výrobě vzniká při zahřívání feromagnetického materiálu nad Curieho teploty a následné zchlazení i ve slabém vnějším magnetickém poli Země. Vzniklý stupeň magnetizace odpovídá magnetizaci za normální teploty v magnetickém poli s vysokou intenzitou.

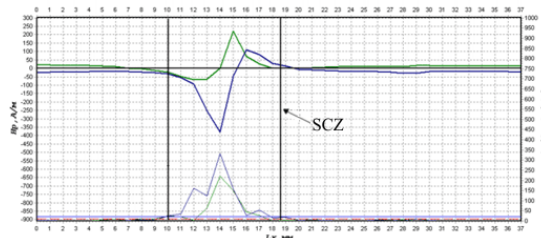
Signály SMFL jsou tvořeny tangenciální složkou $H_p(x)$, která je rovnoběžná s povrchem zkoumaného materiálu, a složkou $H_p(y)$, která je na povrch kolmá. Pokud složka $H_p(x)$ dosáhne maximální hodnoty a složka $H_p(y)$ má nulovou hodnotu a je kladně negativní, je indikována zóna koncentrace napětí – SCZ (obr. 45).

SCZ jsou tvořeny zbytkovým napětím v místních zónách objektu, které vznikají během výrobního a metalurgického procesu. SCZ se vyskytují především v okolí metalurgických a výrobních vad. Detekce SCZ je znázorněna na příkladu kontroly ocelové trubky na obr. 46.

Tvorba magnetické struktury produktu nastává přímo po krystalizaci při chlazení pod bodem Curieho teploty. V této fázi je chlazení produktu zpravidla nerovnoměrné a kovové vnější vrstvy se chladí rychleji než vnitřní a tepelné napětí se šíří napříč výrobkem, tvoří se mřížka a magnetická struktura. [42], [43], [44]



Obr. 45 – Schéma rozložení SMLF v zóně koncentrace napětí [43]



Obr. 46 – Výsledný graf závislosti H_p na Lx ocelové trubky s detekovanou SCZ [44]

5.2.3 Měření

Kontrola probíhá pomocí testeru napěťové koncentrace (Tester of Stress Concentration – TSC), kterým se přejíždí přes sledovanou oblast. Používají se k tomu skenovací zařízení s vodícími kolečky (obr. 47). Zařízení se skládá ze snímacích sond a elektronikou pro zesílení a digitalizaci přijímaných signálů. Počet nutných přejíždění se odvíjí od počtu sond a šířky záběru. Naskenované hodnoty intenzity magnetického pole nebo gradientu magnetického pole je možné zobrazit na displeji TSC (obr. 48). Tyto výsledky se zobrazují jako číselné hodnoty nebo graficky v podobě magnetogramu. Následně se data mohou uložit, přenést do úložiště nebo smazat.

Při objevení míst s vysokým gradientem, tzn. s vysokou koncentrací napětí SCZ, se lze na dané místo vrátit a detailně jej proměřit.

Výsledky měření jsou zpracovány do protokolu. Protokol obvykle zahrnuje informace o kontrolovaném objektu, popis provedených měření, popis nebo náčrt skenování, magnetogram, analýzu naměřených dat, stav zařízení a fotodokumentaci.

Používá se více typů skenovacích zařízení, odlišujících se počtem a umístěním sond. Pro kontrolu potrubí ležící v hloubce 1 až 2 metry se využívá speciální vysoce citlivé zařízení. [45]



Obr. 47 – Skenovací zařízení Typ 1-8M [77]



Obr. 48 – Tester napěťové koncentrace [76]

5.2.4 Výhody a nevýhody metody MMM

Hlavní výhodou nedestruktivní metody MMM je možnost kontroly zařízení i během provozu, což šetří čas i peníze. Výhodná je i rychlost měření. Povrch kontrolovaného objektu nemusí být před kontrolou upraven.

MMM rozeznává SCZ, proto pomáhá předcházení únavovému poškození. Akustická emise a vibrace nemají vliv na kvalitu měření.

Tuto metodu není možné použít na uměle zmagnetované kovy a nemagnetické materiály. Metodu může omezovat i přítomnost cizích magnetických materiálů v těsné blízkosti měřeného objektu, externí magnetické pole a elektrické obloukové svařování do vzdálenosti jednoho metru. [45]

5.2.5 Příklady využití

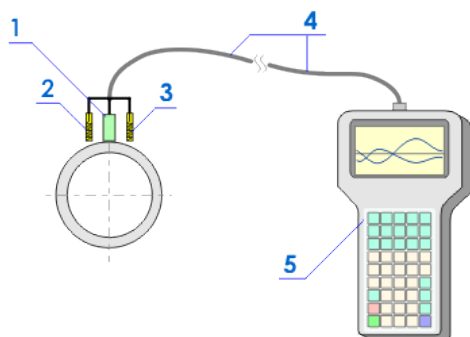
5.2.5.1 Diagnostika potrubí, plynovodů a ropovodů

Zajištění bezpečnosti a spolehlivosti stárnoucích potrubí se řadí mezi nejdůležitější technické problémy. Například v Rusku se nachází více než 300 tisíc kilometrů potrubní sestavy, při tom je okolo 40% plynovodů a 60% ropovodů v provozu přes 20 let.

Zavedený postup údržby potrubí, který spočívá v generálních opravách jednotlivých segmentů, které zahrnují někdy i výměnu izolací a trubek, nemůže zajistit spolehlivost celé tratě kvůli své délce a odlišnému stavu.

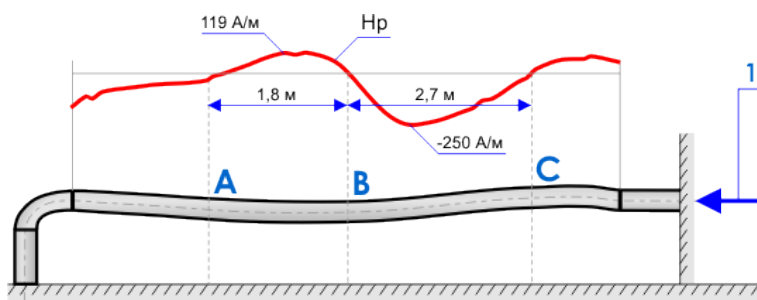
Pro účely dlouhodobé spolehlivosti a bezpečnosti ropovodů a plynovodů byl navržen celý koncept. Tento koncept obsahuje data destruktivních i nedestruktivních zkoušek segmentů, které jsou založeny na statistice provozu. Dále stoprocentní kontrolu všech segmentů pomocí moderních NDT technik (AE, MMM, in-pipe diagnostika...), které určí SCZ, které jsou hlavními zdroji škod. Koncept zahrnuje i dodatečné inspekce s tradičními metodami NDT, jako je rentgenování. Celý koncept zhodnotí reálnou životnost potrubí.

Potrubí se kontroluje pomocí specializovaného magnetometrického přístroje – zařízením pro zjišťování koncentrace napětí (Tester of Stress Concentration – TSC). Přístroj je vybaven obrazovkou, jednotkou paměti a snímacím zařízením, které je se skládá z vozíku a nainstalovanými senzory, které měří délku potrubí a magnetické pole H_p . Schéma kontroly potrubí je znázorněn na obr. 49. Inspekce nevyžaduje úpravu povrchu a v některých případech není třeba odstraňovat izolaci.



Obr. 49 – Schéma kontroly potrubí pomocí dvoukanálového snímače: 1- snímač délky; 2,3 – snímač magnetického pole; 4 – propojovací kabel; 5 – TSC [46]

Na obr. 50 je vidět rozložení magnetického pole H_p podél segmentu potrubí s viditelným poškozením. Schéma rozložení pole H_p odpovídá skutečnému napětí.



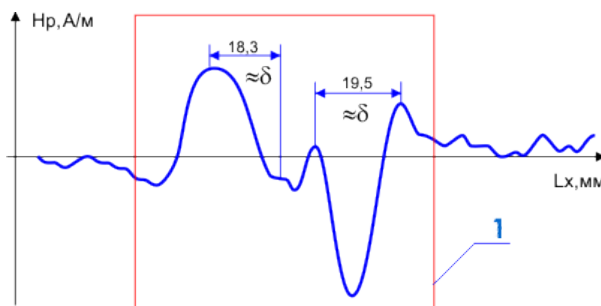
Obr. 50 – Rozložení H_p podél úseku plynovodu, 1 – průtok plynu [46]

Společnost Energostatika a.s. vyvinula měřicí komplex, který je využíván pro neinvazivní magnetometrickou kontrolu potrubí, které jsou umístěny ve dvoumetrové hloubce a víc. Inspektor se pohybuje rychlostí 2 km/h. Určují se segmenty potrubí, které jsou nejvíce namáhány a jsou tedy náchylné ke vniku vady. Na těchto segmentech se dodatečně provádějí kontroly, aby se určil druh vady.

Svarové spoje potrubí o velkém průměru (okolo 1,4 až 3 m) jsou kontrolované kontaktní metodou pomocí detektoru a využívá se zde metoda MMM (obr. 51). Povrch se kontroluje rychlostí 100 metrů za hodinu a více. Není nutné odstraňovat izolaci. Příkladným výsledkem kontroly je magnetogram na obr. 52 se znázorněnou zónou SC. [46]



Obr. 51 – Kontrola potrubí kontaktní metodou [46]



Obr. 52 – Výsledný magnetogram, 1 – zóna SC [46]

5.2.5.2 Hodnocení kvality svařovaných spojů

Přestože technologie svařování existuje více než 100 let, stále se objevuje mnoho problémů s kontrolou kvality svařovaných spojů. Mezi tyto problémy patří například nízká účinnost tradičních metod, nedodržování normami určené maximální velikosti vad, změna tvaru a rozměru konstrukce v důsledku nehomogenního ohřevu a chlazení při svařování, špatný výběr vhodných svařovacích technologií a jiné.

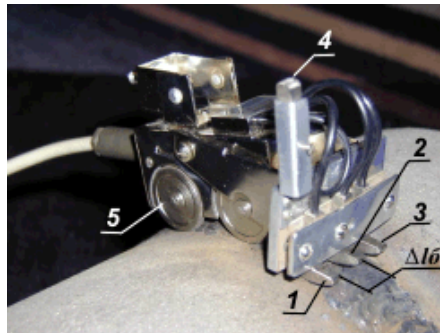
Jedním z nejdůležitějších problémů NDT kontroly svarů je hledání a definování místa systému, které má největší předpoklady ke vzniku vady. Toto místo je koncentrací SCZ. Nalezení místa koncentrace SCZ je důležité pro optimalizaci technologického postupu svařování jak při výrobě svarových spojů, tak i při jejich provozu.

Tradiční metody NDT slouží k detekci trhlin ve svarových spojkách, ale je velmi obtížné s nimi odhalit příčiny svarové nestability. Strukturní nestabilita svarů je opak strukturní stability, která je vyjádřením dlouhodobé schopnosti materiálu odolávat vnějším vlivům provozního prostředí beze změny vlastností.

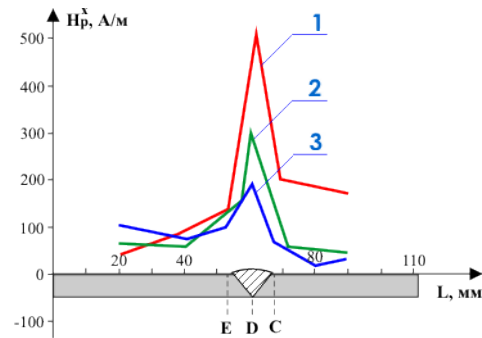
Pomocí metody MMM je možné určit SCZ svarových spojů a odhalit tak slabá místa svařenců.

Na obr. 53 je znázorněno měření tupého svaru trubek pomocí snímače se čtyřmi kanály.

Obr. 54 znázorňuje rozložení tangenciální složky magnetického rozptylového pole detekované při kontrole metodou MMM v poloze kolmo k tupému svaru dvou plochých desek. Magnetogram ukazuje místa SCZ v různých částech desky podél svaru. [47], [48]



Obr. 53 – Znáznornění monitorování tupého svaru trubek: 1, 2, 3 – měniče ferometrů skeneru pro registraci H_p pole; 4 – převodník ferometru pro vyladění H_p ; 5 – hnací kola měřiče délky [47]

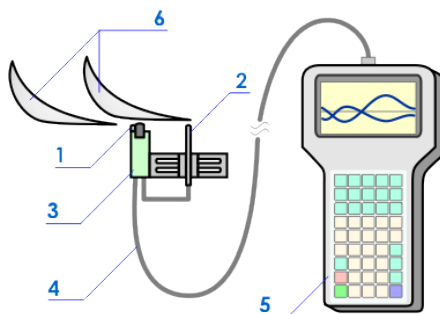


Obr. 54 – Rozložení tangenciální složky pole H_p při měření kolmo na svar: 1, 2, 3 – měření na různých částech desky [47]

5.2.5.3 Kontrola parních turbín

K předběžnému selhání lopatek parních turbín výrazně přispívá koroze. Největší poškození struktury kovu se nachází v oblastech s maximální hodnotou H_p . Metoda MMM detekuje lopatky, které mají blízko k selhání, čímž může předcházet nečekané poruše turbíny.

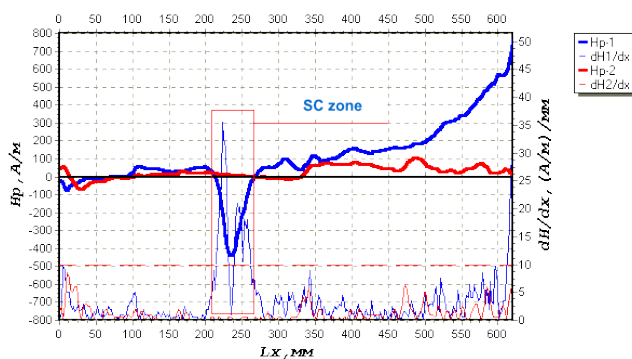
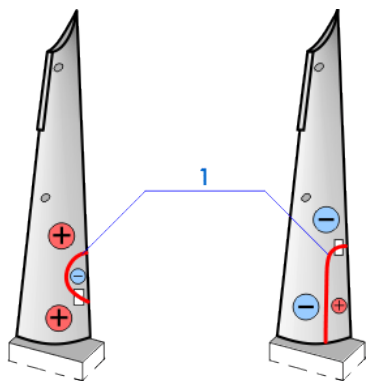
Schéma kontroly lopatek parní turbíny je znázorněno na obr. 55, 56 a 57. Měření se provádí na straně vstupu a výstupu páry, tedy na konvexním povrchu hrany lopatky.



Obr. 55 – Schéma kontroly turbínových lopatek pomocí TSC a snímacího zařízení: 1, 2 – snímače průtoku; 3 – měření délky; 4 – propojovací kabel; 5 TSC; 6 – čepele lopatek [49]

Samotné skenování TSC snímačem se vede ve směru od kořenové části hrany lopatky k periferní části, postup je ale možné obrátit. Během měření se na displeji TSC zobrazují grafy šíření rozptylového pole H_p podél celé hrany lopatky.

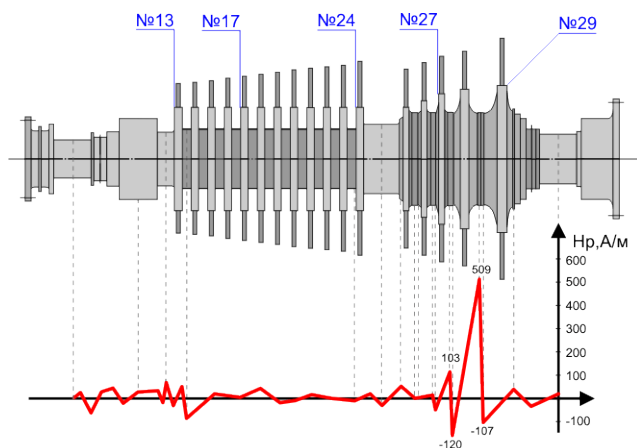
Inspekci se určují části turbíny, které pracují v nejvíce namáhavých podmínkách. Na určených lopatkách jsou detekovány SCZ. [49]



Obr. 56 – 1 – Čáry znázorňující napětíovou koncentraci na povrchu lopatek [49]

Obr. 57 – Rozložení H_p na hraně lopatky, zvýrazněna SCZ [49]

Další využití metody MMM je diagnostika parních turbín. Na obr. 58 je znázorněn graf H_p turbíny, která se nachází ve vodní elektrárně Konakovo. Na obrázku je jasně viditelná změna H_p na náboji disku číslo 28. V tomto místě byly detekovány významné axiální vibrace. [50]



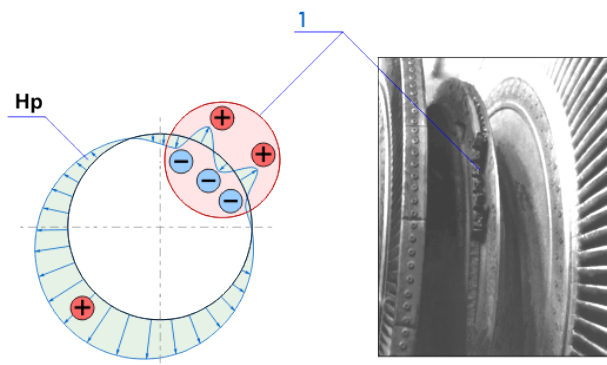
Obr. 58 – Výsledek měření parní turbíny [50]

Ostříkovací otvory parních turbín se kontrolují pomocí speciálního snímače. Tento snímač se skládá z pouzdra s instalovanou kartou pro zpracování signálů z měničů. K pouzdru je připojena plastová trubka, která je dostatečně tuhá, aby ovládala pohyb skenovacího zařízení uvnitř kontrolované trubice. Připojovací kabel se nachází v plastové trubce. Tento snímač je charakteristický svou univerzálností v inspekci vnitřních průměrů trubek.

Inspekce nevyžaduje přípravu povrchu.

Po skončení měření pomocí metody MMM se otvor rotoru prohlédne endoskopem a v místech, kde byly detekovány SCZ se provede odběr vzorků materiálu.

SCZ mohou být detekovány pomocí metody MMM i na okraji disku pevné kované části rotoru turbíny. Postupné pole šíření H_p v zóně SC, které je znázorněno na obr. 59, charakterizuje chybu hustoty hrany lopatky v drážce disku. To vede k únavovému selhání rotoru. [51]



Obr. 59 – Rozložení H_p na ráfku rotoru parní turbíny, 1 – zóna SC [51]

5.2.6 Ekonomické zhodnocení

Metoda MMM je vhodná do všech podniků, ve kterých dochází k poruše konstrukcí a materiálu vlivem cyklického namáhání. Jelikož jsou aplikací této metody na rutinní prohlídky odhalovány pnutí, která zapříčiňují většinu vad, předchází kolizím způsobené jinak vzniklou vadou. Tak významně šetří peníze a čas, o které by se přišlo vzniklým prostojem kvůli odstavení zařízení a opravou.

5.3 Počítačová tomografie

5.3.1 Úvod

Přestože CT byl od 70. let primárně metodou diagnostiky v medicíně, nyní se projevuje jako účinný nástroj pro NDT kontrolu v průmyslu.

CT sken představuje trojrozměrnou mapu hustoty materiálu libovolného objektu, který je možné prozářit RTG zářením. CT sken je vytvářen z 2D projekčních obrazů dílu na pole digitálního detektoru (digital detector array – DDA) nebo z jednotlivých řad řezů CT z lineárního diodového pole (linear diode array – LDA). Po vytvoření těchto obrazů umožňuje software určený pro analýzu CT provádět řezy objektu v libovolném směru. Tento princip tak napomáhá detekci vad, určení jejich velikosti a vnitřní struktury.

CT skenování umožňuje vizualizovat vnitřní strukturu způsobem, který dříve umožňovalo pouze destruktivní testování. [52]

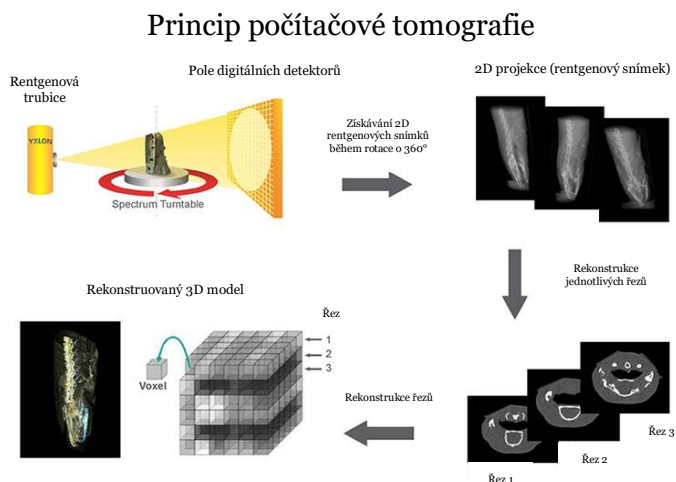
5.3.2 Způsob získávání obrazu CT skenu

Průmyslový CT skener se skládá ze zdroje RTG záření o vysokém výkonu, otočného manipulačního stolu nebo mechanismu a detektoru rentgenového záření.

Pořizování 2D snímků probíhá pomocí vějířového nebo kuželového rozevření paprsku při rotaci zkoumaného objektu o 360°. Poté se provádí pomocí algoritmu

rekonstrukce jednotlivých řezů. Z těchto řezů vzniká složený 3D model kontrolovaného objektu. Schéma principu počítačové tomografie je znázorněn na obr. 60.

Kvalita pořízených dat a jejich přesnost se odvíjí od kvality zdroje a detektoru a stability manipulačního mechanismu.



Obr. 60 – Schéma principu počítačové tomografie [52]

5.3.3 Tvary používaných rentgenových zařízení

Podle druhu materiálu se rozlišuje tvar použitého rentgenového záření.

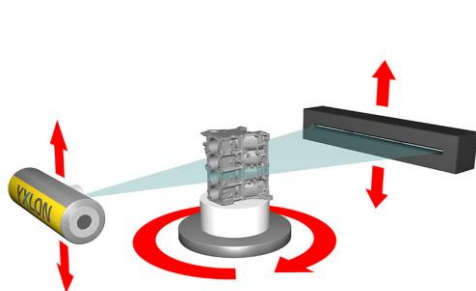
Pro skenování velkých a tvarově složitých objektů se skenování jednotlivých řezů provádí za pomoci generování záření ve tvaru vějíře. Toto záření je zachyceno lineárním detektorem (LDA).

Tento druh skenu zahrnuje rotační pohyb zkoumaného objektu a posuvný pohyb skenování může být zajištěn jak skenovaným objektem, tak i rentgenem pohybující se současně s detektorem.

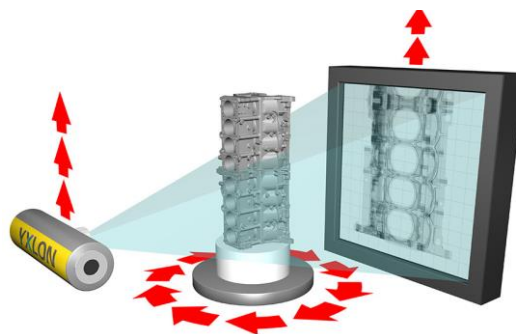
Obecně je skenování vějířovitým zářením je vhodné pro skenování objektů, které vyžadují vyšší energii záření (≥ 320 kV).

Polymery, malé kovové odlitky, zdravotnické prostředky, biologické objekty a elektronické komponenty se skenují pomocí záření kuželovitého tvaru. Toto záření ve tvaru kužele následně zachycuje plochý digitální detektor (DDA).

Použití kuželového tvaru záření na větší objekty nebo na objekty s hustotou větší, než je hustota hliníku zpomaluje skenování a 3D model je pořízen v delším časovém úseku. Typický soubor naskenovaných dat je pořízena okolo 15 minut.



Obr. 61 – Skenování rentgenovým paprskem ve tvaru vějíře s lineárním detektorem [52]



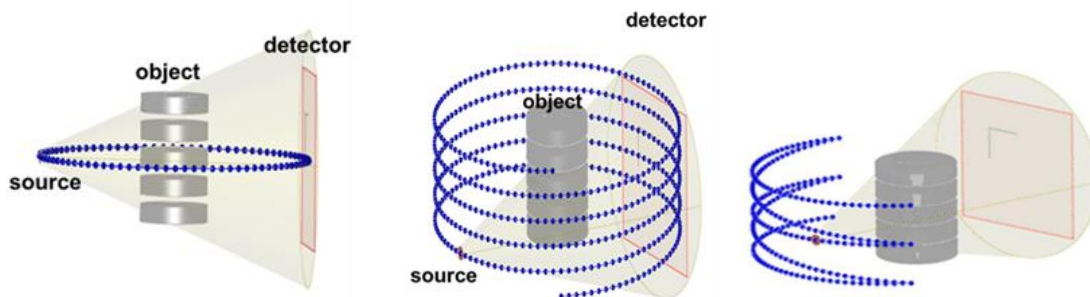
Obr. 62 – Skenování rentgenovým paprskem ve tvaru kužele s plochým digitálním detektorem [52]

Pohyb otočného mechanismu může být proveden třemi způsoby: kruhově, spirálně a složeným pohybem (obr. 63).

Kruhové skenování se využívá ve chvíli, kdy posuvný pohyb skenu provádí zdroj záření a detektor. Inspektor při kruhovém skenování nastavuje počet otáček a expozič.

Při spirálním (helikálním) CT se kontrolovanou součástí současně otáčí i posouvá, čímž vzniká spirála. Inspektor definuje počet otáček, délku posuvu, maximální úhel natočení a počet záběrů. Spirální CT se využívá pro sken dlouhých objektů.

Složené skenování se využívá v souvislosti s roboty. [52], [53]



Obr. 63 – Tomografické posuny: (zleva) kruhový, spirální a složitý

5.3.4 Software

Pro vytvoření 3D modelu z 2D snímků v CT technologii se využívají dva algoritmy – FDK a CEA (PixTV).

Modernější analytický algoritmus FDK (Feldkamp-Davis-Kress) je založený na Fourierově principu, kdy jsou čísla poměru signálu k šumu (signal-to-noise ratio – SNR) a projekce dostatečně veliké. Má vyšší rychlost zpracování než PixTV a je robustní. Jeho nevýhodou je vyšší počet projekcí pro zpracování 3D modelu

Původní algoritmus PixTV je založen na teorii komprimovaného snímání. Tento algoritmus je opětovně rekonstrukční algoritmus, který normalizuje celkovou variační normu. Jeho nevýhodou oproti FDK je obtížná volba parametrů a jeho pomalejší zpracování 3D modelu. [54], [55]

5.3.5 Využití CT

Zatímco 2D rentgenová kontrola je používána už desítky let, 3D počítačová tomografie byla používána pouze ve výzkumných a vývojových laboratořích. Nejčastěji se analyzovaly velmi drahé konstrukce.

S příchodem vývoje automatizace se CT mohlo aplikovat pro účely výrobních procesů. Využívá se jako nástroj pro kontrolu kvality a optimalizuje výrobní procesy. Poskytuje rychlou, přesnou kontrolu kvality a rozměrů zkoumaného objektu. [56]

5.3.5.1 Letectví a kosmonautika

Na kontrolu složitých leteckých součástí, výrobních procesů a materiálu v leteckém průmyslu nestačí tradiční metody, jako je ultrazvuk a 2D radiografie. Jelikož kontrola kvality v letectví a kosmonautice ovlivňuje výkonnost a bezpečnost letadel, je potřeba vady přesně detekovat.

Pomocí CT je možné rychlé a kvalitní zobrazování částí motoru, jako jsou například vysokotlaké turbínové lopatky.

Nejnovější techniky kontroly v leteckém průmyslu využívá vějířový paprsek a LDA detektory, kvůli své vysoké propustnosti a přesné detekci procházejícího záření. Pomocí speciálního softwaru je možné využívat pokročilé funkce, jako je např. měření tloušťky stěny v každém řezu CT. [56]

5.3.5.2 Automobilový průmysl

Na rozdíl od leteckého průmyslu se v automobilovém průmyslu zaměřuje kontrola kvality více na rychlost a minimální narušení toku výroby. Bezpečnost a spolehlivost výrobků se ale přesto považuje za důležitou.

Nejnovější inovací v oblasti CT je aplikace automatizované počítačové tomografie přímo ve výrobní lince.

CT sken probíhá za pomoci portu s RTG zdrojem a odpovídajícím víceřádkovým detektorem, který se otáčí okolo výrobku, který leží přímo na výrobním páse.

Vzniklá rekonstruovaná data kontrolovaného dílu se automaticky vyhodnocují při načtení dalšího dílu do systému. Díky tomu se při detekci vady může proces výroby pozastavit a upravením parametrů se předejde zmetkovitosti dalších dílů., což vede k úspoře peněz a času. [56]

5.3.5.3 Kompozitní materiály

Pokrok v technologii CT přináší možnost mikroohniskového CT skenování. Tato technologie umožňuje snímat obraz ve vysokém rozlišení, řádově v mikrometrech. Z tohoto důvodu se technologie CT stává významným nástrojem při zkoumání materiálů, a to hlavně při analýze kompozitních materiálů a jejich vnitřní struktury.

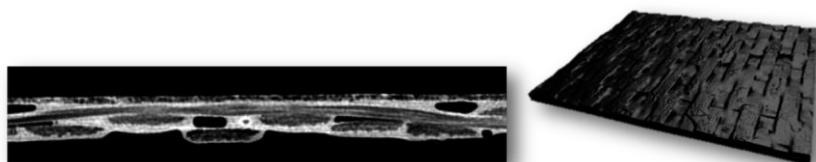
Aplikací CT technologie je mnoho a neustále se přichází na nové způsoby jejího využití. Testování CT významně napomáhá identifikaci způsobu poškození a selhání. Tato identifikace byla dříve prováděna za pomoci destruktivních metod, což je časově náročné.

Objem získaných 2D skenů se pohybuje v řádech gigabajtů (více než 20 GB), data lze zpracovat do 3D modelu a numericky analyzovat.

Na obr. 64 je zachycená malá část struktury kompozitu složená z uhlíku a epoxidu při rozlišení okolo 4 mikronů. Při analýze byl vzorek (malý kompozitní blok) vystaven rentgenovému záření a snímky se obrazově optimalizovaly pro zvýšení kontrastu mezi uhlíkovými vlákny a epoxidovou pryskyřicí. Tímto procesem se obrazově odstranilo pryskyřicové pojivo, a tím se odhalila samotná vlákna. Získané údaje mohou být použity

pro vyhodnocování strukturních vlastností materiálů a výrobních procesů. Pomocí speciálních softwarů lze numericky vyhodnotit konzistenci vláken a jejich orientaci skrz strukturu.

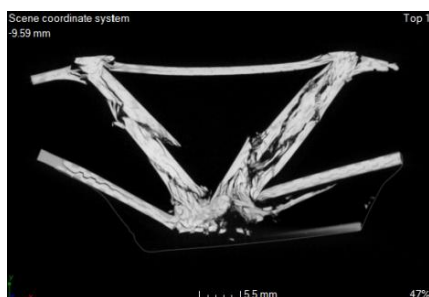
Rentgenové CT skenování je možné provádět i během výrobního procesu. Na obr. 64 je zachycen CT sken s kompozitu prepregu, pořízen při vysokém rozlišení. V době pořizování snímku nebyl materiál ještě plně vytvrzen, a tak jsou na snímku patrné dutiny a otvory v pryskyřičném materiálu.



Obr. 64 – CT sken průřezu (vlevo) a povrchová struktura prepregu [57]

Mikroohniskové CT je využíváno i v makro měřítku. S jeho pomocí je možné detekovat malé defekty jako je pórovitost a tenké delaminace, které jsou zobrazovány s vysokým rozlišením.

Technologie CT se využívá i pro skenování systémů složitých struktur, které již jsou v poruchovém režimu. Na obr. 65 je snímek nosné konstrukce, která selhala vlivem mechanického zatížení. Pomocí CT je možné studovat rozsah selhání bez pomoci destruktivního testování, které by porušilo vzorek. [57]



Obr. 65 – CT sken poškozené nosné konstrukce [57]

5.3.6 Ekonomické zhodnocení

Kontrola za pomoci počítačové tomografie je velmi drahou metodou s nákladným zařízením a požadavky na obsluhu jsou vysoké. Metoda je vhodná do velkých podniků a laboratoří, které vyvíjí nové technologie a materiály, které je poté potřeba podrobně prozkoumat.

5.4 Phased Array (PA)

5.4.1 Úvod

Metoda PA byla vyvinuta v 70. letech v Holandsku pro medicínské účely. Rozvoj této metody pokračoval v Japonsku, kde bylo sestrojeno zařízení, které pracovalo ve 2D režimu a získávalo 17 obrázků za sekundu.

V průmyslové oblasti NDT se PA využilo v 80. letech a tato technika byla standardizována ve Spojených státech amerických. [20]

5.4.2 Princip

Metoda Phased Array (PA) je založena na principu modifikací akustických možností sond. Pomocí PA vznikají ultrazvuková data generováním postupně řízenou změnou úhlu ultrazvukového svazku v různých směrech. Výhoda PA oproti využití konvekčních sond, které mají pevný úhel ultrazvukového svazku, spočívá v zachycení podstatně více informací o odražejících objektech (reflektorů) za pomoci vějířovité série úhlů svazku vyzářených z jednoho kontrolního bodu. [21]

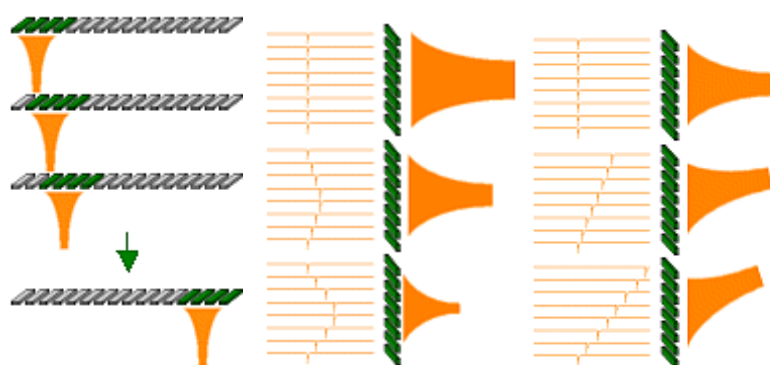
5.4.3 Použití Phased Array

Metoda PA je založena na použití převodníků tvořených jednotlivými prvky, přičemž může být každý prvek řízen nezávisle na ostatních. Sondy jsou připojeny ke speciálně přizpůsobeným ultrazvukovým měničům, které umožňují nezávislé vysílání a přijímání ultrazvukového vlnění. Tyto sondy jsou schopné během vysílání a příjmu ultrazvukového svazku provádět elektronickou formou časové zpoždění signálu pro každý ultrazvukový měnič sondy.

Fokusace ultrazvukového svazku je založena na časovém zpoždování ultrazvukového pulzu. Tento princip se používá pro kontrolu desek, tyčí, trubek nebo pro kontrolu svarů. Toto skenování se skládá z pohybu paprsku v prostoru aktivací několika prvků sondy PA. Skupiny prvků jsou postupně aktivovány pro pohyb paprsku podél snímače.

Elektronické zaostřování je založeno na použití elektronického zpoždění, které je aplikováno během vysílání a příjmu podél každého kanálu sondy. Zpoždění má podobný účinek jako zaostřování optické čočky a umožňuje zaostřit do různých hloubek materiálu. Výhodou při zaostřování je použití pouze jedné sondy. V opačném případě by bylo nutné použít několik jednoprvkových sond s různými ohniskovými vzdálenostmi. Nejčastější aplikace zaostřování je při kontrole desek a konstrukcí o velké tloušťce.

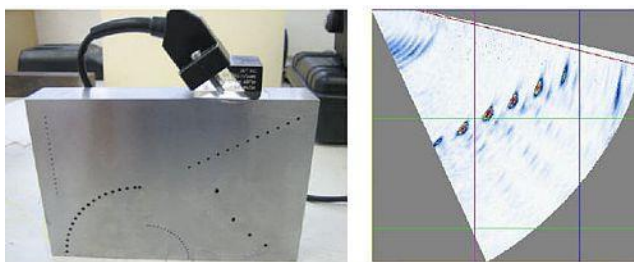
Elektronické vychýlení aplikuje zákony elektronického zpoždění pro vychýlení paprsku. Umožňuje využití jedné sondy na místo několika sond procujících v různých úhlech. Využívá se pro kontrolu dílů ve velmi malých prostorech. [21], [58]



Obr. 66 – (zleva) Schéma elektronického buzení ultrazvukových měničů, fokusace a úhlové vychylování ultrazvukového svazku[58]

5.4.4 Sondy a skenery

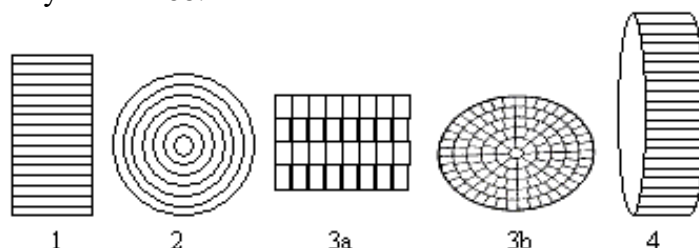
PA sondy se skládají z mnoha menších ultrazvukových měničů. Každý z těchto měničů může být pulzně buzen nezávisle na ostatních měničích. Úhel ultrazvukového paprsku se dosahuje pomocí postupného buzení jednotlivých měničů. Ultrazvukový svazek se rozmítá v celém objemu zkoušené součásti podobně jako paprsek světla. Vizuální obraz, který znázorňuje řez zkoušené součásti se skládá pomocí dat získaných z více svazků. Na obr. 67 je ukázka PA sondy s výsledným řezem, tzv. s-scanem.



Obr. 67 – PA sonda při kontrole a výsledný řez [21]

Při zajištění pohybu sondy např. za pomoci manipulátoru je možné získat prostorové zobrazení vad zkoušeného materiálu.

Pole měničů se vyrábí v různém geometrickém uskupení. Jednotlivé prvky těchto uskupení musí být schopny individuálního a nezávislého pohonu, bez vytváření rozptylu vlnění v jejich okolí. Rozptyl vlnění by mohly vzniknout vlivem akustického nebo elektrického spojení. Příklady různých geometrií měničů víceprvkových sond jsou znázorněny na obr. 68.



Obr. 68 – Příklady geometrií měničů PA sond: 1 – Lineární pole; 2 – Věncové pole s rovnoměrnou roztečí; 3 – Maticová pole (šachovnicové a sektorové prstence); 4 – Kruhové pole [58]

Sondy s lineárním polem jsou tvořeny sadou měničů složených vedle sebe a sousých podél osy. Umožňují pohybovat paprskem, zaostřovat a vychylovat podél roviny.

Sondy věncové jsou tvořeny soustřednými kruhy. Umožňují zaměření paprsku do různých hloubek podél osy.

Maticové sondy mají aktivní plochu rozděleny do dvou dimenzí. Tento typ sondy umožňuje řídit paprsek ve 3D kombinací elektronického zaostřování a vychýlení.

Sondy kruhového pole jsou tvořeny soustavou prvků uspořádanou v kruhu s orientací buď směrem ven nebo dovnitř podél osy symetrie kruhu. Je možné tuto sondu využít společně se zrcadlem, které umožní požadovaný úhel dopadu paprsku (obr. 69 a 70).

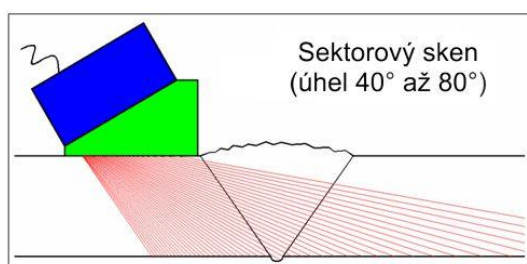


Obr. 69 – Kontrola vnější části trubek pomocí plochého kruhového pole a zrcadla [58]

Obr. 70 – Kontrola vnitřní části trubky pomocí plochého kruhového pole a zrcadla [58]

Sektorové skeny (S-skenery) s PA sondami vytvářejí z jednoho prozařovacího bodu sérii úhlů svazku ve tvaru vějíře. Jejich pokrytí je v závislosti na velikosti sondy, geometrii a tloušťce zkoumaného objektu. Série úhlů svazku mohou spolehlivě detekovat různě orientované defekty (např. trhliny ve svařech a studených spojích).

Schéma s-skeny je znázorněno na obr. 71. [21], [58]

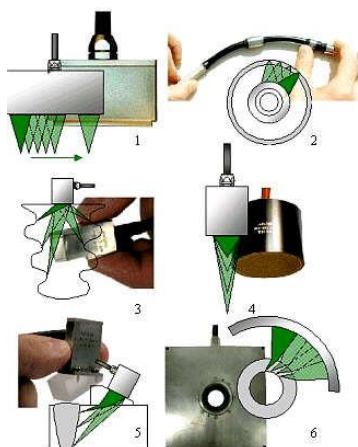


Obr. 71 – Schéma S-skeny při kontrole svaru [21]

5.4.5 Využití

Metoda PA se využívá pro kontrolu ocelových konstrukcí, potrubí a v oblasti energetiky. Metoda PA detekuje necelistvosti, jako jsou praskliny, trhliny atd., takže se s její pomocí může hodnotit kvalita objektu. Mimo detekci trhlín je vhodná i pro měření tloušťky korozní vrstvy.

Na obr. 72 jsou znázorněny různé typy PA sond. [21], [58]



Obr. 72 – Ukázka různých typů PA sond [58]

5.4.5.1 *Kontrola trubek*

Pro kontrolu trubek lze použít několik technik PA.

In-line testování trubek se provádí z vnější strany za pomoci kruhových sond, které jsou znázorněny na obr. 72.2 a 72.6.

Kontrola trubek tepelných výměníků se zpravidla provádí z vnitřní strany kvůli nedostupnosti zvenku pomocí kruhových sond PA.

Kontrola trubek je možná provádět v kombinaci kruhových sond a zrcadel (obr. 69 a 70). [58]

5.4.5.2 *Kontrola titanových předlitků*

Dříve se kontrola titanových předlitků prováděla za pomoci sad jednoprvkových sond, kdy každá jednotlivá sonda byla určena pro určitou hloubku. Nevýhodou byl vyšší počet potřebných sond a potřeba několika záběrů kontroly.

Alternativou je použití maticového pole. Pomocí elektronického zaostřování a vychýlení je možné se přizpůsobit různým rozměrům kontrolovaného předlitku v různých hloubkách. Pro kontrolu těžkých výkovek se používá sonda na obr. 72.4. [58]

5.4.5.3 *Kontrola lopatek a rotorů*

Kontrola energetického zařízení se provádí pomocí miniaturizovaných PA sond (obr. 72.3). Pomocí PA sond je možné provádět inspekce v omezených prostorech, ve kterých není možné aplikovat jinou NDT techniku. Využití technologie PA umožnilo vyhnout se použití předsádkových klínů pro změnu úhlu ultrazvukového paprsku. [58]

5.4.6 **Zachycení plné matice a metoda naprostého zaostření**

Souhrn metod označovaných jako „full matrix capture“ (FMC) a „total focusing method“ (TFM) představuje rozvoj metody ultrazvukového testování metodou PA. FMC je metoda získávání dat, kterou se získávají pouze křivky A-scanu. TFM zpracovává signály zaznamenané pomocí sběru dat FMC.

Metoda zachycení plné matice (full matrix capture – FMC) je způsob sběru dat ultrazvukové pole. Výsledná matice se využívá jako vstupní data pro metodu naprostého zaostření, která generuje plně zaostřené obrazy ze získaných dat. Tento soubor metod zvyšuje spolehlivost ultrazvukové metody, což vede ke snížení nákladů na kontroly a zvyšuje celkovou bezpečnost kontrolovaných objektů.

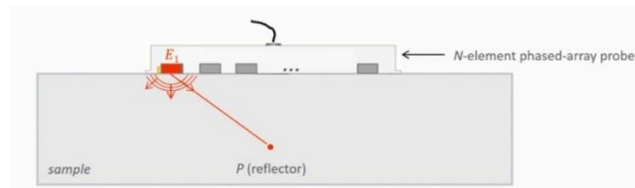
FMC je proces získávání dat s použitím ultrazvukových sond, kde každý prvek v poli je postupně používán jako vysílač, zatímco všechny prvky jsou používány jako přijímače pro každý vysílaný impuls.

Výhodami FCM je vysoké rozlišení a citlivost na malé vady, vysoká jakost a rozlišitelnost obrazu, možnost kontroly v reálném čase a snadná interpretace výsledků.

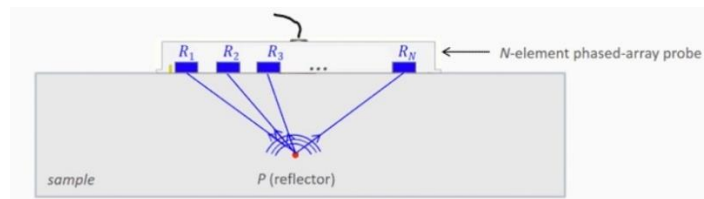
Principem metody je postupné buzení elementů vysílače, které slouží i jako přijímače. Jeden element vždy slouží jako vysílač a poté všechny jako přijímač signálu. Sonda s počtem N elementů bude mít výslednou matici o počtu $N \times N$ časových signálů.

Výsledným obrazem jsou A-skeny odpovídající svým počtem počtu sond.

Schéma sběru dat je znázorněno na obr. 73 a 74. [59], [60], [61]



Obr. 73 – Element č. 1 vysílá signál [59]



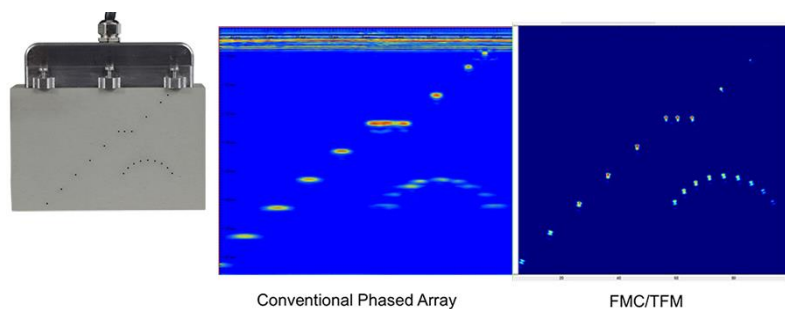
Obr. 74 – Všechny elementy sondy přijímají signál [59]

Metoda TFM je algoritmus, který zpracovává surová data získaná FMC metodou. Aby metoda FMC plnila svou funkci, potřebuje data z plné matice. Tento algoritmus se používá k opětovnému zaostření na každý bod rekonstruovaného obrazu.

Na obr. 75 je možné vidět srovnání konvekčního fázového pole a souboru FMC/TFM, kdy obě metody podrobily kontrole stejného objekt.

Zásadou moderní výpočetní techniky může TFM detekovat vady v reálném čase.

Mezi další výhody TFM patří 3D zobrazování a charakterizace defektů, zobrazování velké plochy za pomoci jediné sondy, možnost kontrolovat všechny materiály, optimální zaostření a prostorové rozlišení kdekoli a kdykoli. [59], [61]



Obr. 75 – Srovnání konvekčního Phased Array a FCM/TFM, zleva: Kontrolovaný objekt, výsledek kontroly fázového pole a FMC/TFM [75]

5.4.7 Ekonomické zhodnocení

Metoda PA značně zpřesňuje klasickou ultrazvukovou metodu. Vzhledem k nákladnosti skenovacího zařízení a školení obsluhy není vhodná do menších podniků.

Metoda PA se uplatňuje především při kontrole objektů, které musí být v provozu spolehlivé, např. v energetickém průmyslu.

6 Predikce vývoje NDT

Oblast nedestruktivního testování by se měla vyvíjet dvěma směry. První směr se zaměřuje na přesnost kontroly a druhý na jednoduchost.

Přesnost si žádají nově vyvinuté materiály, technologické postupy a složitější a náročnější konstrukce. V mnoha oborech, jako je např. energetický průmysl a oblast letectví a kosmonautiky, může chybná nebo neúplná indikace vad znamenat selhání celého systému a mít tak katastrofální následky. S rozvojem těchto citlivých oblastí je nutné inovovat stávající metody NDT, aby byly neustále aktuální, a vyvíjet také metody nové, které budou přesně detekovat vady v určitých konstrukcích vyrobených z klasických i netradičních materiálů.

Z důvodu úspory času při kontrole budou preferovány metody, které umožní kontrolovat velké objemy materiálu a to, pokud možno, z jedné kontrolní pozice. Lze očekávat, že dojde k výrazné inovaci algoritmů umožňující stoprocentní detekci vad. To bude obnášet i inovaci přidružených měřicích a řídicích softwarů tak, aby detekce necelistvostí a vad byla co nejspolehlivější a nejpřesnější, a to i s ohledem na snadno ovladatelné a intuitivní uživatelské rozhraní. Žádoucí v tomto smyslu bude i snížení množství nákladných kalibračních postupů, které jsou v současnosti velmi limitujícím faktorem především při ultrazvukové metodě Phased Array.

Další oblastí, kde dojde zcela jistě k inovaci přístupu je oblast zobrazování naměřených dat z jednotlivých NDT metod, je totiž snahou, aby zobrazovaná data o vnitřním nebo povrchovém stavu materiálu, byla zobrazována tak, aby výsledky byly jednoznačně průkazné a daná obrazová interpretace byla zvládnutelná i pro neodbornou veřejnost – zákazníky. Déle je důležitá inovace metod s ohledem na možnost kontroly všech typů vad včetně umístění. Je tedy snahou, aby daná metoda umožňovala nalézt povrchové, podpovrchové i objemové vady, bez ohledu na jejich orientaci a zkoumaný typ materiálu. Tento cíl je velmi důležitý i z toho důvodu, že se předpokládá další využití netradičních materiálů ve strojírenství, jako jsou i kompozitní, organické a biodegradabilní materiály.

Druhý směr se bude ubírat jednoduchostí metod kvůli několika důvodům.

První důvod je pravidelná kontrola systémů. Některé stroje musí být kvůli cyklickému namáhání kontrolovány v častých intervalech, aby se zamezilo selhání. Jelikož všechny firmy nezaměstnávají školené NDT pracovníky a není v jejich možnostech pravidelně zadávat práci firmám zabývajících se NDT, měl by být každý jiný pracovník, např. obsluha stroje, schopen zařízení zkontrolovat a interpretovat výsledky.

Další důvod je možnost využívat NDT metody mimo průmyslový objekt. Některé kontroly není možné provádět v průmyslovém podniku nebo v laboratorních podmínkách, např. kvůli velikosti systému nebo jejich nemobilitě. Z toho důvodu je nutné provádět zkoušky venku v různých atmosférických podmínkách. Zařízení pro testování by mělo být odolné, snadno aplikovatelné na místě a výsledky jednoznačné a snadno interpretovatelné.

Velmi zásadní je také archivace naměřených dat takovým způsobem, aby zpětné vyhodnocení bylo možno provádět univerzálním softwarem tak, jako je to v současné

době v oblasti medicíny při RTG vyšetření, kde se používá celosvětový standart uchování dat DICOM. Vzniklé protokoly by měly mít jednotnou formu, aby je mohl zhodnotit kdokoliv.

Archivace výsledků by měla být dlouhodobá, z důvodu pozdějšího srovnávání získaných výsledků v rádech let.

Samozřejmostí všech metod by měla být ekologičnost s minimálním dopadem na životní prostředí.

Velký progres lze očekávat v autonomních řídicích systémech. V současnosti tento trend představují drony.

7 Závěr

V první části této bakalářské práce jsou popsány tradiční metody NDT testování. Je popsán princip těchto metod, použité prostředky a pomůcky.

Druhá část obsahuje soupis 12 moderních metod nedestruktivního testování, které byly nově vyvinuty, a u kterých je lze předpokládat jejich další vývoj. Je stručně popsán jejich princip a použití.

Popisované metody se využívají pro objemové, povrchové a podpovrchové NDT testování. Některé z metod jsou vhodné pro kontrolu pouze kovových magnetických materiálů. Další metody jsou vhodné pro všechny druhy materiálů včetně kompozitů. Další vybrané metody představují zdokonalení stávajících metod, jako je metoda buněčných filmů, která je inovací kapilární zkoušky a je zaměřena na detekci mikrotrhlin. Vzdálená vizuální kontrola využívá lepší a modernější detekční sondy, které jsou bezpečnější a mají lepší dosah. Mezi nové prostředky vizuální kontroly patří v současnosti především drony. Průmyslová počítačová tomografie je převzata z medicíny, kde je používána pro diagnostikování nemocí pacientů. Komplex metod FMC/TFM rozšiřuje a zpřesňuje možnosti metody Phased Array. Metoda měření střídavého proudu pracuje na stejném principu detekce magnetického pole v okolí vady, jako metoda rozptylových toků. Metoda algoritmu Random Forest pracuje s daty vzniklými při kapilární zkoušce a rozlišuje skutečnou vadu od šumu.

Další metody jsou nově vyvinuté speciálně pro obtížně kontrolovatelné materiály jako jsou betonové konstrukce, např. v práci zmíněná metoda Impact-Echo. Metoda Impact-Echo je určena pro detekování vad zdiva a betonových konstrukcí, což jsou materiály používané například v jaderném průmyslu. V práci je popsána metoda infračervené termografie, neboť snižování cen systémů využívající tento detekční princip způsobil velký rozmach této techniky např. při detekci úniku tepla nebo detekce tepelných singularit. Metoda kovové paměti byla vyvinuta v Rusku speciálně pro kontrolu rozsáhlého systému potrubní dopravy.

V další části jsou čtyři metody z předchozích dvanácti uvedených podrobně rozebrány. Je popsán jejich princip, použité prostředky a příklady využití. Byla vybrána vždy jedna metoda z povrchové, podpovrchové a objemové kontroly, a to kontrola drony, kovovou magnetickou pamětí a počítačovou tomografií. Tyto metody jsou na konci každé kapitoly ekonomicky zhodnoceny.

Poslední kapitolou je predikce vývoje metod nedestruktivního testování.

8 Citovaná literatura

- [1] **KOPEC a kolektiv.** *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí.* Brno : Akamické nakladatelství, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [2] **VÁCA.** *Diplomová práce Porovnání NDT odezvy od různých typů umělých i provozních vad.* 2016/2017.
- [3] **PTÁČEK a kolektiv.** *Nauka o materiálu I.* Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2003. 80-7204-283-1.
- [4] **poskytnuto Ing. Petrem BENEŠEM, Ph.D.** Zkoušení prozařováním. místo neznámé : Volume Graphics. Sv. prezentace .
- [5] **AUTOR NEUVEDEN.** www.detekce-netesnosti.cz. [Online] [Citace: 13. 03 2019.] <https://www.detekce-netesnosti.cz/lokalizace-netesnosti-zkousky-netesnosti/>.
- [6] **AUTOR NEUVEDEN.** www.detekce-netesnosti.cz. [Online] [Citace: 13. 03 2019.] <https://www.detekce-netesnosti.cz/hmotnostni-spektrometrie-heliova-metoda/>.
- [7] **TELMO a kolektiv.** A new NDT technique based on bacterial cells to detect micro surface defects. *NDT* . 2014, Sv. 63, April 2014.
- [8] **AUTOR NEUVEDEN.** www.twi-global.com. [Online] 26.-28. 04 2011. [Citace: 11. 03 2019.] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/infrared-thermography-as-a-non-destructive-tool-for-materials-characterisation-and-assessment>.
- [9] **SHELL a kolektiv.** www.reliableplant.com. [Online] [Citace: 18. 03 2019.] <https://www.reliableplant.com/Read/20181/infrared-thermography-mechanical>.
- [10] **SHIPWAY.** Automated defect detection for Fluorescent Penetrant Inspection using Random Forest. *NDT & E International*. 2019, Sv. 101, January 2019.
- [11] **RODRÍGUEZ-GONZÁLVEZ.** 3D reconstruction methods and quality assessment for visual inspection of welds. *Automation in Construction*. July 2017.
- [12] **AUTOR NEUVEDEN.** www.solidvision.cz. [Online] [Citace: 21. 03 2019.] <https://www.solidvision.cz/3d-skenovani/>.
- [13] **AUTOR NEUVEDEN.** www.3d-skenovani.cz. [Online] [Citace: 21. 03 2019.] <https://www.3d-skenovani.cz/3d-skenovani/>.
- [14] **WAGNER.** www.quora.com. [Online] 21. 08 2018. [Citace: 09. 04 2019.] <https://www.quora.com/3d-Scanning-Which-is-a-better-choice-optical-scanners-or-laser-scanners>.
- [15] **AUTOR NEUVEDEN.** inspection-robotics.com. [Online] [Citace: 24. 03 2019.] <https://inspection-robotics.com/fast-rvi/>.
- [16] **AUTOR NEUVEDEN.** inspection-robotics.com. [Online] [Citace: 24. 03 2019.] <https://inspection-robotics.com/bike-platform/>.
- [17] **TOPP.** www.ndt.net. [Online] 03 2000. [Citace: 22. 03 2019.] <https://www.ndt.net/article/v05n03/topp/topp.htm>.
- [18] **Centrum výzkumu Řež s.r.o..** Měření. 2018.
- [19] **DUBOV.** www.energodiagnostika.com. [Online] [Citace: 18. 03 2019.] <http://www.energodiagnostika.com/about-mmm-method.html>.
- [20] **HLAVANÝ.** Základní rozdíly v metodách ultrazvukových zkoušek používaných v energetice. *Zajímavosti z oboru*. 04, 2012.
- [21] **AUTOR NEUVEDEN.** www.ptsndt.com. [Online] [Citace: 16. 04 2019.] <https://www.ptsndt.com/cs/pts-josef-solnar-ndt-skoleni-vzdelavani/ut-ndt-zkouseni-ultrazvukem/ut-zkouseni-phased-array>.
- [22] **SANSALONE.** www.ndt.net. [Online] 02 1998. [Citace: 26. 03 2019.] <https://www.ndt.net/article/0298/streett/streett.htm>.

- [23] **AUTOR NEUVEDEN.** www.fprimec.com. [Online] 2019. 02 2019. [Citace: 26. 03 2019.] <https://www.fprimec.com/how-to-test-concrete-using-impact-echo-method/>.
- [24] **AUTOR NEUVEDEN.** ndt.hamamatsu.com. [Online] [Citace: 26. 03 2019.] https://ndt.hamamatsu.com/eu/en/app-industrial/industrial_ct.html.
- [25] **AUTOR NEUVEDEN.** www.twi-global.com. [Online] [Citace: 26. 03 2019.] <https://www.twi-global.com/what-we-do/services-and-support/asset-management/non-destructive-testing/ndt-techniques/digital-radiography>.
- [26] **BURIAN.** is.muni.cz. [Online] 2013. [Citace: 18. 04 2019.] https://is.muni.cz/th/bf51v/Bakalarska_prace_Burian.pdf.
- [27] **IWM Staff.** www.iwm.org.uk. [Online] 30. 02 2018. [Citace: 07. 03 2019.] <https://www.iwm.org.uk/history/a-brief-history-of-drones>.
- [28] **AUTOR NEUVEDEN.** www.tophotdrones.com. [Online] 2. 08 2017. [Citace: 08. 03 2019.] <https://www.tophotdrones.com/drone-parts-components/>.
- [29] **NOVÁK.** droneweb.cz. [Online] 08. 02 2017. [Citace: 08. 03 2019.] <http://droneweb.cz/kamery/item/114-drony-kamery>.
- [30] **AUTOR NEUVEDEN.** diydrones.com. [Online] 16. 01 2016. [Citace: 11. 03 2019.] <https://diydrones.com/profiles/blogs/pipeline-inspection-with-uav-thermal-diagnostics>.
- [31] **AUTOR NEUVEDEN.** mensuro.cz. [Online] [Citace: 12. 03 2019.] <https://mensuro.cz/hyperspektralni-multispektralni-kamery/>.
- [32] **AUTOR NEUVEDEN.** wikipedia.org. [Online] [Citace: 12. 03 2019.] https://cs.wikipedia.org/wiki/Multispektr%C3%A1ln%C3%AD_sn%C3%ADmkov%C3%A1n%C3%AD.
- [33] **SENTHILNATH a kolektiv.** Detection of tomatoes using spectral-spatial methods in remotely sensed RGB images captured by UAV. *Biosystems Engineering*. 2016, Sv. 146, June 2016.
- [34] **PÉREZ-ORTIZ a kolektiv.** A semi-supervised system for weed mapping in sunflower crops using unmanned aerial vehicles and a crop row detection method. *Applied Soft Computing*. 2015, Sv. 37, December 2015.
- [35] **MC FALL.** 3dr.com. [Online] 08. 05 2018. [Citace: 12. 03 2019.] <https://3dr.com/blog/drones-breaking-ground-bridge-inspection/>.
- [36] **AUTOR NEUVEDEN.** atominfo.cz. [Online] 01. 11 2018. [Citace: 13. 03 2019.] <http://atominfo.cz/2018/11/americke-spolecnosti-pouzivaji-drony-k-inspekci-elektrarny/>.
- [37] **ČERNÝ.** www.e15.cz. [Online] 11. 09 2017. [Citace: 13. 03 2019.] <https://www.e15.cz/magazin/zabery-pro-milovniky-vysek-jak-drony-pomahaji-kontrolovat-vetrne-turbiny-1339359>.
- [38] **AUTOR NEUVEDEN.** www.fly-vision.cz. [Online] <http://www.fly-vision.cz/solar>.
- [39] **NOVÁK.** droneweb.cz. [Online] 13. 07 2018. [Citace: 25. 03 2019.] <http://droneweb.cz/konstrukce/item/254-impeller-drone-dyson-coanda>.
- [40] **AUTOR NEUVEDEN.** www.dronefly.com. [Online] [Citace: 25. 03 2019.] <https://www.dronefly.com/flyability-elios.html>.
- [41] **AUTOR NEUVEDEN.** www.mferentals.com. [Online] 08 2016. [Citace: 25. 03 2019.] <https://www.mferentals.com/wp-content/uploads/2017/11/USE-CASES.pdf>.
- [42] **DUBOV.** www.energodiagnostika.com. [Online] [Citace: 19. 03 2019.] <http://www.energodiagnostika.com/article-about-mmm-difference.html>.

- [43] **FU**. www.researchgate.net. [Online] červen 2016. [Citace: 15. 04 2019.] https://www.researchgate.net/publication/309277812_A_Review_of_the_Metal_Magnetic_Memory_Technique.
- [44] **DUBOV**. www.energodiagnostika.com. [Online] [Citace: 15. 04 2019.] <http://www.energodiagnostika.com/article-about-mmm-local-scz.html>.
- [45] **AUTOR NEUVEDEN**. Preditest s.r.o. *Method for non-destructive testing METAL MAGNETIC MEMORY*. místo neznámé : PREDITEST. Sv. Ke stažení.
- [46] **AUTOR NEUVEDEN**. www.energodiagnostika.com. [Online] [Citace: 19. 03 2019.] <http://www.energodiagnostika.com/app-mmm-pipeline.html>.
- [47] **AUTOR NEUVEDEN**. www.energodiagnostika.com. [Online] [Citace: 20. 03 2019.] <http://www.energodiagnostika.com/app-mmm-weld.html>.
- [48] **ŠOHAJ**. *Strukturní stabilita svarových spojů austenitických a feritických ocelí*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2014.
- [49] **AUTOR NEUVEDEN**. www.energodiagnostika.com. [Online] [Citace: 20. 03 2019.] <http://www.energodiagnostika.com/app-mmm-blade.html>.
- [50] **AUTOR NEUVEDEN**. www.energodiagnostika.com. [Online] [Citace: 20. 03 2019.] <http://www.energodiagnostika.com/app-mmm-rotor.html>.
- [51] **AUTOR NEUVEDEN**. www.energodiagnostika.com. [Online] [Citace: 21. 03 2019.] <http://www.energodiagnostika.com/app-mmm-disk.html>.
- [52] **STEINER**. www.qualitymag.com. [Online] 07. 08 2018. [Citace: 03. 27 2019.] <https://www.qualitymag.com/articles/94885-ct-inspection-an-inside-look-at-ct-based-nondestructive-testing>.
- [53] **AUTOR NEUVEDEN**. www.extende.com. [Online] [Citace: 27. 03 2019.] <http://www.extende.com/computed-tomography-with-civa>.
- [54] **REVERDY**. www.ndt.net. [Online] 13-15. 11 2013. [Citace: 27. 03 2019.] https://www.ndt.net/article/aero2013/content/papers/26_Reverdy.pdf.
- [55] **BELL**. radiopaedia.org. [Online] [Citace: 27. 03 2019.] <https://radiopaedia.org/articles/signal-to-noise-ratio-1>.
- [56] **BRUNKE**. www.qualitymag.com. [Online] 09. 06 2015. [Citace: 27. 03 2019.] <https://www.qualitymag.com/articles/92672-industrial-x-ray-ct-quality-control-from-the-lab-to-the-production-floor>.
- [57] **AUTOR NEUVEDEN**. www.nts.com. [Online] 28. 02 2017. [Citace: 28. 03 2019.] <https://www.nts.com/ntsblog/x-ray-computed-tomography-scanning-composite-materials/>.
- [58] **POGUET**. www.ndt.net. [Online] 05 2002. [Citace: 16. 04 2019.] <https://www.ndt.net/article/v07n05/poguet/poguet.htm>.
- [59] **AUTOR NEUVEDEN**. www.m2m-ndt.com. [Online] [Citace: 24. 03 2019.] <https://www.m2m-ndt.com/en/technology/pa-techniques/total-focusing-method-tfm/>.
- [60] **AUTOR NEUVEDEN**. www.twi-global.com. [Online] [Citace: 24. 03 2019.] <https://www.twi-global.com/what-we-do/services-and-support/asset-management/non-destructive-testing/ndt-techniques/full-matrix-capture>.
- [61] **LIBOSVÁR**. cvut.cz. [Online] 2010. [Citace: 26. 03 2019.] https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/f/f5/Dp_2010_libosvar_jan.pdf.
- [62] **AUTOR NEUVEDEN**. www.weldinspect.cz. [Online] [Citace:] https://weldinspect.cz/?page_id=89.
- [63] **WIKIPEDIA**. wikipedia.org. *Wikipedia*. [Online] [Citace: 27. 02 2019.] https://en.wikipedia.org/wiki/Hall_effect_sensor.

- [64] **WANG.** A review of three magnetic NDT technologies. *Journal of Magnetism and Magnetic materials*. 2012, Sv. Journal of Magnetism and Magnetic materials, February 2012.
- [65] *Research on methods of defect classification based on metal magnetic meory.* **HAILOG.** December 2017, China : NDT & International , 2017.
- [66] **KREJČA.** *Magnetická metoda prášková I, II, III, ATG s.r.o.* 2012.
- [67] **AUTOR NEUVEDEN.** www.techbase-cz.cz. [Online] [Citace: 06. 03 2019.]
<http://www.techbase-cz.cz/Hubitools/Pevn%C3%BD%20endoskop%20s%20v1%C3%A1knovou%20optikou>
- [68] **AUTOR NEUVEDEN.** www.skf.com. [Online] [Citace: 06. 03 2019.]
<https://www.skf.com/cz/products/condition-monitoring/basic-condition-monitoring-products/endoscopes/index.html>.
- [69] **NOVÁK.** droneweb.cz. [Online] 08. 02 2017. [Citace: 10. 03 2019.]
<http://droneweb.cz/kamery/item/114-drony-kamery>.
- [70] **AUTOR NEUVEDEN.** www.drone-thermal-camera.com. [Online] [Citace: 11. 03 2019.]
<https://www.drone-thermal-camera.com/drone-uav-thermography-inspection-pipeline/>.
- [71] **AUTOR NEUVEDEN.** www.termokamera.cz. [Online] [Citace: 11. 03 2019.]
<http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>.
- [72] **MCFALL.** 3dr.com. [Online] 04. 10 2018. [Citace: 12. 03 2019.]
<https://3dr.com/blog/gerdau-mining-drone-program/>.
- [73] **AUTOR NEUVEDEN.** wikipedia.org. [Online] [Citace: 12. 03 2019.]
https://en.wikipedia.org/wiki/Foresthill_Bridge.
- [74] **AUTOR NEUVEDEN.** gamaya.com. [Online] 05. 06 2016. [Citace: 12. 03 2019.]
<https://gamaya.com/blog-post/multispectral-vs-hyperspectral/>.
- [75] **AUTOR NEUVEDEN.** www.thephasedarraycompany.com. [Online] [Citace: 26. 03 2019.]
<https://www.thephasedarraycompany.com/tfm-definitions/>.
- [76] **AUTOR NEUVEDEN.** www.mmmsystem.com. [Online] [Citace: 20. 03 2019.]
<http://www.mmmsystem.com/Products/Tsc3m.html>.
- [77] **AUTOR NEUVEDEN.** www.mmmsystem.com. [Online] [Citace: 20. 03 2019.]
<http://www.mmmsystem.com/Products/Sensor-02.html>.