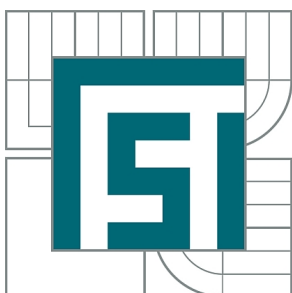




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

NEDESTRUKTIVNÍ METODY KONTROLY VYBRANÝCH DÍLŮ LETADLA

NON-DESTRUCTIVE INSPECTION METHODS OF AIRCRAFT SELECTED PARTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB KNÍŘ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. HELENA TREFILOVÁ

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jakub Kníř

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Nedestruktivní metody kontroly vybraných dílů letadla

v anglickém jazyce:

Non-destructive inspection methods of aircraft selected parts

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kvalita, životnost a spolehlivost strojírenských výrobků, používaných nejen v letectví, jsou především dány vlastnostmi používaných konstrukčních materiálů a celým technologickým postupem. Konstrukční materiály používané pro stavbu letadel, automobilů a dalších strojů a zařízení nejsou téměř nikdy zcela bez vad, a proto je nutná jejich důsledná kontrola. Nedestruktivní zkoušení je soubor diagnostických metod, které tvoří nedílnou část kontroly jakosti výrobku, jak v předvýrobní a výrobní etapě, tak v provozu. Nedestruktivní testování se provádí již mnoho desetiletí, s počátečním rychlým vývojem přístrojů, který byl ještě urychlen technologickým pokrokem.

Cíle bakalářské práce:

Popište základní metody nedestruktivního zkoušení používané v letectví (princip, rozdělení, použití, výhody, nevýhody) a uveďte přehled norem pro NDT.

Uveďte příklady použití na vybraných dílech letadla.

Seznam odborné literatury:

PTÁČEK, L. a kolektiv: Nauka o materiálu I. Brno: CERM 2003. 520 s. ISBN 80-7204-283-1.

KOPEC, B. a kolektiv.: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. Nauka o materiálu IV. Brno: CERM 2008. 572 s. ISBN 978-80-7204-591-4.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Helena Trefilová

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 20.11.2009

L.S.

prof. Ing. Antonín Pištěk, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Obor nedestruktivního zkoušení (NDT) je rozsáhlou vědou. Tato bakalářská práce poskytuje náhled do metod NDT. V žádném případě nemůže postihnout tuto problematiku celou, protože ta je souhrnem mnoha věd, na kterých pochopení NDT více či méně závisí. V práci jsou nastíněny základní metody, kterými se provádí zkoušky, a jejich využití na konkrétních dílech letadel. Dále je zde uveden seznam českých i evropských norem souvisejících s tématem.

ABSTRACT

Non-destructive testing (NDT) is a broad scientific field. This bachelor thesis provides an insight into NDT's methods. It can't embrace the whole field in any case because it's needed to have knowledge from variety of other scientific fields in order to understand NDT completely. This thesis outlines basic testing methods and their usage for particular components of aircrafts. The thesis also includes a list of Czech and European standards relevant to the topic.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nedestruktivní, zkoušení, NDT, letadlo, kapilární, elektromagnetické, ultrazvuk, vířivé proudy, prozařování, akustická emise.

KEY WORDS

Non-destructive, testing, NDT, aircraft, capillary, electromagnetic, ultrasonics, radiography, acoustic emission.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KNÍŘ, J. Nedestruktivní metody kontroly vybraných dílů letadla. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 59 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Helena Trefilová.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou.

Datum: 24. 5. 2010

.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat Ing. Heleně Trefilové, vedoucí mé bakalářské práce, za trpělivost a čas, který investovala do konzultací a oprav této práce. Dále bych chtěl poděkovat mé sestře Bc. Tereze Knířové za připomínky a opravy. A nakonec rodičům za jejich podporu během celého studia.

OBSAH

1 Úvod	3
1.1 <i>Rozdělení NDT</i>	4
1.2 <i>Vybrané kapitoly z historie nedestruktivního zkoušení</i>	4
1.2.1 <i>Vizuální metody</i>	4
1.2.2 <i>Kapilární metody</i>	4
1.2.3 <i>Magnetická prášková metoda</i>	4
1.2.4 <i>Metoda vířivých proudů</i>	5
1.2.5 <i>Zkoušení prozařováním</i>	5
2 Vizuální metody	6
2.1 <i>Fyzikální predispozice</i>	6
2.1.1 <i>Elektromagnetické vlnění</i>	6
2.1.2 <i>Světlo</i>	6
2.1.3 <i>Odraz a lom světla</i>	7
2.1.4 <i>Index lomu</i>	9
2.1.5 <i>Čočky</i>	9
2.1.6 <i>Zrcadla</i>	10
2.2 <i>Provedení vizuální kontroly</i>	11
2.2.1 <i>Přímá vizuální kontrola</i>	11
2.2.2 <i>Nepřímá vizuální kontrola</i>	13
2.2.3 <i>Hodnocení vad při vizuální kontrole</i>	13
3 Kapilární metody	14
3.1 <i>Fyzikální predispozice</i>	14
3.1.1 <i>Povrchové napětí</i>	14
3.1.2 <i>Kapilární elevace a tlak</i>	15
3.1.3 <i>Viskozita</i>	16
3.2 <i>Princip kapilárních metod</i>	17
3.3 <i>Způsoby kapilárních metod</i>	17
3.4 <i>Kapilární prostředky</i>	17
3.5 <i>Postup kapilární zkoušky</i>	17
4 Magnetická prášková metoda	19
4.1 <i>Fyzikální predispozice</i>	19
4.1.1 <i>Magnetické pole</i>	19
4.1.2 <i>Magnetický indukční tok Φ</i>	20
4.1.3 <i>Biotův-Savartův zákon</i>	20
4.1.4 <i>Magnetické pole přímého vodiče</i>	21
4.1.5 <i>Pravidlo pravé ruky</i>	21
4.1.6 <i>Magnetické pole uzavřené proudové smyčky</i>	22
4.1.7 <i>Magnetické pole cívky (SOLENOIDU)</i>	23
4.1.8 <i>Magnetické pole vrstevnaté cívky (TOROIDU)</i>	24
4.2 <i>Princip metody</i>	24
4.3 <i>Způsoby magnetizace</i>	25
4.3.1 <i>Pólová magnetizace</i>	26
4.3.2 <i>Pólová magnetizace pomocí magnetizačního jha</i>	26
4.3.3 <i>Cirkulární magnetizace pomocným vodičem</i>	27
4.3.4 <i>Cirkulární magnetizace indukci proudu</i>	27
4.4 <i>Detekce výchylek magnetického pole</i>	28

5	Metoda vířivých proudů	29
5.1	Fyzikální predispozice	29
5.1.1	Elektromagnetická indukce	29
5.1.2	Faradayův indukční zákon	29
5.1.3	Lenzův zákon	29
5.1.4	Vířivé proudy	29
5.2	<i>Princip metody</i>	30
5.3	<i>Využití metody vířivých proudů</i>	31
5.4	<i>Metoda s průchozí cívkou</i>	31
5.5	<i>Metoda s přiloženou cívkou</i>	32
6	Ultrazvukové metody	33
6.1	<i>Fyzikální predispozice</i>	33
6.1.1	Vlnění	33
6.1.2	Rychlost šíření zvukových vln	34
6.1.3	Druhy ultrazvukových vln	34
6.2	<i>Základní ultrazvukové metody</i>	35
6.2.1	Přechodová metoda	35
6.2.2	Odrážková metoda	35
7	Prozařovací metody	36
7.1	<i>Fyzikální predispozice</i>	36
7.1.1	Záření	36
7.2	<i>Princip prozařovacích metod</i>	37
8	Metoda akustické emise	38
8.1	<i>Princip akustické emise</i>	38
9	Využití v letectví	39
9.1	<i>Souhrn použití NDT v praxi</i>	39
9.1.1	Vizuální metody	39
9.1.2	Kapilární metody	39
9.1.3	Magnetická metoda prášková	39
9.1.4	Vířivé proudy	40
9.1.5	Ultrazvuk	40
9.1.6	Prozařování	40
9.1.7	Akustická emise	40
9.2	<i>Konkrétní použití</i>	41
9.2.1	Testy letadlových kol	41
9.2.2	Testy trupů letadel	43
9.2.3	Testy turbín	46
9.2.4	Nástin testů kompozitních konstrukcí	48
10	Přehled norem	52
11	Závěr	53
12	Informační zdroje	54
13	Seznam příloh	55

1 Úvod [1]

Nedestruktivní zkoušení (NDT) je nedílnou součástí našich každodenních životů, aniž bychom si to uvědomovali. Létáme letadly, jezdíme přes mosty, cestujeme vlakem, a všechny tyto úkony by nemusely být bezpečné nebýt oboru nedestruktivních metod. Nedestruktivní metody již zachránily nespočet životů. Například NDT kontroly reaktorů jaderných elektráren jsou neoddělitelnou součástí jejich provozu. Jejich přítomnosti si většina lidí všimne až v případě náhlých katastrof způsobených zanedbáním pravidelných testů. A pak teprve se začnou ptát: „Proč to nebylo testováno?“. Jejich důležitost nadále narůstá.

Oblast nedestruktivního zkoušení je rozsáhlým vědním oborem, kterým se zabývá nespočet vědců a jehož fyzikální podklady položili již dávno nejznámější fyzikové všech dob (Fourier, Newton, Hughes, Faraday, Maxwell, Einstein atd.). Bez Fourierovi transformace bychom dnes nedokázali superponovat vlnění, a vyhodnocovat tak výstupy testů. Bez Newtona by dnes nebyly základy klasické mechaniky a Maxwell zase zasluhuje uznání v oblasti elektřiny a magnetizmu.

V textu jsou krátce shrnuty nejčastější testovací metody využívané nejen v letectví. Každá kapitola obsahuje základní fyzikální poznatky, které hrají nejvýznamnější roli v pochopení jednotlivých metod. Tyto fyzikální předpoklady jsou rozšířené o množství obrázků zjednodušujících pochopení dané látky. Principy příslušných metod jsou popsány v následujících podkapitolách.

Závěrečné kapitoly se zabývají využitím jednotlivých metod na konkrétních dílech letounu. Pro názornost jsou zde uvedeny testy leteckých brzd, trupů, lopatek turbíny a kompozitních konstrukcí.

1.1 Rozdělení NDT

- **Vizuální metody**
 - Přímá
 - Nepřímá
- **Kapilární metody**
- **Magnetická metoda prášková (metoda rozptylových toků)**
 - Pólová magnetizace
 - Cirkulární magnetizace
- **Metoda vířivých proudů**
 - Metoda s průchozí cívkou
 - Metoda s příložnou cívkou
- **Ultrazvukové metody**
- **Prozařovací metody**
- **Metoda akustické emise**

1.2 Vybrané kapitoly z historie nedestruktivního zkoušení

1.2.1 Vizuální metody

Jejich historie sahá až k samotným začátkům konstruování. Vizuální kontrola se mohla provádět bez velkých fyzikálních podkladů. Stačí k ní pouhé oko a vědomosti o přípustnosti poškození.

1.2.2 Kapilární metody

Počátky této metody se datují do druhé poloviny 19. století. Prvně byla tato metoda použita pro zjišťování trhlin v železničních součástech. Později se začala využívat produkce fluorescenčních a barevných detekčních tekutin.

1.2.3 Magnetická prášková metoda

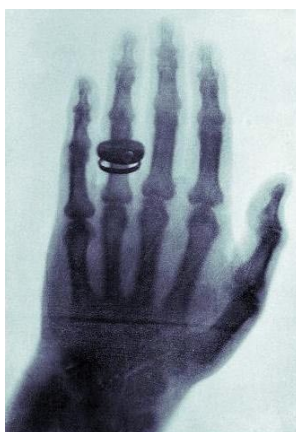
Za počátky práškové metody se dá považovat rok 1868, kdy S. M. Saxby navrhl, aby se ocel pro hlavně děl zkoumala magneticky. Jeho pokusy však upadly v zapomnění. Tudíž za zakladatele této myšlenky lze považovat C. W. Burrowsema, který na kongresu 1912 navrhl testování magnetickou metodou. Průmyslové využití zavedli Viktor de Forest a Foster Doane po roce 1929. U zrodu této metody stál také Čech Ing. Karásek. Jeho know-how poté využila německá společnost Tiede, ve které určitou dobu pracoval.

1.2.4 Metoda vířivých proudů

Tuto metodu objevil Francouz Dominique Arago v první polovině 19. století. Leon Foultak vysvětlil princip a také po něm tato metoda byla pojmenována. O rozvoj této metody se v největší míře zasloužil Michael Faraday v roce 1831. Vědecké základy elektromagnetických zkušebních metod položil Förster, který si založil firmu a jako první dostal certifikát ISO 9001 pro systém řízení kvality.

1.2.5 Zkoušení prozařováním

Zakladatelem prozařování byl W. C. Röntgen, který objevil záření prostupující hmotami. Položil základy teorie rentgenového záření a také ho pojmenoval záření X. Na obrázku 1.1 je první snímek, který Röntgen zveřejnil s rukou jeho chotě Berthy.



1.1 První rentgenový snímek¹

¹ Zdroj: <http://www.wikipedia.org>

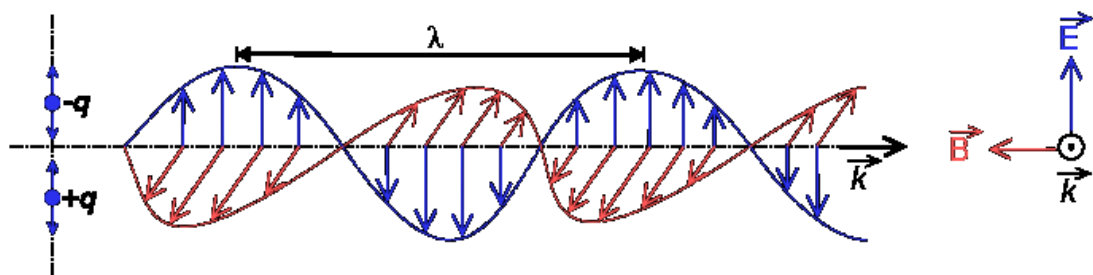
2 Vizuální metody [1]

Vizuální metody kontroly patří mezi elementární v oblasti NDT. Používané jsou nejen v letectví, ale také ve všech odvětvích inženýrství od strojního až po stavební.

2.1 Fyzikální predispozice

2.1.1 Elektromagnetické vlnění

Skládá se ze dvou složek - elektrického a magnetického vlnění. Které tvoří vzájemně kolmou vlnoplochu se stejnou vlnovou délkou viz Obr. 2.1. Rychlost šíření elektromagnetického vlnění má konečnou hodnotu a ve vakuu je to $299\,792\,480\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obr. 2.1 Elektromagnetické vlnění (E = elektrická vlna, B = magnetická vlna)²

2.1.2 Světlo

Patří do množiny elektromagnetického záření. Tato podmnožina se nazývá OPTICKÉ ZÁŘENÍ a dělí se do tří základních podskupin:

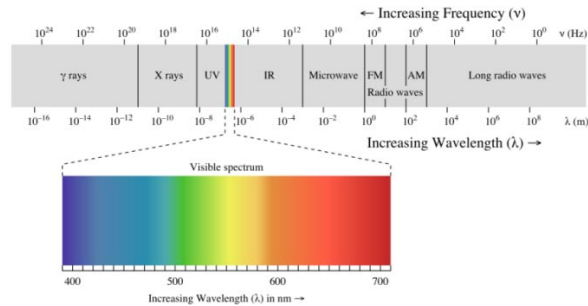
Ultrafialové záření (UV)

UV záření je elektromagnetické záření s vlnovou délkou kratší než u viditelného světla. Jeho zdrojem je slunce, UV zářivky atd. Okem toto spektrum nemůžeme vidět. Může ale být pro oko škodlivé a z tohoto důvodu se používají sluneční brýle s UV filtrem.

² Zdroj: <http://www.wikipedia.org/>

Viditelné světlo

Velice úzký pás vlnových délek o relativně nízké hustotě energie je zobrazený na obrázku 2.2. Toto záření je důležité, protože ho můžeme vnímat lidským okem. V tomto úzkém rozsahu vlnových délek rozlišuje lidské oko různé vlnové délky vlnění jako barvy.



Obr. 2.2 Viditelné spektrum elektromagnetického vlnění³

Infračervené záření (IR)

Infračervené záření je elektromagnetické záření vyzařované přehřátými tělesy.

2.1.3 Odraz a lom světla

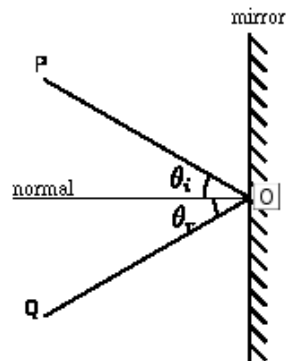
Na rozhraní dvou prostředí dochází k lomu a odrazu světla. Absolutní odraz nebo absolutní lom neexistuje. Vždy dochází ke skládání více optických jevů.

³ Zdroj: <http://www.wikipedia.org/>

Odraz světla

Odražený paprsek leží ve stejné rovině a má stejný úhel od kolmice jako dopadající paprsek.

$$\theta_i = \theta_r \quad (2.1)$$



Obr. 2.3 Odraz světla⁴

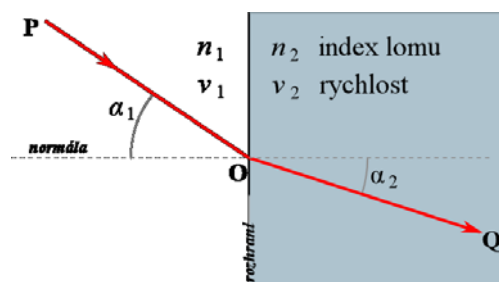
Lom světla

K lomu světla dochází na rozhraní dvou isotropních prostředí, v případě průniku světla z jednoho prostředí do prostředí o jiné hustotě.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} \quad (2.2)$$

Lom světla (Snellův zákon)

Význam jednotlivých veličin je znázorněn na obrázku 2.4.



Obr. 2.4 Snellův zákon lomu světelného paprsku⁵

⁴ Zdroj: <http://www.wikipedia.org/>

⁵ Zdroj: <http://www.wikipedia.cz/>

2.1.4 Index lomu

Index lomu je definován jako podíl rychlosti světla ve vakuu a rychlosti světla v daném prostředí. Index lomu je vždy větší než jedna a vyjadřuje kolikrát je světelný paprsek v daném prostředí pomalejší než rychlost světla ve vakuu.

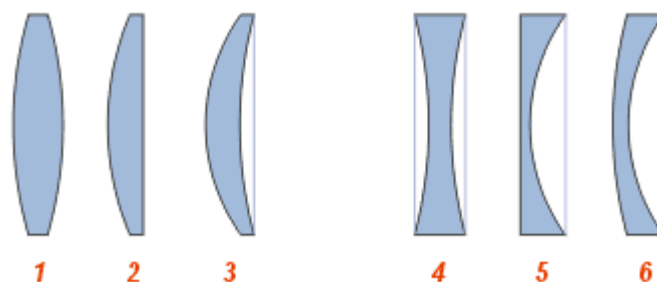
$$n = \frac{c}{v} \quad (2.3)$$

Index lomu

$c \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	rychlost světla ve vakuu
$v \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	rychlost světla ve sledovaném prostředí
$n \text{ [-]}$	index lomu

2.1.5 Čočky

Čočky u vizuální kontroly mají především funkci zvětšování obrazu. Využívají se především bikonvexní spojky tzn. lupy nebo mikroskopy.



Obr. 2.5 Základní druhy optických čoček⁵

Spojky

- 1) bikonvexní
- 2) plankonvexní
- 3) konkávkonvexní

6) konvexkonkávni

Rozptylky

- 4) bikonkávni
- 5) plankonkávni

Například mikroskop je tvořen soustavou čoček.

2.1.6 Zrcadla

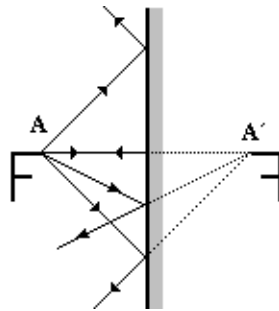
Zrcadla jsou pomůcky, jejichž povrch má vysokou odrazivost. Zrcadla se v NDT používají, pokud chceme nahlédnout za nějaký „roh“ a vzhledem k nedostatku místa nemůžeme daný objekt nebo místo vidět přímo.

Základní druhy zrcadel:

- a) Rovinné
- b) Duté (Konkávní)
- c) Vypouklé (Konvexní)

a) Rovinné zrcadlo

Zobrazuje předmět o stejné velikosti, souměrný, ale stranově převrácený.



Obr. 2.6 Rovinné zrcadlo⁷

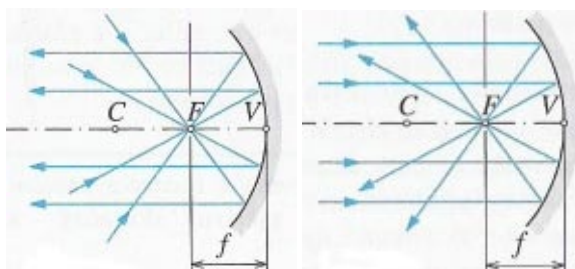
Zrcadla kulová

Na obrázcích 2.7 a 2.8 jsou zobrazeny kulová zrcadla kde C je střed křivosti, V vrchol zrcadla, o optická osa zrcadla a r poloměr křivosti zrcadla.

b) Duté zrcadlo

⁶ Zdroj: <http://www.wikipedia.cz/>

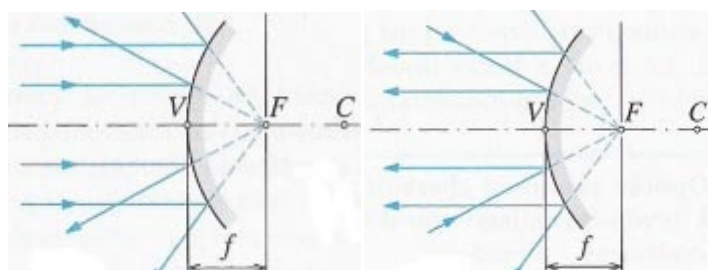
⁷ Zdroj: <http://fyzika.jreichl.com/>



Obr. 2.7 Duté kulové zrcadlo⁸

c) Vypouklé zrcadlo

Zobrazení konvexním zrcadlem obrázku 2.8.



Obr. 2.8 Vypouklé kulové zrcadlo⁹

2.2 Provedení vizuální kontroly

K provedení vizuální kontroly používáme jen zraku, nebo zraku a dalších optických či porovnávacích nástrojů (endoskopy, pravítka, úhlooměry, porovnávací obrázky vad). Vizuální kontroly se dělí na přímé a nepřímé.

2.2.1 Přímá vizuální kontrola

Definice: Kontrola struktury povrchu, při níž není přerušena optická dráha mezi okem pozorovatele a pozorovanou plochou.

Může se provádět pouhým okem, nebo s použitím dalších nástrojů odpovídajících definici (zrcadlo, lupy, mikroskopy, přístroje s optickými vlákny). Nejčastější je místní kontrola, kde je vzdálenost oka od pozorovaného předmětu maximálně 600 mm a předmět musí být osvětlen světlem dosahujícím intenzity minimálně 500 luxů. Pokud se využívá jako všeobecná kontrola, pak ve vzdálenosti větší než 600 mm a osvětlení stačí 160 luxů.

⁸ Zdroj: <http://fyzika.gbn.cz/>

⁹ Zdroj: <http://fyzika.gbn.cz/>

Vizuální kontrola je nejčastěji používána a nevyžaduje zdaleka tak vysokou odbornou způsobilost personálu (v oblasti výstupů z NDT přístrojů) jako ostatní NDT. Např.: Kontrola vrtulníků letecké záchranné služby firmy „ALFA-HELICOPTER, spol. s r. o.“ je z 97% tvořena přímou vizuální metodou.

2.2.2 Nepřímá vizuální kontrola

Definice: Optická dráha mezi pozorovatelem a pozorovaným předmětem je přerušena.

Využívá se v případech, kdy stačí vizuální kontrola, avšak k pozorovanému místu není přístup, nebo je přístup z nějakého specifikovaného důvodu nebezpečný. Při této kontrole se používají různé nástroje, které nám pomáhají s vizualizací daného nepřístupného místa. Např.: fotografie, video a to pomocí nejrůznějších robotů, kamer atd.

Viditelnost detailu

Závisí hlavně na stupni rozlišení detailu, to znamená schopnosti rozlišení dvou bodů ležících bezprostředně u sebe. Je dána především psychickou a fyzickou stránkou pozorovatele a zároveň řadou optických vlastností: kontrast, jas, doba prohlížení objektu, barva, rozměry objektu, podmínky osvětlení.

Každá z těchto vlastností má svou mez viditelnosti, a pokud je přesažena, tak daný objekt nemůžeme vizuálně rozlišit ani v případě zlepšení jiných vlastností.

2.2.3 Hodnocení vad při vizuální kontrole:

Hodnocení je do značné míry subjektivní, protože ho provádějí pracovníci vizuální kontrolou (okem). Záleží zde na stupni kvalifikace a zkušenostech pracovníků provádějících tuto kontrolu.

Úrovně hodnocení vad:

Úrovně vad se posuzují podle různých činitelů.

- a) V případě závažné vady je zbytečné dělat další kontroly. Je to například trhlina.
- b) Srovnávání s obrázkovým vzorem: obvykle se porovnávají s různými katalogy vad.
- c) Hodnocení měřením: pomocí různých měřících zařízení se posuzuje velikost (závažnost) vady.

3 Kapilární metody [1]

Metoda využívá kapilarity tekutin k zjišťování povrchových necelistvostí. Kapilarity se dá využít pouze při zkoumání povrchů. Vnitřní necelistvosti jsou touto metodou nezjistitelné. Mezi hlavní výhody patří: ekonomičnost, možnost zkoumání tvarově složitého výrobku, chemická rozmanitost použitelnosti.

3.1 Fyzikální predispozice

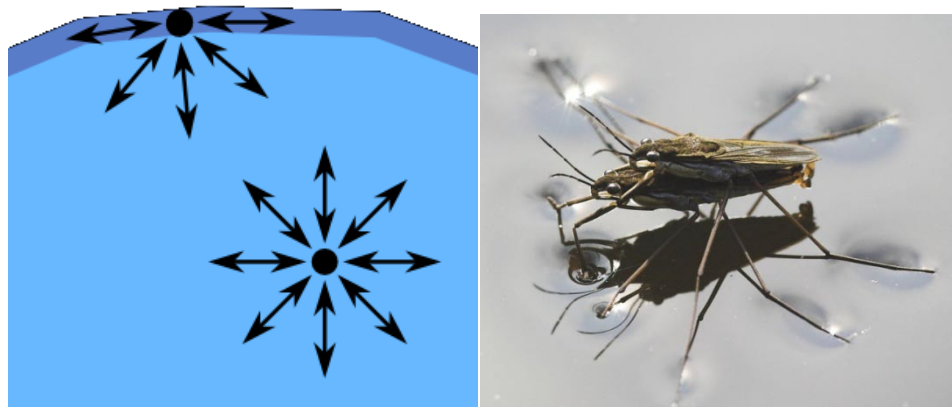
3.1.1 Povrchové napětí

Na molekuly uvnitř kapaliny působí ve všech směrech stejně velké síly a jejich vektorový součet je roven nule. Na fázovém rozhraní kapalina/vzduch je tomu jinak, protože molekuly jsou stahovány směrem „do“ kapaliny. Každá hmota se snaží dosáhnout energeticky nejvýhodnějšího stavu, v tomto případě s co nejmenší plochou na povrchu. Díky tomu se tvoří na povrchu kapaliny pružná blanka.

$$\gamma = \frac{dF}{dl} \quad (3.1)$$

Povrchové napětí

Síla dF [N] působící kolmo na délku dl [m] v tečné rovině



Obr. 3.1 Povrchové napětí a vodoměrka¹⁰

¹⁰ Zdroje: <http://www.wikipedia.org/> a <http://www.wikipedia.cz/>

3.1.2 Kapilární elevace a tlak

Vlivem kohezních sil tlak od vnitřku směrem k povrchu kapaliny klesá. Ponoříme-li tenkou trubičku do kapaliny, která se chová vůči této trubičce smáčivě, začnou molekuly tekutiny smáčet trubičku, ale kapalina se stále snaží udržet co nejmenší energii na povrchu, takže začne toto zakřivení vyrovnávat. Ale molekuly zase smáčejí do vyšší výšky => kapilární elevace.

$$p = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{r} \quad (3.2)$$

Kapilární tlak

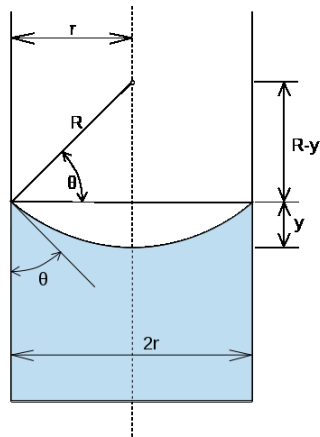
θ [N.m ⁻¹]	povrchové napětí
γ [deg]	okrajový úhel
r [m]	poloměr kapiláry

Pokud spojíme tlak způsobený tíhovou silou (hmotnost) a kapilární tlak, můžeme vypočítat výšku h , do které nám vystoupí sloupec vody (v případě smáčivého chování).

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{\rho g r} \quad (3.3)$$

ρ [kg.m ⁻³]	hustota
g [m.s ⁻²]	tíhové zrychlení

(ostatní veličiny byly již popsány ve vzorci pro „Kapilární tlak“)



Obr. 3.2 Kapilární elevace¹¹

3.1.3 Viskozita

Je vnitřní tření kapaliny. Penetrační prostředky ovlivňuje hlavně kinematická viskozita ν .

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3.4)$$

η [Pa.s] dynamická viskozita
 ρ [kg.m⁻³] hustota tekutiny

Viskozita ovlivňuje rychlost vnikání penetrantu do povrchových poruch.

Příliš viskózní penetrant – pomalé vnikání

Nízkoviskózní penetrant – slabá vrstva

¹¹ Zdroj: <http://www.wikipedia.cz/>

3.2 Princip kapilárních metod

Jejich funkce je umožněna především díky kapilaritě tekutin používaných pro tuto zkoušku. Vhodná kapalina (penetrant) se nanese na povrch. Po odstranění přebytečné kapaliny začne zbytek vzlínat do trhlin a necelistvostí na povrchu zkoumaného materiálu. Díky výbojce, kterou osvětlujeme povrch a další specifické vlastnosti fluorescence, se nám trhlina „osvětlí“ a vizualizuje. Vlastní vyhodnocení se provádí pouhým zrakem.

3.3 Způsoby kapilárních metod

- a) **Metoda barevné indikace** – necelistvosti se projeví barevným kontrastem (výrazně jiná barva penetrantu od zkoumaného povrchu)
- b) **Metoda fluorescenční** – necelistvosti jsou viditelné v ultrafialovém záření (penetrant světélkuje)
- c) **Metoda dvouúčelová** – necelistvosti jsou zviditelňovány kombinací obou předchozích

3.4 Kapilární prostředky

Penetranty – kapaliny, které nanášíme na povrch zkoumaného vzorku. Kapalina vnikne do povrchových necelistvostí. Její přebytek z povrchu odstraňujeme.

Vývojky – je to činidlo, které po nanesení napomáhá vzlínání penetrantu z necelistvostí

Emulátory – účinkují na povrchu a usnadňují odstranění přebytku penetrantu ze zkoumaného vzorku

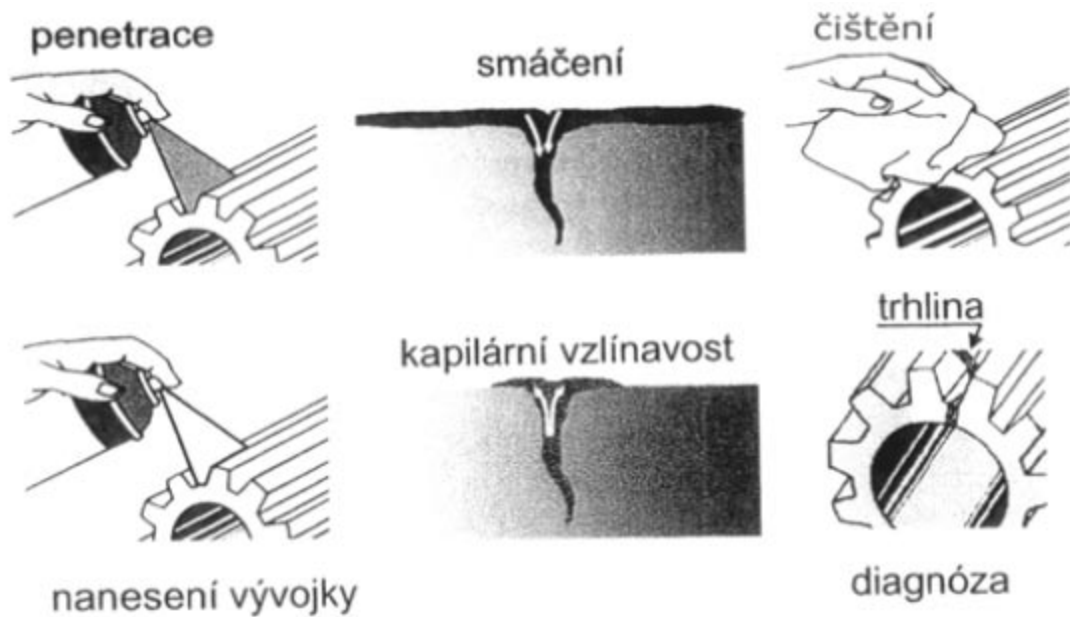
Odmašťovače a čističe – odstraňuje oleje a další nečistoty z povrchu zkoumaného materiálu

3.5 Postup kapilární zkoušky:

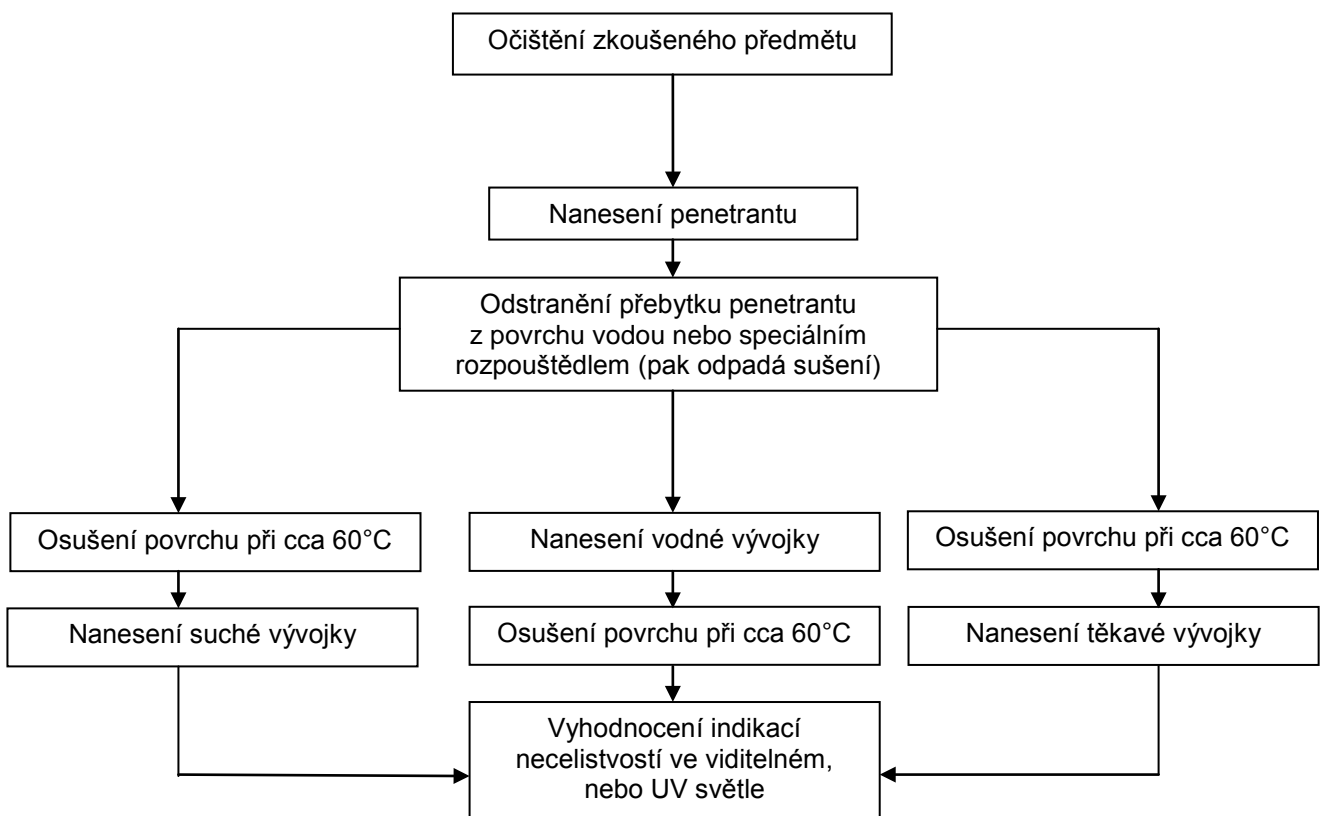
- 1) Odmaštění, očištění
- 2) Penetrace
- 3) Čistění
- 4) Nanesení vývojky

5) Diagnóza

Postup je zřejmý z obrázku 3.3 a schématu pod obrázkem.



Obr. 3.3 Postup kapilární zkoušky¹²



¹² Zdroj: <http://www.ndt.cz/>

4 Magnetická prášková metoda [1] [3]

K využití rozptylových toků je zapotřebí, aby byl zkoumaný materiál z feromagnetického materiálu. Pokud se v něm vyskytnou trhliny, vytvoří se v tomto místě magnetický rozptylový tok a lze ho vizualizovat pomocí magnetických prášků nebo sondami.

4.1 Fyzikální predispozice

4.1.1 Magnetické pole

Magnetické pole se vyskytuje kolem pohybujícího se elektrického náboje. Obecně se dají popsat Maxwellovými rovnicemi:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (4.1)$$

Diferenciální tvar

$$\oint_l H \cdot dl = \sum I \quad (4.2)$$

Integrální tvar

\vec{H} [A.m ⁻¹]	vektor intenzity magnetického pole
\vec{E} [V.m ⁻¹]	vektor intenzity elektrického pole
σ [S.m ⁻¹]	měrná elektrická vodivost
dl [m]	diferenciální vzdálenost
I [A]	elektrický proud
rot	diferenciální operátor rotace

Intenzita magnetického pole H příslušná jednotlivým elementům dl po integraci na uzavřené integrační křivce l odpovídá součtu proudů, které jsou touto integrační křivkou obemknuty.

Magnetické pole tvoří magnetické indukční čáry, což jsou spojnice míst se stejným silovým účinkem magnetického pole na magnetické částice.

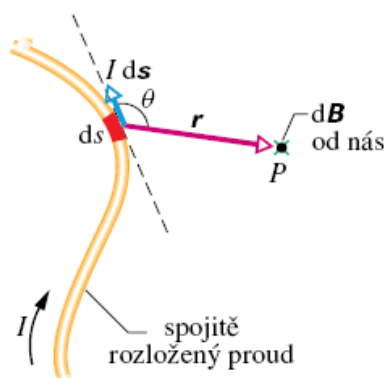
4.1.2 Magnetický indukční tok ϕ

$$\phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B \cdot \cos\alpha \cdot dS \quad (4.3)$$

Magnetický indukční tok procházející plochou S

Φ [V.s]	magnetický tok
dS [m ²]	diferenciální plocha
\vec{B} [A.m ⁻¹]	vektor intenzity magnetického pole
α [deg]	úhel

4.1.3 Biotův-Savartův zákon



Obr. 4.1 Biotův – Savartův zákon¹³

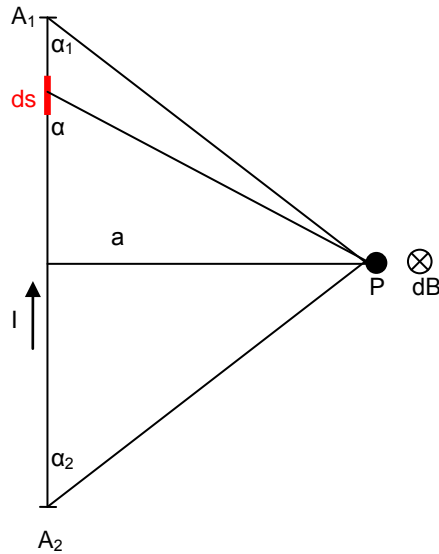
Vodič, kterým prochází proud, je rozdělen na elementy ds. Pohybující se nabitě částice vytvářejí kolem vodiče magnetické pole. Podle Biotova – Savartova zákona každý element ds vyvolá magnetické pole o intenzitě dB.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I \cdot d\vec{s} \times \vec{r}}{r^3} \quad (4.4)$$

$d\vec{B}$ [A.m ⁻¹]	diferenciální vektor intenzity magnetické pole
μ_0 [N.m ⁻²]	permeabilita vakua (konstanta)
\vec{r} [m]	polohový vektor směřující k proudovému elementu P
I [A]	proud
ds [m]	element vytknutý na délce s

¹³ Zdroj: <http://www.aldebran.cz/>

4.1.4 Magnetické pole přímého vodiče



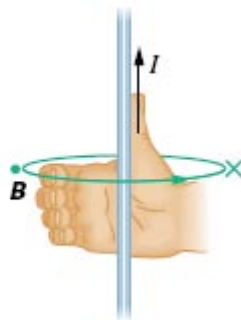
Obr. 4.2 Magnetické pole přímého vodiče

$$dB = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot a} \quad (4.5)$$

a [m] kolmá vzdálenost přímky A1A2 k bodu P
Ostatní členy jsou popsány u vzorce 4.4.

4.1.5 Pravidlo pravé ruky

Položíme-li palec pravé ruky na vodič ve směru protékajícího proudu, pak zahnuté prsty ukazují orientaci magnetického pole (obr. 4.3).

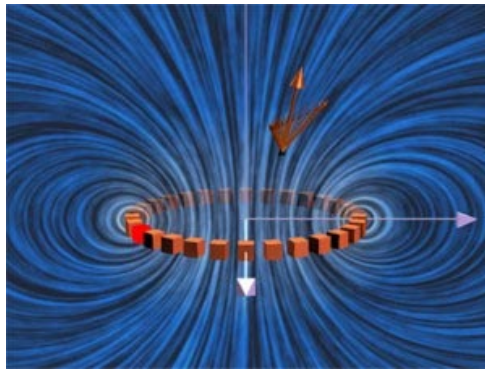


Obr. 4.3 Ampérovo pravidlo pravé ruky¹⁴

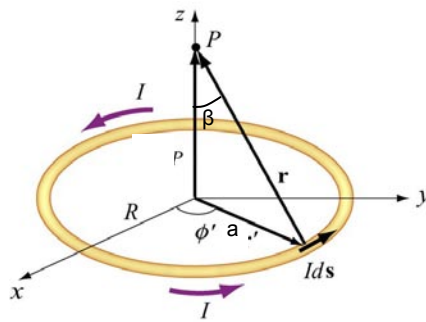
¹⁴ Zdroj: D.Halliday. a kolektiv.: Fyzika. Elektřina a magnetismus. Brno: PROMETHERUS 2008. IBSN 80-214-1868-0. Strana 775

4.1.6 Magnetické pole uzavřené proudové smyčky

Magnetické pole smyčky je nerovnoměrně rozložené



Obr. 4.4 Vizualizace magnetických siločar kolem smyčky¹⁵



Obr. 4.5 Magnetické pole uzavřené smyčky¹⁵

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot a} \sin^3 \beta \quad (4.6)$$

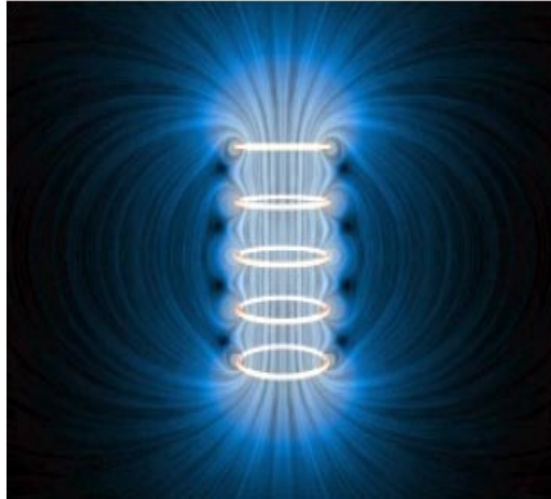
Intenzita magnetického pole v bodě P

β [deg] úhel průsečnice smyčky s bodem P
 a [m] vzdálenost smyčky od jejího středu
Ostatní členy jsou popsány u vzorce 4.4.

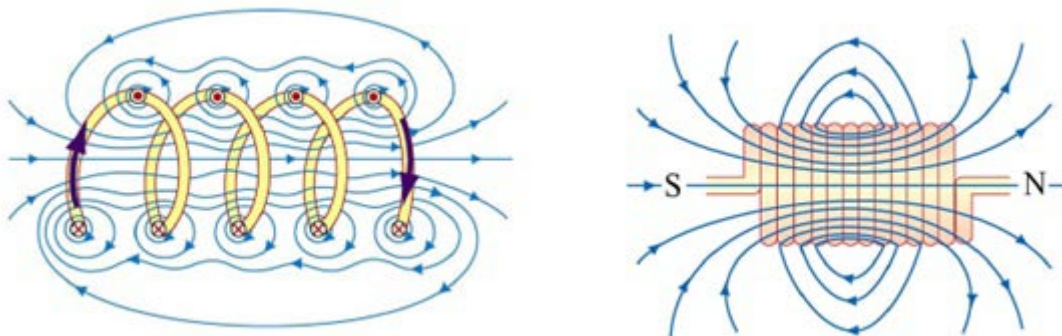
¹⁵ Zdroj: <http://www.aldebran.cz/>

4.1.7 Magnetické pole cívky (SOLENOIDU)

Solenoid je dlouhá válcová cívka, která má délku mnohem větší než průměr $l \gg a$. Na obrázcích 4.6 a 4.7 jsou zobrazeny magnetické siločáry kolem cívek. Výpočetní vztahy jsou složitější, avšak dají se odvodit integrací magnetických účinníků jednotlivých závitů.



Obr. 4.6 Vizualizace magnetického pole solenoidu¹⁶

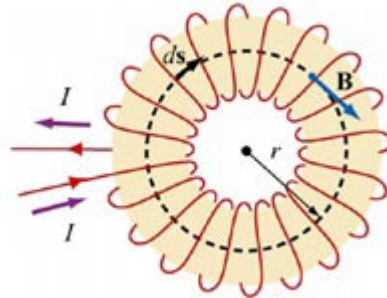


Obr. 4.7 Magnetické siločáry¹⁶

¹⁶ Zdroj: <http://www.aldebran.cz/>

4.1.8 Magnetické pole vrstevnaté cívky (TOROIDU)

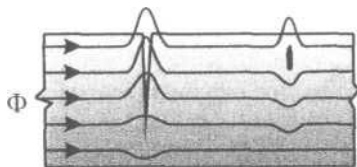
Je tvořeno uspořádáním vinutí do tvaru prstence z N závitů. Uspořádání je zobrazeno na obrázku 4.8.



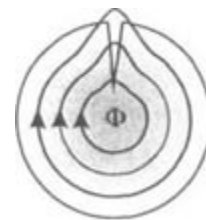
Obr. 4.8 Magnetické pole TOROIDU¹⁷

4.2 Princip metody

Principem je vytvoření magnetického pole, jehož siločáry jsou rovnoběžné s povrchem tělesa. V místech, kde je těleso spojitě, jsou magnetické siločáry přibližně rovnoběžné s povrchem tělesa a mají téměř stejný gradient. V místě, kde je porušena spojitost tělesa (trhlina) se magnetické siločáry vychýlí (vytvoří takzvaný „rozptylový tok“) v důsledku nestejně permeability vzduchu a feromagnetika (obr. 4.10 a 4.11).



Obr. 4.10 Rozptylové magnetické pole nad defektem – podélná povrchová trhlina¹⁸



Obr. 4.9 Rozptylové magnetické pole nad defektem – příčná povrchová trhlina¹⁸

U této metody je velice důležité nastavit správnou hodnotu intenzity magnetického pole a orientaci magnetického pole. Nejlepší detekce dosáhneme, je-li trhlina kolmá na směr magnetických siločar viz obr. 4.10.

¹⁷ Zdroj: <http://www.aldebran.cz/>

¹⁸ Zdroj: <http://www.ndt.cz/>

Pokud je trhlina rovnoběžná se směrem siločar, pak se rozptylový tok nevytvoří a trhlina nebude detekována. Méně výrazně se projevuje vada, která nemá výrazné rozhraní (důlky, bubliny). Významnou roli také hraje hloubka. V případě, že se nespojitost nachází ve větších hloubkách, je touto metodou prakticky nedetekovatelná (obr. 4.11).



4.11 Podélná trhlina ve větší hloubce¹⁹

4.3 Způsoby magnetizace

K detekování trhliny a jiné necelistvosti materiálu se musí zajistit, aby se směr magnetických siločar, pokud možno, co nejvíce přibližoval k úhlu 90° na vadu. Proto jsou používány různé způsoby magnetizace.

Dva základní způsoby magnetizace:

- a) Pólová magnetizace
 - cívkou
 - pomocí magnetizačního jha
- b) Cirkulární magnetizace
 - pomocným vodičem
 - indukcí proudu v kontrolovaném výrobku

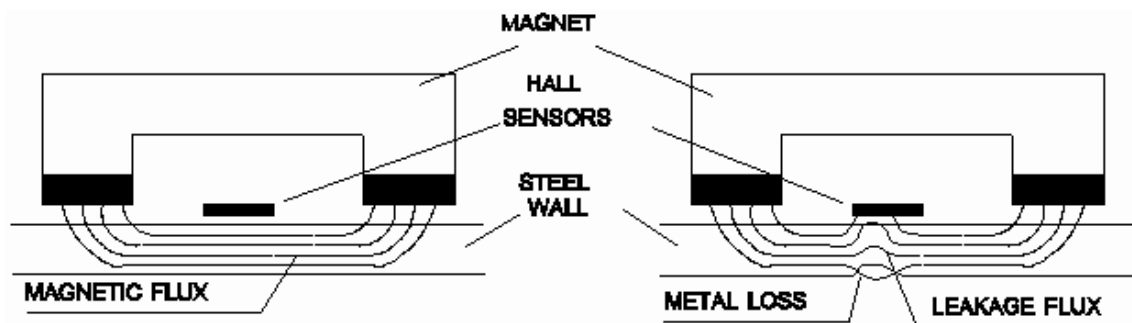
¹⁹ Zdroj: <http://www.ndt.com/>

4.3.1 Pólová magnetizace

Magnetizaci vyvoláme cívkou, do které zasuneme zkoumaný materiál. Pokud cívkou proudí elektrický proud, začne se uvnitř cívky tvořit magnetické pole se siločarami přibližně rovnoběžnými se zkoumanou tyčí. Tímto způsobem lze zjišťovat pouze příčné nespojitosti.

4.3.2 Pólová magnetizace pomocí magnetizačního jha

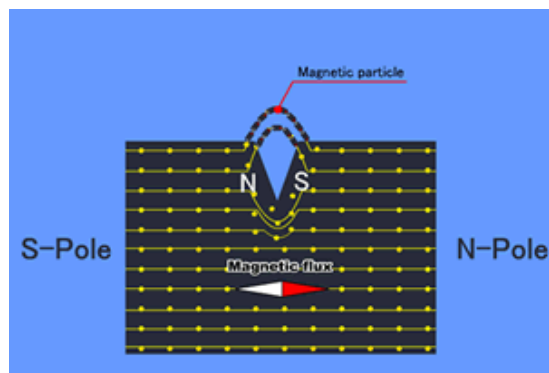
Zkoušený materiál je vložen do magnetického pole podle obrázku 4.12. Mezi póly elektromagnetu se tvoří magnetické pole. Pokud se mezi těmito póly nachází příčná trhlina, vytvoří se rozptylové magnetické pole (obr. 4.13) a Hallové senzory ho detekují.



4.12 Pólová magnetizace²⁰

Překlad:

Magnet (magnet), Hall sensors (Halloví sondy), steel wall (kovový podklad), magnetic flux (magnetický tok), metal loss (kousek bez kovu), leakage flux (magnetický rozptylový tok).



4.13 Pólová magnetizace rozptylový tok²¹

²⁰ Zdroj: <http://www.ndt.net/>

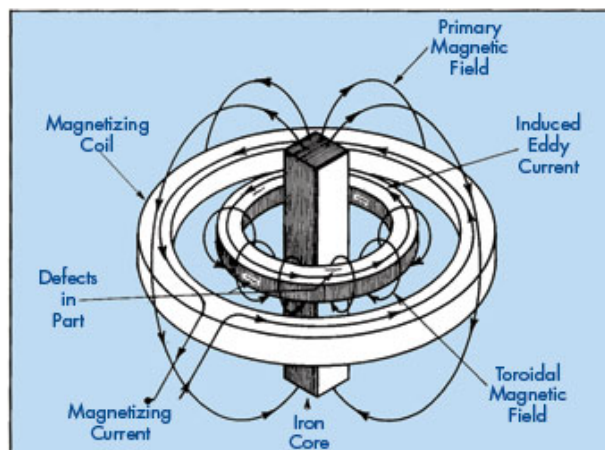
²¹ Zdroj: <http://www.marktec.co.jp/>

4.3.3 Cirkulární magnetizace pomocným vodičem

Tato metoda se využívá u prstencových nebo trubkových součástí (součástí s otvorem). Zkoumaným tělesem se provleče proudový vodič (nejlépe do osy trubky) z neferomagnetického materiálu (feromagnetický by soustřeďoval magnetické pole do sebe) a kolem vodiče se tvoří cirkulární magnetické siločáry. V případě, že se ve zkoumané trubce nachází podélný defekt, tak způsobí rozptylové toky a zviditelní tak vadu. Tato metoda má větší přesnost u detekce vnitřních vad (vodič blíže zkoumanému materiálu).

4.3.4 Cirkulární magnetizace indukcí proudu

Na trn tvořený z feromagnetických plátů se nasadí kroužek s cívkou, která je napájena střídavým proudem. Okolo této cívky se vytváří magnetické pole a ve zkoumaném materiálu se indukuje proud a tvoří kolem sebe také magnetické cirkulární siločáry. Takto lze zjistit vady rovnoběžné na směr proudu (kolmé k magnetickému poli) viz obrázek 4.14.



Obr. 4.14 Cirkulární magnetizace²²

Překlad:

Primary magnetic field (primární magnetické pole), induced eddy current (indukovaný sekundární proud), toroidal magnetic field (toroidní magnetické pole), iron core (feromagnetické jádro), magnetizing current (magnetizační proud), defects in part (vada v součásti), magnetizing coil (magnetizační cívka).

²² Zdroj: <http://www.qualitymag.com/>

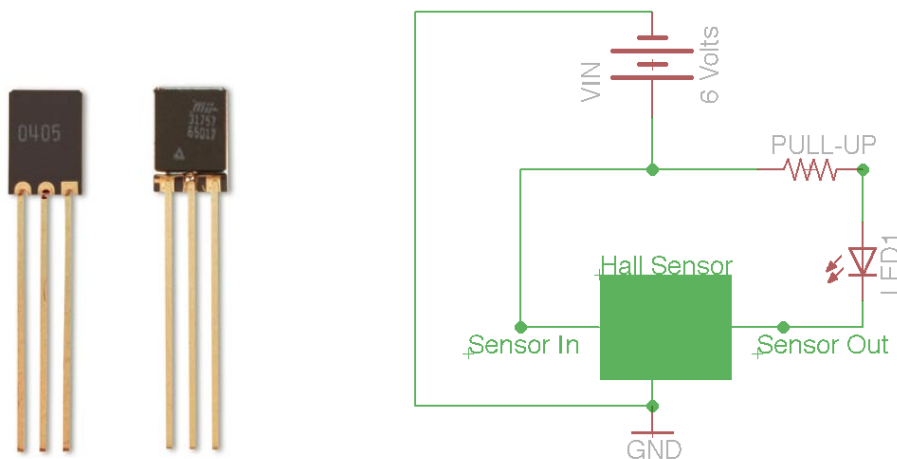
4.4 Detekce výchylek magnetického pole

Při této metodě se nejčastěji používají magnetické prášky. Tyto prášky mohou být buď suché, nebo rozptýlené v kapalině.

Základní druhy magnetizačních prášků:

- a) Suché prášky
- b) Olejové suspenze
- c) Vodní suspenze
- d) Magnetické barvy
- e) Polymerové barvy

Dále se využívají různé druhy sond jako například: vzduchová cívka, feromagnetická sonda, Hallova sonda (schéma zapojení obr. 4.15)



4.15 Hallova dioda a schéma zapojení²³

Princip Hallovy sondy

Křemíkovou destičkou proudí elektrony jedním směrem. Pokud se v kontrolovaném místě nachází trhlinka kolmá ke směru magnetických siločar, tak rozptylové magnetické pole vychýlí proud elektronů a vznikne sekundární napětí na straně destičky, a toto napětí se detekuje.

²³ Zdroj: <http://www.ndt.net/>

5 Metoda vířivých proudů [1]

Souvisí s objevem elektromagnetické indukce. Elektromagnetická indukce je jev, při kterém se změnami magnetického pole ve vodičích indukuje napětí.

5.1 Fyzikální predispozice

5.1.1 Elektromagnetická indukce

Pokud se elektrický náboj pohybuje v magnetickém poli, pak magnetické pole na tento náboj působí silou. Na proudovou smyčku působí momentem síly. Tohoto principu se využívá u elektrických motorů (proudová smyčka se začne otáčet). K tomuto jevu existuje i jev opačný. Když otáčíme proudovou smyčku v magnetickém poli, indukuje se v této smyčce proud. Tohoto principu využívají elektrické generátory.

5.1.2 Faradayův indukční zákon

Změna indukčního toku $\Delta\Phi$ v obvodu vyvolá elektromotorické napětí U , a tím i proud. Indukované napětí je přímo úměrné přírůstku indukčního toku a nepřímo úměrné přírůstku času.

$$U = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (5.1)$$

U [V]	napětí
$\Delta\Phi$ [V.s]	diference magnetického indukčního toku
Δt [s]	diference času

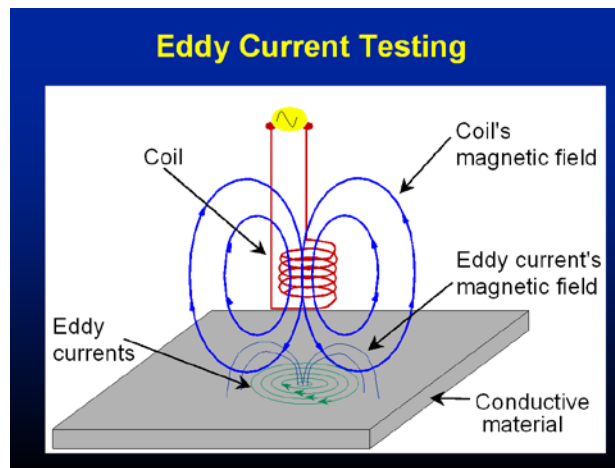
5.1.3 Lenzův zákon

Indukovaný proud má takový směr, že magnetické pole jím vzbuzené působí proti změně magnetického pole, která proud vyvolala.

5.1.4 Vířivé proudy

Pokud vložíme do proměnlivého magnetického pole cívku, indukuje se v ní proud tekoucí ve směru kolmém ke směru magnetických siločar. Jestliže toto pravidlo aplikujeme na vodivou destičku, zjistíme, že proudy se nepohybují jen po „jedné trajektorii“ v případě drátů, ale že tvoří soustředné uzavřené

smyčky po celé plošce destičky, jak je zobrazeno na obr. 5.1. Existenci vířivých proudů můžeme dokázat kyvadélkem z neferomagnetického materiálu, které rozhoupeme mezi dvěma póly elektromagnetu. Podle Lenzova zákona působí magnetické pole, vyvolané vířivými proudy, proti změně magnetického pole, která jej vyvolala a tato destička se postupně zastaví.



Obr. 5.1 Testování metodou vířivých proudů²⁴

Překlad:

Coil (cívka), eddy currents (vířivé proudy), conductive materiál (vodivý materiál), eddy current's magnetic field (magnetické pole vířivých proudů), coil's magnetic field (magnetické pole cívky).

5.2 Princip metody

Zkoušený materiál nemusí být feromagnetický, avšak musí být vodivý. Zkoumaný materiál má různé charakteristiky (vodivost, magnetickou permeabilitu, rozměry). Pokud vystavíme zkoumaný objekt působení střídavého magnetického pole (vyvolaný cívkou, ve které je střídavý proud), indukuje se ve zkoumaném materiálu proud, který vyvolá magnetické pole bránící změně budícího magnetického pole. Výsledné pole vznikne jako vektorový součet těchto dvou polí, a ten závisí na charakteristikách materiálu, které díky tomu můžeme určit.

²⁴ Zdroj: <http://www.eurondt.com/>

5.3 Využití metody vířivých proudů

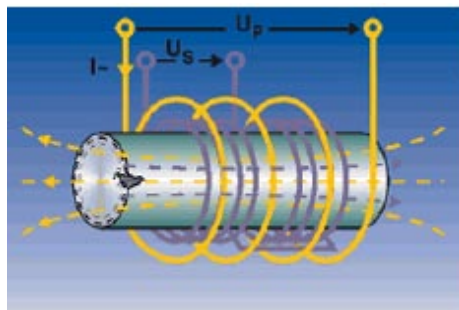
- detekce materiálových diskontinuit např. trhlin, povrchových prasklin, přeložek, poruch svarů atd.
- měření tloušťky stěn, měření naplátování feromagnetických i neferomagnetických vrstev na kovovém i nekovovém podkladu
- kontrola povrchových vrstev kovů (např. oduhličení, nitridace apod.)
- měření tloušťky laků
- kontrola změn materiálu
- kontrola mechanického napětí

Základní dělení metod s vířivými proudy dle uspořádání snímacích cívek:

- a) Metoda s průchozí cívkou
- b) Metoda s příložnou cívkou

5.4 Metoda s průchozí cívkou

Používá se pro zkoumání kruhových výrobků. Trhlina s magnetickými siločárami je zobrazena na obrázku 5.2.

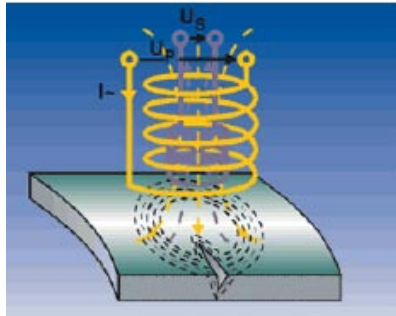


Obr. 5.2 Metoda s průchozí cívkou²⁵

²⁵ Zdroj: <http://measure.feld.cvut.cz/>

5.5 Metoda s přiloženou cívkou

Používá se jedna cívka a z rozdílu impedance cívky můžeme určit vlastnosti materiálu (trhliny, nespojitosti, změny struktury). Na obrázku 5.3 jsou zobrazeny dvě cívky. V tomto případě druhá cívka slouží jako senzor.



Obr. 5.3 Metoda s přiloženou cívkou²⁶

²⁶ Zdroj: <http://measure.feld.cvut.cz/>

6 Ultrazvukové metody [1]

Ultrazvukové vlny se šíří v různých materiálech odlišnými rychlostmi. Velkou výhodou ultrazvukových metod je možnost jejich použití pro velké hloubky materiálů a pro složité výrobky (turbíny).

6.1 Fyzikální predispozice

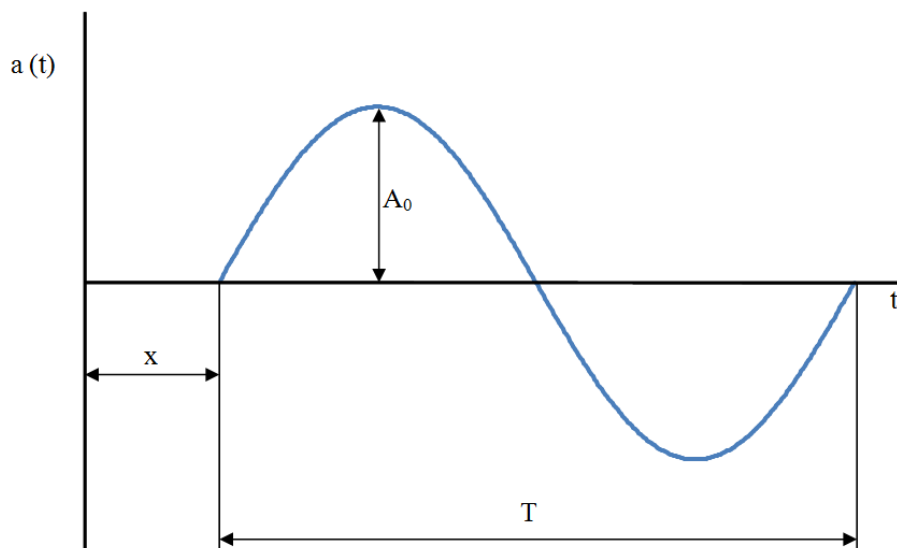
6.1.1 Vlnění

Zvuk je možné chápat jako vlnu, která se šíří částicemi. Zároveň je vlnění forma přenosu energie mezi částicemi. Lze si ho představit vhozením kamene na nenarušený povrch vodní hladiny. Pozorované vlny jsou obdobné zvukovým, a stejně tak jako zvukové vlnění se šíří všemi směry.

Výchylka částice v závislosti na čase:

$$a(t) = A_0 \cdot \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad (6.1)$$

$a(t)$ [m]	funkční závislost výchylky na čase
A_0 [m]	maximální výchylka částice (amplituda)
f [Hz]	frekvence
x [m]	posun od počátku
v [m.s ⁻¹]	rychlost šíření zvukové vlny



Obr. 6.1 Kmitavý pohyb

6.1.2 Rychlost šíření zvukových vln

Rychlost šíření zvukových vln je přímo úměrná akustickému tlaku a nepřímo úměrná součinu hustoty a rychlosti výkmitu částic:

$$v = \frac{p}{\rho \cdot u} \quad (6.2)$$

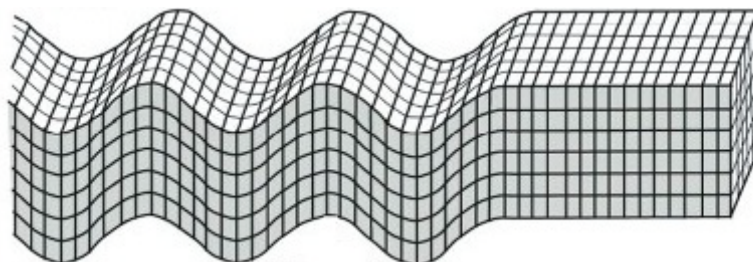
v [m.s⁻¹] rychlost šíření vln
 p [Pa] tlak
 u [m.s⁻¹] rychlost výkmitu částic

6.1.3 Druhy ultrazvukových vln

Základní dělení vln v dvojrozměrném prostoru je na příčné a podélné vlnění viz obr. 6.2 a 6.3.



Obr. 6.2 Příčné vlnění²⁷



Obr. 6.3 Podélné vlnění²⁸

²⁷ Zdroj: <http://academic.umf.maine.edu/>

²⁸ Zdroj: <http://www.sci.muni.cz/>

6.2 Základní ultrazvukové metody

6.2.1 Přechodová metoda

Tato metoda je založená na zeslabení ultrazvukového paprsku. Vyžaduje umístění dvou sond proti sobě. Jedna sonda pouze vysílá vlnění a druhá pouze přijímá. Tato metoda je omezená na dostupnost protilehlých povrchů. Další nevýhodou je, že když se defekt nachází dále od přijímací sondy, tak se může rozrušené vlnění opět spojit ve spojitou vlnoplochu a na sondě se může jevit jako neporušené (jako by tam trhlinka nebyla). Jelikož se při této metodě využívá kratší dráha, tak se používá pro zkoušení materiálů s velkým odporem např.: plášťů pneumatik.

6.2.2 Odrazová metoda

Metoda, která zjišťuje defekty pomocí odražených vln. Většinou se používá stejný měnič na vysílání i přijímání vlnění. Přítomnost defektů se odvozuje z doby vrácení vlny zpět (od praskliny se odrazí dříve). Nevýhodou této metody je, že ultrazvukové vlny musí překonávat dvojnásobnou vzdálenost oproti přechodové metodě. Výhodou je, že odrazová metoda nevyžaduje dostupnost protilehlého povrchu.

7 Prozařovací metody [1]

Prozařovací metody jsou hojně využívány, i když jsou zdoluhavé a finančně náročné.

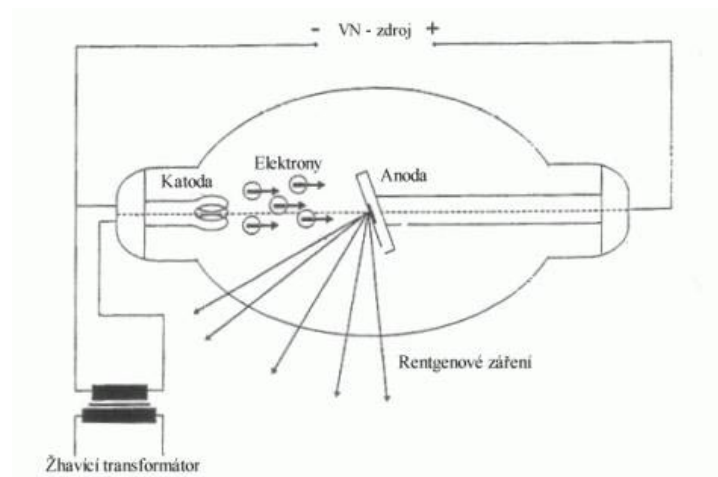
7.1 Fyzikální predispozice

7.1.1 Záření

Záření obecně lze definovat jako šíření energie prostorem. Záření se šíří i ve vakuu. V tomto textu se zaměříme na rentgenové a gama záření.

Rentgenové záření

Je krátkovlnné fotonové záření, které vzniká při přechodech elektronů z energeticky vyšší hladiny do hladiny energeticky nižší. Rentgenové záření se vyvolává rentgenkou. Funkce rentgenky není složitá. Rozžhavená wolframová spirála katody produkuje termoemisně elektrony. Elektrony jsou urychlovány vysokým napětím, které je přivedeno na katodu a anodu. Elektrony dopadají na wolframový terčik umístěný na anodě. Z kinetické energie dopadajících elektronů se 99 % přemění na teplo a jen jedno 1 % na rentgenové záření. Schéma rentgenky je zobrazeno na obrázku 7.1.



7.1 Schéma rentgenky²⁹

²⁹ Zdroj: <http://www.rentgen.cz/>



7.2 Rentgenka³⁰

Gama záření

Vzniká při přechodech atomových jader z vyššího energetického stavu do stavu nižšího (radioaktivní přeměna v radioizotopech). Existují izotopy stabilní a nestabilní. Nestabilní izotopy se označují jako radioaktivní. Některé radioizotopy jsou přírodní, například uran a radium. Jiné vzniknou takzvanou aktivací účinkem neutronů v jaderném reaktoru. V nedestruktivní defektoskopii se využívá Ir 192 a Co 60. Poločas rozpadu Ir 192 je 74 dní a Co 60 5,3 roku (poločas rozpadu je čas, za který klesne aktivita daného izotopu na polovinu původní hodnoty).

Dá se říct, že rozdíl mezi zářením rentgenovým a gama je pouze ve způsobu vzniku. Například pro porovnání Ir 192 odpovídá RTG záření 600 kV a Co 60 cca 2500 kV.

7.2 Princip prozařovacích metod

Je založený na rozdílné pohltivosti záření hmotou. Díky tomu, že mají různé druhy materiálů, rozdílnou propustnost záření, tak se na speciálních fóliích zobrazí s rozdílnou barevnou intenzitou (tmavší – nižší propustnost, světlejší – větší propustnost). Tato metoda se dá využít pro jakýkoli typ materiálu. Limitující je pouze hloubka prozáření.

³⁰ Zdroj: <http://danyk.wz.cz/>

8 Metoda akustické emise [1] [7]

Akustická emise je systém využívající napěťových vln v tělese. Tyto vlny jsou vyvolány zdrojem, například poklepem. Poté jsou detekovány v různých místech tělesa a dále zpracovávány.

8.1 Princip akustické emise

K akustické emisi dochází ve zdroji akustické emise při uvolnění energie způsobené vnitřními nebo vnějšími silami. Vznik akustické emise je generován nevratnými dislokačními a degradačními procesy v mikrostruktuře a makrostruktuře materiálu, kavitačními procesy v hydrodynamických systémech, turbulencí při úniku kapaliny z potrubí, degenerací dielektrika atd. Uvolněná energie se transformuje na mechanický napěťový impuls šířící se materiálem jako elastická napěťová podélná nebo příčná vlna. Složka vlny kolmá k povrchu tělesa je nejčastěji detekována širokopásmovým (od 100 kHz do 4 MHz) piezoelektrickým senzorem s rezonanční frekvencí nad měřeným spektrem akustické emise nebo citlivějším rezonančním senzorem s více rezonancemi.^[7]

U moderního provedení senzorů je v pouzdru zabudován předzesilovač a snímač je tak schopný, i když je energie vlny velmi malá, vyhodnotit dislokace v materiálu v řádech 10^{-14} m.^[7]

Výhodou akustické emise oproti jiným defektoskopickým metodám je kontinuální monitorování objektu a úspora času v porovnání s postupným testováním jinými metodami.^[7]

Nevýhodou metody je, že příčinu vzniku akustické vlny přesně neznáme, neboť uvolněná energie je ovlivňována řadou faktorů jako je tvar a povrch tělesa, přenosová cesta vlny (funkce šíření akustické vlny) daná strukturou a homogenitou materiálu.^[7]

9 Využití v letectví [4] [5] [6] [8]

Letecký průmysl je rozsáhlá oblast strojírenství, která využívá široké spektrum materiálů a technologií. Pro nedestruktivní metody kontroly a jejich kalibraci je nezbytnou součástí znalost materiálu dílu a technologie jeho výroby. Kdybychom chtěli shrnout NDT konkrétního typu dopravního letounu, vyžadovalo by to sepsání rozsáhlé publikace. Takže jsou zde uvedeny pouze příklady konkrétního použití a dále nejčastější použití jednotlivých metod v letectví.

9.1 Souhrn použití NDT v praxi

9.1.1 Vizuální metody

Jsou využívány pro detekci povrchových vad nebo poškození konstrukce všech materiálů. Optické přístroje se používají pro vizuální kontrolu vnitřních prostor, hlubokých děr, otvorů draku letadla, podvozků atd. Široce se využívají ke sledování dílů motoru bez jeho otevření, jako jsou trysky a kola turbín, kompresorové lopatky.

9.1.2 Kapilární metody

Jsou využívány pro detekci povrchových defektů nebo strukturních poruch ve všech dílech letadla. Fosforeskující penetranty jsou používané na kritická místa pro lepší zviditelnění prasklin a ostatních povrchových vad.

9.1.3 Magnetická metoda prášková

Je metoda jednoduchá a snadno přenosná. Je také rychlá a efektivní pro povrchové i podpovrchové vady dílů z feromagnetických materiálů jakéhokoli tvaru. Používá se ke kontrole motorů, čerpadel, podvozků, převodovek, hřídelů, vzpěr, šroubů atd.

9.1.4 Vířivé proudy

Test pomocí tzv. vířivých proudů je používán k detekci povrchových nebo podpovrchových defektů do malé hloubky. Tímto testem se kontroluje koroze ve struktuře letadla, nýty a otvory pro šrouby. Povrchové defekty se detekují vysokými a podpovrchové nízkými frekvencemi.

9.1.5 Ultrazvuk

Používá se pro detekci povrchových, nebo podpovrchových defektů. Užívá se pro kontrolu svarů, výkovků, odlitků, podvozkových noh, motorových uchycení, šroubů v kritických místech, v kloubových mechanismech letadel, ke kontrole kompozitních struktur, kvality dosednutí šroubových spojů.

9.1.6 Prozařování

S ohledem na průnikové a absorpční schopnosti radiového záření (RTG) se tato metoda používá pro kontrolu množství nekovových dílů, pórovitosti, prasklin a bohatosti pryskyřice v kompozitních materiálech. Dále se používá u kovových výrobků, jako jsou svary, odlitky a kované výrobky. Detekují se s ním trhliny, koroze, volné kování, nýty, tloušťka materiálu.

Gama záření se obvykle používá pro detekci vnitřních vad částí konstrukce letadla (například z oceli nebo titanu) a součástí motorů, které vyžadují vyšší energetické hladiny, nebo pro místa těžce dostupná.

9.1.7 Akustická emise

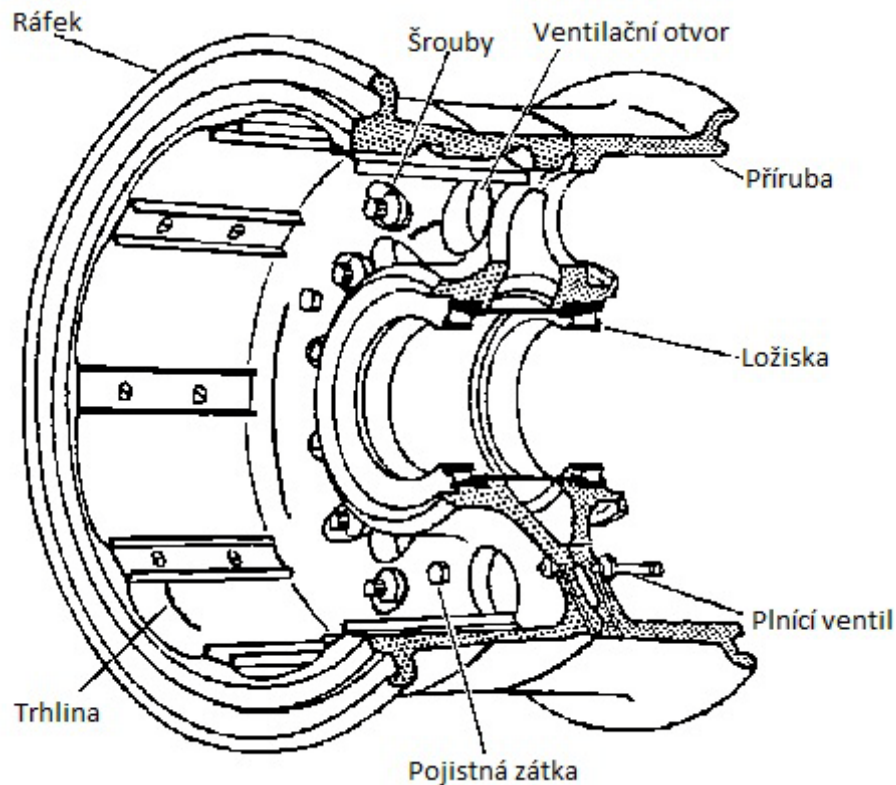
Využívá se ke zkoumání vazeb kompozitů, to znamená ke kontrole velkých dílců vyrobených z kompozitních materiálů a voštin, jako jsou aerodynamické kryty, kormidla, klapky, křídélka atd. S její pomocí můžeme odhalit rozštěpení laminovaných vrstev.

Těžce detekuje praskliny nebo prázdná místa v druhé nebo třetí vrstvě laminátu. Je omezena na detekci rozštěpení přibližně 25 mm v průměru nebo větší, která se nacházejí ve vzdálenosti menší než 1,3 mm pod zkoumaným povrchem.

9.2 Konkrétní použití

9.2.1 Testy letadlových kol

Během vzletu a přistání jsou kola letadel vystavena obrovskému napětí. Brzdové bubny jsou připevněny k ráfku z feromagnetického materiálu. Z důvodu cyklického mechanického a tepelného napětí se vyskytují na úchytech skryté praskliny. Na obrázku 9.1 je zobrazené typické místo vad uvnitř kola.

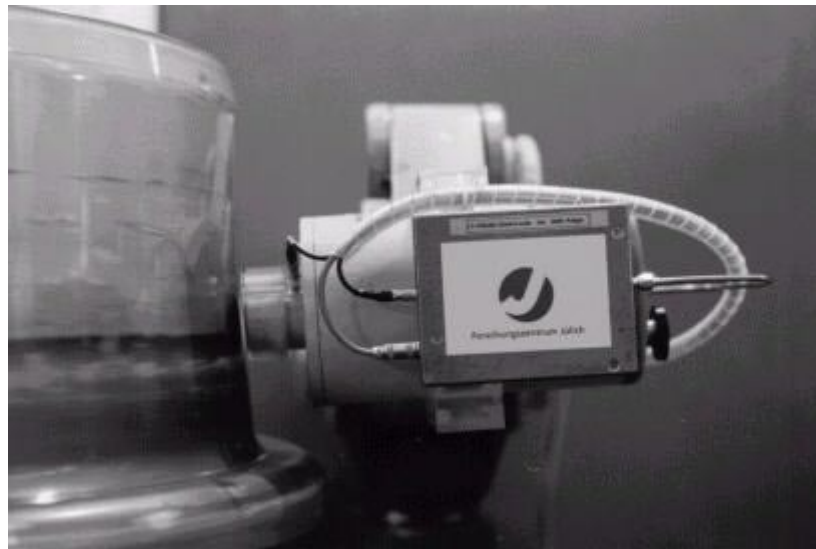


Obr. 9.1 Náčrtek kola Airbusu s místem typickým pro trhliny³¹

Trhliny nejsou viditelné zvenku kola, protože jsou pokryté tepelným štítem, který na obrázku není zobrazený. Po sundání pneumatik jsou kola testována zvenčí obvodovým skenovacím zařízením. Pro hluboké trhliny se používá nízké frekvence vířivých proudů a detekovány jsou sondou. Nicméně senzitivita je limitovaná pouze na velké trhliny tzn.: hloubka 40% tloušťky stěny a délky dvojnásobku tloušťky stěny. Takovéto trhliny jsou identifikovány spolehlivě. Vzhledem k bezpečnosti je dále nezbytné detekovat malé skryté trhliny. K tomu musí být kolo demontováno a testováno zevnitř.

³¹ Zdroj: <http://www.ndt.net/>

Prototyp systému pro testování kol se skládá z automatického testovacího stojanu s pomalu rotujícím kolem a robotem, jež slouží k postupnému skenování kola podél jeho osy (viz. obr 9.2). Zatímco se kolo otáčí, robot pohybuje kryostatem podél vnějšího obrysu. Princip spočívá v mapování pomocí dvojdimenzionálního senzoru využívajícího vířivé proudy. Tyto dvojdimenzionální vířivé proudy mapují povrch účinné části kola.

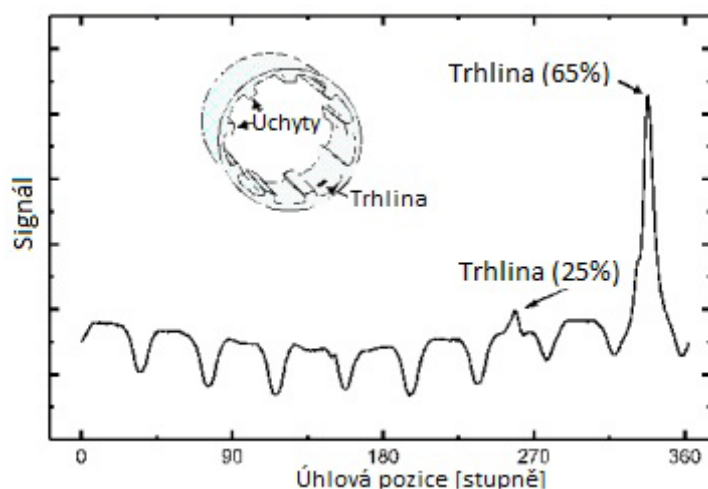


Obr. 9.2 Jednotka pro automatizovanou kontrolu kol letadel³²

Obrázek 9.3 zobrazuje stopu signálu z gradientometru při úhlovém otočení kola o 360°. Jedna vada proniká přibližně do 65% tloušťky stěny (10 mm) s délkou 24 mm, druhá vada do 25% s délkou do 10 mm. Obě vady jsou snadno identifikovatelné na vnitřní straně dílu. Signál obsahuje periodický ekvivalent odpovídající době rotace kvůli mírné excentricitě kola (rozdílné výšky v signálu jednotlivých lišt). Tento slabý vedlejší účinek lze snadno vyfiltrovat vycentrováním. Lišty jsou zobrazovány jako pravidelné vrcholy. Tato metoda má stále značné rezervy v signálním šumu, zvláště pokud se využívají gradientometry s delší základní dobou použitelnosti.

Spolehlivé operační vlastnosti tohoto systému v běžném prostředí byly úspěšně demonstrovány v systému údržby společnosti Lufthansa na letišti ve Frankfurtu. Tento systém odhaluje chyby na kolech letadel. Bylo vyvinuto automatické testování kol, které se provádí tímto skenovacím robotem.

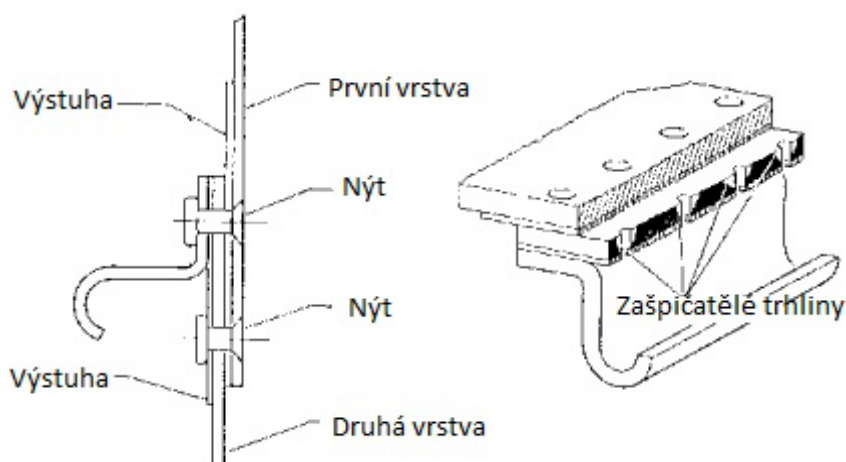
³² Zdroj: <http://www.ndt.net/>



Obr. 9.3 Signál z jednoho pootočení kola Airbusu³³

9.2.2 Testy trupů letadel

Vzhledem k teplotě, vlhkosti a mechanickému namáhání se trhliny a koroze často vyvíjejí v trupu, a to nejčastěji kolem skrytých vrstev blízko nýtů (obr. 9.4). Nejmodernější konvenční metodou vířivých proudů mohou být zjištěny trhliny 4,5 mm v první vrstvě a 2,2 mm v druhé vrstvě hliníku vedle nýtů.



Obr. 9.4 Náčrtek výseku trupu Airbusu s nýty v typické pozici pro tvorbu trhlín³³

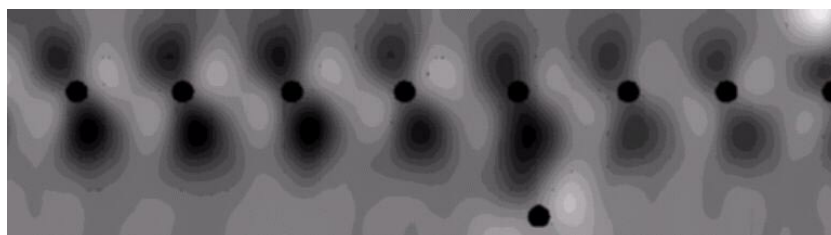
Pro testování trupu letounu byl gradientometr namontován přímo na povrch skenovaného trupu. Systém byl připojen k vybrané části letounu, která byla kontrolována buď na korozi, nebo na praskliny. Poté se kryostatem pohybuje ručně po povrchu a lokalizují se chyby na vnitřním povrchu trupu. (obr. 9.5)

³³ Zdroj: <http://www.ndt.net/>



Obr. 9.5 Skenování trupu metodou vířivých proudů³⁴

Obr. 9.6 ukazuje typické skeny z nýtové části trupu. Je zde využit gradientometrický senzor a diferenciální buzená cívka. Každý nýt se vyobrazuje soustavou dvou pólů v rovině signálu, jak lze jasně vidět z naskenovaných map. Nýt a nýtová díra dávají jasný signál, i když zde není přítomná žádná další chyba (obr. 9.6). Vzhledem k nedostatečnému prostorovému rozlišení lze dosáhnout pouze 25 mm rozlišení. Vzdálenost mezi snímačem a povrchem trupu je 8 mm. Signály ze dvou sousedních nýtů jsou smíchané. Chceme-li najít signál trhliny, který obvykle probíhá radiálně od nýtu v linii nýtu série, je třeba prostorové rozlišení zvýšit. Zlepšení rozlišení lze dosáhnout optimalizací vířivých proudů.

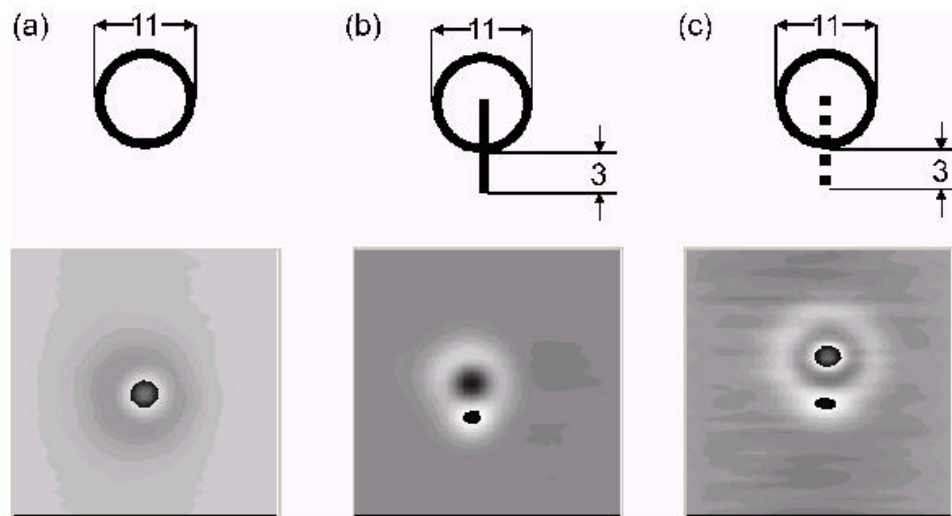


Obr. 9.6 Část skenu trupu Airbusu A330/340 ($205 \times 50 \text{ mm}^2$) s řadou nýtů (označeno tečkami). Mapováno na frekvenci 144 Hz³⁴

Hlavním předpokladem úspěchu je oddělení signálu trhliny od podkladových signálů struktury (od nýtů a děr). Z tohoto důvodu byl vyvinut speciální software.

³⁴ Zdroj: <http://www.ndt.net/>

Obr. 9.7 ukazuje výsledky signálů trhlín odstíněných od signálů z nýtů. Je zde vyobrazena jedna povrchová trhlina o délce 3 mm a druhá podpovrchová v hloubce 3 mm. Pomocí softwarové prostorové integrace byl rozdíl transformován do jednoho bodu. Nýt bez přilehlé trhliny je zobrazen na obr. 9.7 a). Trhlina dvouvrstvé nýtované struktury se zobrazuje jako druhý vrchol (obr. 9.7 b) vedle nýtu (použití signálu o frekvenci 1000 Hz). Trhlina, která se vytvoří prasknutím spodní vrstvy je viditelná na obr. 9.7 c) (použití signálu s frekvencí 500 Hz).



Obr. 9.7 Zobrazení odstíněného signálu trhlín³⁵

³⁵ Zdroj: <http://www.ndt.net/>

9.2.3 Testy turbín

Turbíny jsou z hlediska nedestruktivního testování velice komplexní záležitostí, protože obsahují velké množství složitých tvarů, které vyžadují odlišné přístupy. Navíc nelze některé díly úplně demontovat. Proto se u složitých částí leteckých motorů (především turbín) využívají optimalizované metody. Tato problematika přesahuje rámec bakalářské práce, a tak se ve stručnosti zaměřím na lopatky kompresoru turbíny.

Testování lopatek turbíny

Lopatky turbín jsou typickým příkladem dílu se složitou geometrií. Navíc díky novému způsobu svařování vyžadují speciální přístup, protože jsou běžnými metodami NDT těžce kontrolovatelné. Využívá se zde upravená ultrazvuková metoda. Tato metoda implementuje speciální zrcadla k zakřivení ultrazvukových vln. Tvar zrcadla byl navržen tak, aby kompenzoval vliv zakřivené plochy na ultrazvukové vlny a také, aby zaostřoval ultrazvukový paprsek.

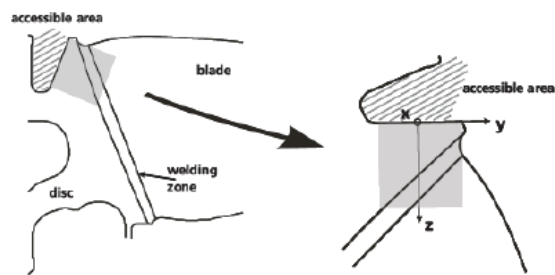


Obr. 9.8 Lopatky turbíny³⁶

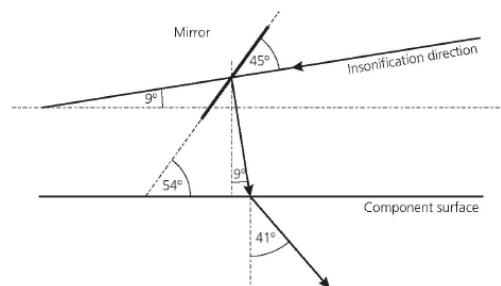
³⁶ Zdroj: <http://www.ndt.net/>

Optimalizace zrcadlem

Oblast zájmu pro ultrazvukovou inspekci dílců motoru je zobrazena na obrázku 9.10, který ukazuje oblast svaru. Tato kontrola je spojená s použitím hloubkové metody. Vložené zrcadlo přeměrovává přicházející ultrazukový paprsek na povrch dílu. Zrcadlo je nastaveno na úhel 45° stejně jako podélné vlnění je generováno v dílu pod úhlem 41° (obr. 9.11). Výpočet se poté provádí podle úhlu natočení zrcadla a úhlu povrchu.



9.9 Oblast svaru³⁷



9.10 Úhly povrchu a zrcadla³⁷

³⁷ Zdroj: <http://www.ndt.net/>

9.2.4 Nástin testů kompozitních konstrukcí

Testování kompozitních konstrukcí je velmi důležitou součástí vývojového procesu. V dnešní době se využívají především dynamické únavové testy, které jsou většinou časově náročné. Prozatím nedestruktivní testování nemůže plně nahradit zatěžovací testy, ale začínají se vyvíjet metody, které detekují defekty ve struktuře kompozitů.

Výhody využití NDT

- Zkrácení vývojového času
- Snížení výrobních nákladů
- Zvýšená kvalita výrobků
- Zvýšená kvalita testování

Nejčastější poruchy kompozitů

Roztřepení – způsobuje redukci tuhosti a změnu tlumících charakteristik

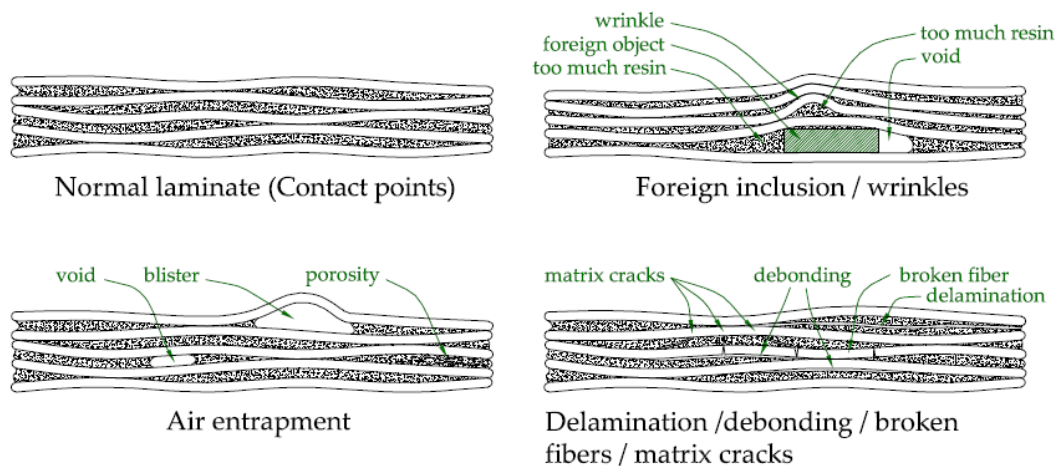
Poškození matrice – nestabilní pryskyřice může oslabit nebo poškodit kompozit

Tvorba trhlin – jemné trhliny matrici zeslabují

Poškozená vlákna – oslabují kompozit

Vznik poškození a následky

- **Abrazivní** – díky škrábancům na povrchu se snižuje pevnost vláken
- **Vrásnění** – způsobují místa s nedostatkem, nebo nahromaděnou pryskyřicí
- **Prázdna místa a pórovitost** – zeslabuje kompozit, může vyvolat poškození
- **Vychýlení vláken** – může způsobit kritické rozložení zatížení
- **Konstrukční** – například se může kumulovat napětí kolem lepených částí
- **Proměnlivá hustota** – Příliš mnoho/málo matrice zvyšuje riziko rozštípnutí vrstvy
- **Nárazové poškození** – štěpení, přetrhávání vláken a tvorba trhlin
- **Únava** – změny vlastností matrice, poškození může vzniknout při nízkém zatížení



Obr. 9.11 Druhy poškození kompozitů³⁸

Překlad:

Normal laminate (běžný laminát), foreign inclusion/wrinkles (cizí vměstek/zmáčknutí), vinkle (zmáčklá oblast), foreign object (cizí předmět), too much resin (příliš mnoho pryskyřice), void (prázdné místo), air entrapment (vzduchové bubliny), blister (bublinka), porosity (pórovitost), matrix cracks (trhliny matrice), debonding (štěpení), broken fibre (zlomená vlákna) delamination (rozštěpení).

Kompozity mohou být nedestruktivně testovány

Poklepem – jednoduché, zabírá hodně času

Vibrační analýza – náročné zjištění únavového poškození, možné v reálném čase

Termografie – nekontaktní, rychlá detekce

Optické – lze získat informace pouze o povrchu dílu

Ultrazvuk – časově náročný

Prozařování – vysoké rozlišení, drahé, časově náročné

Metoda vířivých proudů – limitovaná hloubka průniku, povrch musí být dostupný

³⁸ Zdroj: <http://www.ndt.net/>

Výhodné NDT metody pro kompozity

1) Elektrické vlastnosti

2) Akustická emise

Elektrické vlastnosti

Kompozity, ve kterých se nacházejí uhlíková vlákna, jsou dobrými vodiči a narušení matrice se projevuje jako izolant. Nicméně vlákna se vzájemně dotýkají a kompozit izotropně vede elektřinu ve všech směrech.

Nejdůležitější přístupy analýzy

Senzor – kompozitní senzor (levný, dobrá detekce)

Kontaktní body – mění se v důsledku zatížení a teploty

Realtime – piezo prostředí umožňuje sledovat napětí v reálném čase a monitoruje poškození

Poškození – detekce a lokalizace rozštěpených a přetrhaných vláken

Vhodné druhy kontroly

AC (Uses Capacitance) – využívání kapacity – jsou vhodné pro detekci rozštěpení a prasklin

DC (uses resistance) – využívání elektrického odporu – vhodné pro detekci přetrhaných vláken

Akustická emise (AE)

Signály z akustické emise jsou v kompozitech generovány:

Mikrostrukturními změnami – je generována uvolněná energie a AE vlny

Zatížením – spojeným s rozdílnými vlastnostmi vláken v matrici

Tření – otevírání / zavírání prasklin, odírání povrchů a částí

Hluk – může pocházet z přístroje a elektrotechniky

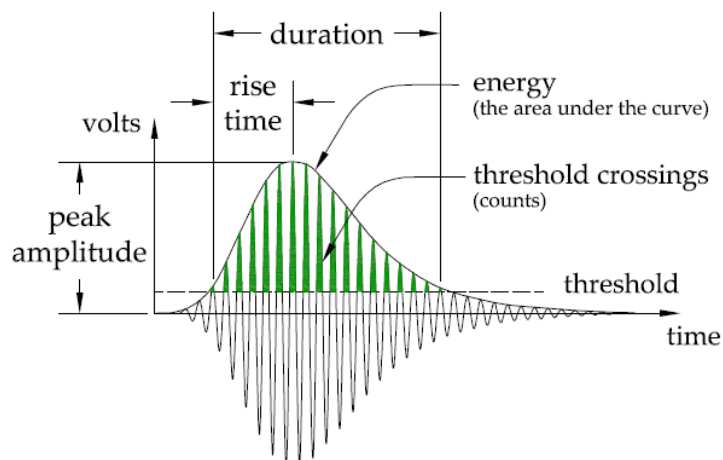
Nejdůležitější přístupy analýzy:

Aktivní analýza – AE aktivita používána na detekci defektů

Hlavní analýza – Vlastnosti extrahovány ze signálu

Frekvenční analýza – superponované frekvence se srovnávají s rozdílnými typy poruch

Modální analýza – využívá tvar vlnové délky k tvorbě modelu



9.12 Akustická emise³⁹

Překlad:

Peak amplitude (vrchol amplitudy), volts (volty), duration (doba trvání), rise time (čas růstu), energy [the area under curve] (energie [plocha pod křivkou]), threshold crossings (hraniční napětí), treshold (prahové napětí), time (čas).

³⁹ Zdroj: <http://www.ndt.net/>

10 Přehled norem [2]

Nedestruktivní zkoušení - platné ČSN normy k 31.08.2009

(zpracováno podle Věstníků ÚNMZ do č.07/2009 včetně)

Přehled norem pro NDT uvádí současný stav zavedených evropských (EN) a mezinárodních (ISO) nebo EN ISO norem pro nedestruktivní zkoušení včetně norem, které s NDT nepřímo souvisí v období do 30.08.2009.

Nové zavedené evropské normy EN nebo EN ISO jsou vyznačený barevným písmem.

Seznam norem se nachází v příloze číslo 1.

11 Závěr

Bakalářská práce dává náhled do metod nedestruktivního zkoušení materiálů. Nedestruktivní metody se využívají nejen v letectví, ale v mnoha strojírenských a stavebních oborech a zkoušení bez narušení funkčnosti zkoumaného dílu se stává stále více neoddělitelnou součástí designu a provozu mnoha strojů. Neustálý vývoj nových materiálů, hlavně v oblasti kompozitních konstrukcí, předpokládá i rozvoj nových nedestruktivních inspekčních metod a nové přístupy zpracování naměřených dat.

Dalším moderním trendem v technologickém vývoji jsou nanotechnologie. V dnešní době co není „nano“ jako by už ani nebylo tak kvalitní. Ale i tyto technologie založené na miniaturních strukturách budou v budoucnu potřebovat nové přístupy nedestruktivního zkoušení. Protože jak všichni víme, nikdy nic není dokonalé, ani ideální.

Většina lidí si ani neuvědomuje, že bez tohoto vědního oboru by byl jejich život mnohem nebezpečnější. Nedestruktivní metody jsou tu jak pro zabezpečení spolehlivé funkčnosti určitých strojů, tak pro ochranu lidských životů.

12 Informační zdroje

Uvedené zdroje jsou včetně citací. Doslovné citace jsou v textu označeny horním indexem, který obsahuje hranaté závorky s číslem zdroje. Ostatní zdroje včetně volných překladů jsou označeny číslem zdroje za nadpisem kapitoly.

- [1] KOPEC, B. a kolektiv.: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. Nauka o materiálu IV. Brno: CERM 2008. 572s.ISBN 978-80-7204-591-4.
- [2] Přehled norem : přehledy norem pro nedestruktivní testování materiálu. In DVOŘÁK. Nedestruktivní zkoušení - platné CSN normy k 31.08.2009 [online]. Praha : Echo, 2009 [cit. 2010-05-24]. Dostupné z WWW: <<http://www.testima.eu/prilohy/102/normy.pdf>>.
- [3] BŘEŇ, David. Elektřina a magnetizmus [online]. Praha : [s.n.], 2006 [cit. 2010-05-24]. IX. Zdroje magnetických polí, s. . Dostupné z WWW: <http://www.aldebaran.cz/elmg/kurz_09_mgpo.pdf>.
- [4] UNNÞÓRSSON, RÚNAR; JÓNSSON, M. Þ.; RÚNARSSON, T. P. NDT METHODS FOR EVALUATING CARBON FIBER COMPOSITES. Bristol [online]. 2009, 106, [cit. 2010-05-24]. Dostupný z WWW: <http://www.aer.bris.ac.uk/comptest2004/proceedings/posters/comptest_106.pdf>.
- [5] Advanced Ultrasonic NDT of Aero Engine Components Using Standard Transducers and Optimized Mirrors. ECNDT [online]. 2006, 2.1.4, [cit. 2010-05-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.ndt.net/search/link.php?id=3556&file=article/ecndt2006/doc/We.2.1.4.pdf>>.
- [6] KRAUSE, H.-J., et al. Aircraft Wheel and Fuselage Testing with Eddy Current and SQUID. NDT.net [online]. 1998, No.9, [cit. 2010-05-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.ndt.net/article/ecndt98/aero/043/043.htm>>.
- [7] Principy akustické emise. Www.NDT.cz [online]. 2009, , [cit. 2010-05-24]. Dostupný z WWW: <http://www.ndt.cz/prilohy/49/emise_principy.pdf>.

- [8] KHAN, Md. Alahi Uddin. Non-destructive Testing Applications in Commercial Aircraft Maintenance.. Wwv.NDT.cz [online]. 1999, No. 6, [cit. 2010-05-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.ndt.net/article/ecndt98/aero/031/031.htm>>.

13 Seznam příloh

Příloha číslo 1Přehled norem