Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Nedestruktivní zkoušení materiálů

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Autor práce: Milan Vystyd

Praha 2015

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Milan Vystyd

Technika a technologie v dopravě a spojích

Název práce
Nedestruktivní zkoušení materiálů

Anglický název
Nondestructive testing of materials

Cíle práce

Cílem práce je formou literární rešerše zmapovat současný stav v oblasti používaných metod nedestruktivní defektoskopie.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Závěry a přínos práce.

Rozsah textové části

cca 30 stran

Klíčová slova

bezpečnost, defektoskopie, diagnostika, poruchy, rentgen, spolehlivost, ultrazvuk

---

Doporučené zdroje informací

Helebrant, F., Ziegler, J., Marasová. D. Technická Diagnostika a Spolehlivost 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2001.
Hruška, K. Diagnostika Jakosti a Vlastností Materiálu 1. vyd. Praha: Vydav. norem, 1989.
International Journal of Adhesion & Adhesives, Research in Agricultural Engineering, International Journal of Solids and Structures, Zváranie svařování, Welding and Metal Fabrication, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Strojírenská technologie, The journal of adhesion, Journal of material science, The Journal of Physical Chemistry, International Journal of Fatigue, Journal of materials processing technology, Technical Gazette, Strojarstvo, Journal of lasers applications, Journal of Materials Processing Technology.
Kopec, B., Česká společnost pro nedestruktivní testování. Nedestruktivní Zkoušení Materiálů a Konstrukcí: (nauka O Materiálu IV) Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008.
Langenberg, K.J., Marklein, R., Mayer, K. Ultrasonic Nondestructive Testing of Materials: Theoretical Foundations Boca Raton: CRC Press, 2012.
Malhotra, V.M., Nicholas J Carino. Handbook On Nondestructive Testing of Concrete 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.
Náhlík, J. Diagnostika Materiálů 1. vyd. Praha: VŠCHT, 1990.
Regazzo, R., Regazzová. M. Ultrazvuk: Základy Ultrazvukové Defektoskopie 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2013.

Vedoucí práce

doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 11. 4. 2014

doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 16. 4. 2014

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan TF ČZU

V Praze dne 14. 12. 2014

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Miroslava Müllera, Ph.D., a všechny literární prameny, publikace a další zdroje jsem uvedl v seznamu použité literatury.

V Praze dne 31. 3. 2015 Podpis: …….

Milan Vystyd

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Miroslavu Müllerovi, Ph.D. a RNDr. Ivo Štěpánkovi za odborné vedení při vytváření této práce, za cenné rady, věnovaný čas a ochotu při konzultacích.

Abstrakt: Bakalářská práce mapuje používané nedestruktivní metody, novinky v dané oblasti, limity a vývojové trendy v oblasti nedestruktivního zkoušení materiálu. Vysvětluje pojem vada materiálu a podtrhuje vysokou důležitost nedestruktivní defektoskopie v dnešní době. Práce je rozdělena na dvě hlavní části. V první části Popisuje průběh jednotlivých nedestruktivních metod, jejich fyzikální principy, výhody, nevýhody a prezentaci výsledků. V druhé části je popsán současný stav a inovace v nedestruktivní oblasti zkoušení.

Klíčová slova: bezpečnost, defektoskopie, diagnostika, poruchy, rentgen, spolehlivost, ultrazvuk

Nondestructive testing of materials

Summary: The thesis maps used non-destructive methods, news in this area, the limits and trends in the field of non-destructive material testing. Explains notion defect in materials and underscores the high importance non destructive defectoscopy nowadays. The thesis is divided to two main parts. In the first part describes progress of individual methods, their physical principles, advantages and disadvantages and presents results. In the second part describes the current state and Innovation in non-destructive testing field

Key words: Safety, nondestructive testing, diagnostics, material defekt, X-ray, reliability, ultrasound

Obsah

1 Úvod 1

2 Cíl práce a metodika 2

Cíl práce: 2

Metodika práce: 2

3 Metody nedestruktivního zkoušení materiálu 3

3.1 Definice vady a dělení vad 3

3.2 Vizuální metoda 4

3.3 Kapilární nedestruktivní defektoskopie 6

3.4 Elektromagnetická nedestruktivní defektoskopie 9

3.5 Infračervená nedestruktivní defektoskopie 11

3.6 Optická holografie 12

3.7 Metalografická nedestruktivní kontrola 13

3.8 Ultrazvuková nedestruktivní defektoskopie 14

3.9 Impedanční defektoskopie 16

3.10 Prozařovací nedestruktivní kontrola 16

4 Vývojové trendy v oblasti nedestruktivního zkoušení materiálu 17

4.1 Trendy v oblasti vizuální nedestruktivní zkoušení 17

4.2 Trendy v oblasti kapilární nedestruktivní metody 18

4.3 Trendy v oblasti elektromagnetické nedestruktivní metody 18

4.4 Trendy v oblasti holografické nedestruktivní metody 19

4.5 Trendy v oblasti metalografické nedestruktivní metody 19

4.6 Trendy v oblasti ultrazvukové nedestruktivní metody 20

4.7 Trendy v oblasti prozařovací nedestruktivní metody 21

5 Závěr 23

6 Použitá literatura a další zdroje 24

7 Seznam obrázků 26

8 Seznam zkratek 27

1 Úvod

Bakalářská práce na téma nedestruktivní zkoušení materiálů popisuje formou literární rešerše v praxi používané metody v oblasti defektoskopie, jejich fyzikální princip, oblast použití a současný stav. Nedestruktivní metody zkoušení materiálu jsou vždy založeny na fyzikálním principu (optické zákony, kapilární jevy, elektřina a magnetizmus, kmity a vlny atd.), tak aby indikovaly vadu, aniž by byl zkoušený materiál porušen. Tím se nedestruktivní zkoušení materiálů stává pro spoustu firem jedním z důležitých procesů řízení jakosti. Celkový systém řízení jakosti je nastaven tak, aby se zabránilo negativním jevům. U nedestruktivního zkoušení výrobků jde především o odhalení povrchových, ale i vnitřních vad. Zajišťuje garanci spolehlivosti, obecnou schopnost výrobku plnit požadované funkce po stanovenou dobu a v daných podmínkách, která se vyjadřuje dílčími vlastnostmi, jako jsou bezporuchovost, životnost, opravitelnost, pohotovost apod. Tato práce poskytuje ucelený přehled o dané problematice nedestruktivního zkoušení.

Práce je rozdělena do dvou hlavních kapitol. V první kapitole popisuje princip, postup a vyhodnocení výsledků jednotlivých metod. V druhé kapitole popisuje vývojové trendy a inovace.

Dále se zabývá pojmy vada (porucha, diskontinuita, necelistvost, nehomogenita atd.), dělení vad, spolehlivostí a bezpečností výrobků.

2 Cíl práce a metodika

Cíl práce:

Cílem této bakalářské práce je zmapovat současný stav v oblasti používaných metod nedestruktivní defektoskopie. Popsat princip Jednotlivých metod, jejich výhody a nevýhody a použití v praxi.

Metodika práce:

Vyhledat a shrnout co nejvíce informací v oblasti používaných metod nedestruktivní defektoskopie. Využít nejnovějších informací z odborné literatury, časopisů, praxe a zpracovat je jako literární rešerši.

3 Metody nedestruktivního zkoušení materiálu

3.1 Definice vady a dělení vad

Definice vady:

Vadou materiálu nebo výrobku se rozumí každá odchylka od předepsaných technických norem, technicko-obchodních dokumentů a jiných technických podmínek. V těchto dokumentech jsou stanoveny jmenovité vlastnosti a odchylky materiálu nebo výrobku. Z hlediska přírodovědného lze vadu definovat jako anomálie materiálu (fyzikálního prostředí) [1].

Dělení vad:

Za vadu se považuje: Koroze, tvarové a rozměrové odchylky, dutiny (bubliny, póry, staženiny, řediny), vměstky (nekovové vměstky, kovové vměstky, struskovitost), nesprávné chemické složení, přerušení souvislosti (trhliny, praskliny, zdvojeniny), vady struktury (nesprávná struktura, strukturní heterogenita) [1].

Vady výrobku lze dělit z různých hledisek: druhu vady, příčiny vzniku, způsobu a stadia jejich zjišťování a dalších kriterii.

Z hlediska používaných defektoskopických metod obvykle dělíme vady na povrchové a vnitřní [2].

Povrchové vady a jejich identifikace:

- Penetrační zkouškou (kapilární)
- Vizuální zkouškou
- Magnetoinduktivní a elektroinduktivní zkouškou

Vnitřní vady a jejich identifikace:

- Akustické zkoušky (ultrazvukové)
- Radiologické zkoušky

Přehled defektoskopických metod:

- Vizuální metoda

- Kapilární nedestruktivní defektoskopie
- Elektromagnetická nedestruktivní defektoskopie
- Infračervená nedestruktivní defektoskopie
- Optická holografie
- Nedestruktivní metalografická kontrola
- Ultrazvuková nedestruktivní defektoskopie, impedanční defektoskopie
- Prozařovací nedestruktivní kontrola

3.2 Vizuální metoda

Vizuální metoda je založena na fyzikálních jevech: světla, optiky a fotometrie.

Zákon odrazu světla: *„odražený paprsek leží v rovině dopadu jako dopadající paprsek. Úhel odrazu α´ je roven úhlu dopadu α (1) .“* [2]

$\alpha' = \alpha$ (1)

Kde α´ je úhel odrazu, α je úhel dopadu.

Zákon lomu světla: *„K lomu světla dochází na rozhraní dvou prostředí, proniká-li světlo z jednoho prostředí do druhého. Vztah mezi úhlem dopadu a úhlem lomu vyjadřuje Snellův zákon (2).“* [2]

$$\frac{sin\,\alpha}{sin\,\beta} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2)$$

Kde α je úhel dopadu, β - úhel lomu vlnění, V_1 - rychlost vlnění v prvním prostředí a V_2 rychlost vlnění ve druhém prostředí.

Svítivost (I) světelného zdroje; *„vyjadřuje vlastnost zdroje světla; jednotkou svítivosti světelného zdroje je **kandela** (**cd**).“* [2]

Světelný tok (ϕ); *„vyjadřuje intenzitu vjemu normálního oka, vyvolaného energii světelného záření, které prochází za jednotku času plochou v prostoru, kterým se světlo šíří. Jednotkou světelného toku je **lumen** (**lm**).“* [2]

Intenzita osvětlení (E); *„určuje účinky světla při jeho dopadu na plochu tělesa. Intenzita osvětlení (**E**) závisí na části světelného toku **(φ)**, který dopadá na plochu o obsahu ΔS. Jednotkou osvětlení je **lux** (**lx**).“* [2]

Vizuální metoda identifikuje makroskopické vady na povrchu. Vizuální kontrolu provádíme zrakem nebo jednoduchými optickými přístroji (Lupy, endoskopy, televizní a digitální kamery, periskopy). Při vizuální kontrole je kladen důraz na dostatečnou zrakovou schopnost, správné osvětlení popř. vhodnou úpravu povrchu. Je to jednoduchá, ekonomicky nenáročná zkouška, proto by měla předcházet jiným nedestruktivním metodám [3].

Dělení vizuálních kontrol:

- Přímá vizuální kontrola: Přímá kontrola mezi okem pozorovatele a kontrolovanou plochou, bez přerušení optické dráhy.
- Nepřímá vizuální kontrola: Optická dráha mezi okem pozorovatele a kontrolovanou plochou je přerušena (potrubní systémy, tlakové nádoby) [2].

Televizní a digitální technika

Televizní a digitální kamery se aplikují především v jaderných elektrárnách, kontrolují se podle předepsaných podmínek vnitřní i vnější části tlakové nádoby a reaktoru, přičemž kritická místa sleduje více kamer. Digitalizovaný obraz vyhodnocuje přítomnost a četnost určitého druhu vad [3].

Oblasti použití: v prostředí s vysokou radiací, pod vodní hladinou, v širokém teplotním spektru a ve špatných světelných podmínkách.

Výhody: malé rozměry, snadná manipulace, velká citlivost, záznam a prezentace výsledku na magnetoskopu [3].

Průmyslové endoskopy

Použití u nerozebíratelných součástí a u obtížně dostupných míst pro přímou i nepřímou vizuální kontrolu. Posuzování sváru v oblasti kořene, posuzování povrchové úpravy a koroze a stupeň opotřebení součásti. Ultra-tenká sonda IPLEX TX o průměru 2,4mm s natáčením konce sondy umožňuje vizuální kontrolu a záznam obrazu v špatně přístupných místech (obr. 1).

Obr. 1 Použití Sondy IPLEX TX [14]

Dělení dle konstrukce:

- Pevné (byroskopy)
- Ohebné (fibroskopy)

3.3 Kapilární nedestruktivní defektoskopie

Fyzikální principy této metody vycházejí z charakteristických vlastností fázových rozhraní a jevů, označovaných jako kapilární jevy.

Povrchová vrstva kapaliny má jiné fyzikální vlastnosti než vnitřní část kapaliny. Tato vrstva je velice tenká, přibližně $10^{-7}\mathrm{cm}$ [3].

Definice povrchového napětí *„povrchové napětí σ se rovná podílu velikosti povrchové síly F a délky l okraje povrchové blány, na který povrchová síla působí. Vyjadřuje rovnice (3)“* [6]

$$\sigma = \frac{F}{l} \quad (3)$$

Kde σ je povrchové napětí, *F* - síla a *l* - délka.

Jednotkou povrchového napětí je $N * m^{-1}$.

Kapilární metody nedestruktivního zkoušení se používají k identifikaci vad výhradně na povrchu materiálu tak, aby do nich kapilární kapalina (penetrant) mohla aktivně vniknout. Po odstranění přebytku penetrantu z testovaného povrchu, opět vzlíná vzhůru vlivem působení kapilárních sil. Na základě tohoto jevu můžeme indikovat místo i tvar všech necelistvostí na testovaném povrchu [3].

Rozdělení kapilárních metod:

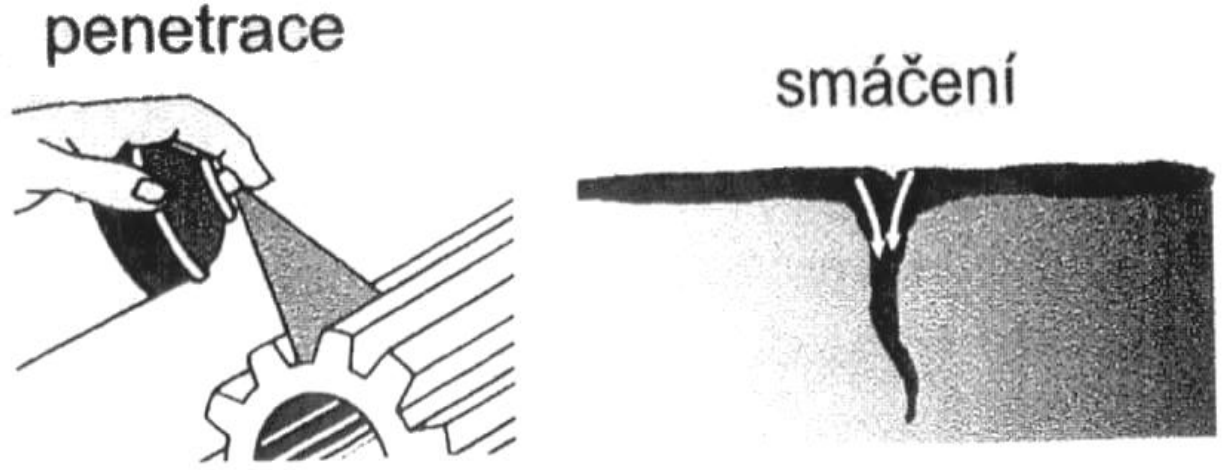
- Metoda barevné indikace: indikuje vady na povrchu zkoušeného materiálu barevným kontrastem většinou červené na bílém podkladě při denním světle nebo umělém bílém světle.
- Metoda fluorescenční: V ultrafialovém záření indikuje vady na povrchu zkoušeného materiálu světélkující žlutozelenou barvou [2].

Postup zkoušení kapilární metodou:

- **Očištění povrchu zkoušeného vzorku**. Účelem této fáze je zbavení se všech nečistot. Mechanické čištění abrazivním materiálem není vždy vhodné, může vést k zaplnění necelistvostí brusným prachem nebo k deformaci povrchu a uzavření trhlin. Proto je vhodnější použít chemickou metodu čištění, zejména tetrachloridem uhličitým, acetonem, benzínem a jinými speciálními čisticími přípravky. Další používané metody čištění povrchu jsou ultrazvukové a elektrochemické.
- **Nanesení detekční kapaliny (penetrace), její působení**. Nástřikem penetrantu vzduchovou pistolí, nanesením štětcem nebo ponořením do penetrační lázně. Nechá se působit 5-20 minut, zde platí pravidlo, že čím delší bude penetrační čas, tím jemnější vady můžeme detekovat.
- **Odstranění přebytku detekční kapaliny**. Účelem této fáze je odstranění přebytečné detekční kapaliny z povrchu a zároveň nesmí být odstraněna detekční kapalina z necelistvostí.

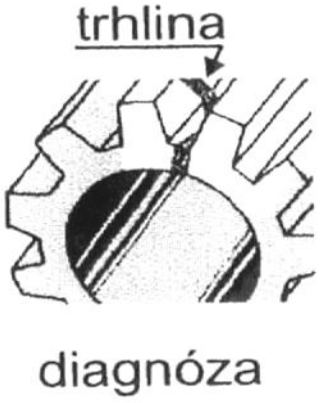
- **Nanesení vývojky.** Účelem této fáze je vytvořit barevný kontrast s detekční kapalinou a zároveň usnadnit vzlínání kapaliny z necelistvosti. Vývojky jsou ve formě prášku nebo suspenze tohoto prášku v těkavé kapalině nebo vodě.
- **Sledování a vyhodnocení zkoušky.** Tato fáze je závislá nejvíce ze všech na zkušenostech, svědomitosti a pečlivosti pracovníka. Důležitým faktorem je také osvětlení, které by mělo být nejméně 500 luxů při prohlížení v rozptýleném bílém světle. Při fluorescenční metodě použijme v zatemnělém prostoru černého světla – ultrafialového záření [2]. Celý postup kapilární metody je znázorněn na (obr. 2), (obr. 3) a (obr. 4).

Obr. 2 Postup kapilární metody I [15]



Obr. 3 Postup kapilární metody II [15]

Obr. 4 vyhodnocení zkoušky [15]



3.4 Elektromagnetická nedestruktivní defektoskopie

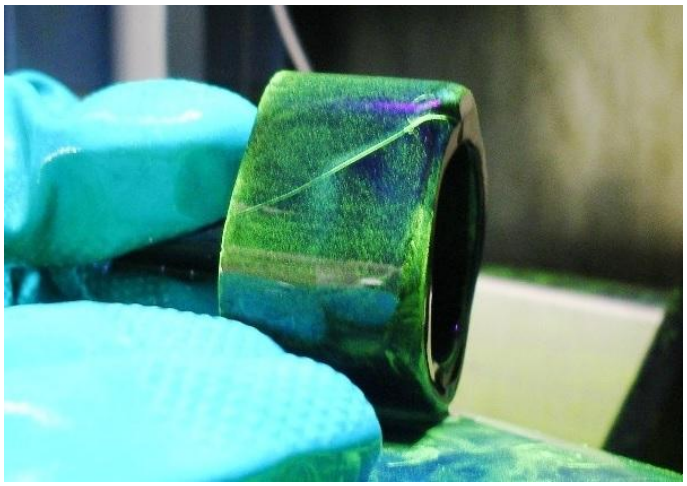
Metody rozptylových toků

Magnetické metody jsou založeny na rozptylových magnetických polích nad vadami. V přítomnosti vady se ve zmagnetizovaném vzorku zvětší magnetický odpor a indikuje vadu, dochází k rozptylu magnetického pole. Nejpřesnějších výsledku dosáhneme na povrchu nebo těsně pod povrchem zkoušeného vzorku. A pokud je vada kolmo ke směru magnetického pole. V případě, že orientace vady splývá se směrem magnetického pole, rozptylové pole nevzniká a vadu nelze zjistit [3].

Využívá se tří způsobů:

- Prášková metoda. Ukázka této metody (obr. 5).
- Elektroinduktivní metoda za pomoci sondy
- Metoda magnetografická

Obr. 5 Ukázka práškové metody pod UV světlem [16]



Metoda vířivých proudů

Základ metody vířivých proudů spočívá v tom, že zkoušený vzorek s určitou elektrickou vodivostí a magnetickou permeabilitou vystavíme působení střídavého magnetického pole, které vytváří budící cívka napájená střídavým proudem. V tomto zkoušeném vzorku se indukuje elektromagnetická síla a vznikají vířivé proudy.

Princip indikace vady (trhlin, povrchových prasklin, přeložek, poruch sváru apod.) spočívá v tom, že část drah vířivých proudů je přerušena, takže zpětná vazba na budící pole se změní. Touto metodou můžeme vyhodnocovat i strukturní stav, který změní uvedené magnetické i elektrické parametry (strukturoskopie). Metoda vířivých proudů se používá pro měření tloušťky stěn, měření povrchových vrstev kovů, měření tloušťky laku, kontrola záměn materiálu, kontrola mechanického napětí.

Přístrojová konstrukce je tvořena generátorem střídavého proudu, budící cívkou, měřící cívkou a voltmetrem.

Výhody metody vířivých proudů:

- Levnější metoda než prozařovací metody
- Lehké a přenosné přístroje pro nedestruktivní zkoušku
- Možnost automatizace

- Není třeba upravovat povrch jako u penetračních nedestruktivních zkoušek
- Bezkontaktní metoda
- Použití i při vysoké teplotě
- Velká rychlost zkoušení
- Možnost zkoušení i v oblasti obtížně dostupných míst

Nevýhody metody vířivých proudů:

- Nemožnost indikace vad hluboko pod povrchem
- Rozměrově omezené součásti pro testování [2].

Metody strukturoskopické

Tato metoda určuje jakost tepelného zpracování a vychází ze zvoleného magnetického nebo elektrického parametru, který je ve většině případů nezaměnitelnou vlastností stavu mikrostruktury po tepelném zpracování. Magnetické nebo elektrické hodnoty zkoušeného vzorku snímáme specializovanými snímači a tyto naměřené hodnoty porovnáváme se vzorovým etalonem. Strukturoskopické metody se používají k zjištění jakosti tepelného zpracování, ke kontrole materiálových změn, k měření tloušťky povrchových nemagnetických vrstev a ke kontrole magnetických fází v nemagnetickém prostředí [2].

3.5 Infračervená nedestruktivní defektoskopie

Infračervené záření

„Látky všech skupenství vydávají elektromagnetické záření, které má původ v termických pohybech jejich nabitých částic a které se souborně nazývá teplotní záření. Při teplotách nižších než asi 525 ^{o}C je toto záření neviditelné a označuje se nejčastěji infračervené záření. Spektrum a intenzita tohoto záření závisí na teplotě materiálu.“ [3]

Infračervené nedestruktivní zkoušení

Při této metodě se vyhodnocují změny intenzity infračerveného záření. Rozdílné vyzařování infračerveného záření oproti okolí indikuje vadu materiálu. Proto je potřeba při měření

eliminovat nebo udržet konstantní okolí zkoušeného vzorku a vliv povrchu. Vliv povrchu je charakterizován emisním koeficientem, který souvisí s teplotou a povrchem vzorku.

Při výskytu vady, infračerveným nedestruktivním zkoušením, dochází k dvěma jevům:

- *„způsobuje charakteristickou změnu tepelného toku přiváděného do materiálu zvenčí.“* [3]
- *„Může být příčinou zvýšeného vyzáření tepla a tím zdrojem tepla.“* [3]

Zkouška se provádí bud aktivně nebo pasivně. Aktivní provedení zkoušky spočívá v tom, že vzniká teplo v místě vady v důsledku samotné funkce zkoušeného vzorku. Pasivní provedení zkoušky spočívá v tom, že vyvoláme vnějším zdrojem tepelný tok a necháme ho protékat zkoušeným vzorkem. Výsledek zkoušení je u obou metod závislý na způsobu ohřevu, tedy vhodném tepelném toku.

Plošný ohřev: Nutno dodat konstantní a dostatečně velký přívod tepla po celé zkoušené ploše vzorku. Např. indikace vady do cca 10 mm pod povrchem zkoušeného vzorku je nutno dodat:

$0{,}586 * 10^4\ W * m^{-2}$ pro ocel

$0{,}418 * 10^6\ W * m^{-2}$ pro hliník

$1{,}04 * 10^6\ W * m^{-2}$ pro měď

Nestacionární ohřev: Méně náročný než plošný ohřev, bodový po spojité dráze, může vznikat velké tepelné namáhání zkoušeného vzorku. Jako tepelné zdroje se nejčastěji používají infrazářiče, elektrická odporová topidla, přímý plamen a v poslední době i laser. Teplota vzorku se pohybuje mezi 50 – 150 ^{o}C [3].

3.6 Optická holografie

Holografie je relativně nová oblast v nedestruktivní defektoskopii s širokou oblastí použití. Při holografické metodě testování se používá laseru. Měření laserem je velmi přesné a umožňuje měření vzorků velkých rozměrů a to i ve 3D. Nejčastěji se holografie používá

k registraci různého kmitavého pohybu, jelikož dokáže zachytit amplitudu i fázi pohybu v libovolném čase.

Použití:

- Srovnávání předmětů stejného tvaru
- Přesné měření deformací různých struktur
- Analýza charakteru vibrací povrchu
- Zjišťování malých strukturních změn v důsledku uvolnění vnitřních pnutí

Světelný zdroje:

V holografii se nejčastěji používá několik druhů laserů

- Helioneonový laser o vlnové délce 0,632 μm
- Rubínový laser o vlnové délce 0,694 μm
- Neodymový laser o vlnové délce 1,06 μm [3].

3.7 Metalografická nedestruktivní kontrola

Metalografická metoda stojí svým principem na hranici nedestruktivní a semidestruktivní metody, jelikož je potřeba zkoušený povrch upravit zpravidla broušením a leštěním. Obroušení několika desetin milimetru na 1 cm^2 při testování několika tunových turbín a podobně těžkých výrobků je zanedbatelné a můžeme tuto metodu považovat za nedestruktivní [9].

V praxi je často požadováno k nedestruktivnímu zkoušení ještě o doplnění metalografického posudku mikrostruktury materiálu. U součástí z kterých není možno odebírat vzorky pro zkoumání v laboratoři je nutno metalografické vyhodnocení provádět v provozních podmínkách. Kontrolují se tak nejčastěji sváry přenosným světelným mikroskopem [3].

Metoda replik

- **Příprava povrchu:** Povrch musí být očištěn, odmaštěn a vysušen. Zkoumání povrchu je možné po broušení, leštění popř. leptání. Při opracování povrchu je nutné dbát,

aby nedocházelo k nadměrnému zahřívání povrchu a byly odstraněny zbytky po broušení.

- **Sejmutí reliéfu replikou:** Folie (repliky) jsou vyrobeny z vhodné plastové hmoty o maximální tloušťce 0,06 mm. K nutnému změkčení folie se používá rozpouštědlo. Poté se folie ve směru od středu k okraji přitlačí tak, aby přebytečné rozpouštědlo uniklo a zabránilo protržení folie nebo vytvoření vzduchových bublin [9].

3.8 Ultrazvuková nedestruktivní defektoskopie

Základy ultrazvuku

„V ultrazvukové defektoskopii se používají vysokofrekvenční zvukové vlny k nedestruktivnímu charakterizování vnitřní struktury materiálu. Zvuk je mechanická vlna, jako důsledek vybuzeného kmitání jednotlivých částic hmoty. Na rozdíl od elektromagnetických vln je pro její šíření vždy nutné médium v pevném, kapalném nebo plynném skupenství. Termín „Ultra“ se vztahuje na rozsah frekvencí zvuku, který je nad hranicí lidského sluchu (20 kHz). Během šíření zvukové vlny není žádný materiál transportován, ale atomy nebo molekuly kmitají kolem své klidové polohy a tím přenášejí svůj pohyb (kmitání) na sousední částice. Celý proces kmitání (vibrací) se šíří prostředím rychlostí zvuku charakteristickou pro dané prostředí. “ [10]

Kmitání molekul se pravidelně opakuje v délkových rozměrech, tato vzdálenost se nazývá volná délka λ a také v pravidelně opakujících se časových intervalech. Tyto intervaly se nazývají dobou kmitu T. Počet kmitů za sekundu se nazývá frekvencí f. Další důležitý parametr je rychlost šíření zvuku c v daném prostředí (materiálu). Mezi těmito veličinami platí vztahy (4) a (5):

$$f = \frac{1}{T} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = c * T \quad (5)$$

Kde f je frekvence, T – doba kmitu, λ – volná délka, c – rychlost zvuku

Dělení zvuku podle frekvencí kmitání

- Infrazvuk frekvence pod 20 Hz
- Zvuk frekvence mezi 20 Hz a 20 kHz
- Ultrazvuk frekvence nad 20 kHz
- Hyperzvuk z nad 100 MHz [10].

Metody ultrazvukové nedestruktivní defektoskopie

Průchodová metoda: Tato metoda je založena na principu zeslabení ultrazvuku při průchodu chybou. Vyžaduje dvě sondy umístěné v jedné ose. Jedna sonda vysílá vlnění a druhá přijímá prošlé vlnění materiálem. Je tedy zřejmé, že tato metoda je omezena na součástky s vhodnými protilehlými povrchy. Další nevýhoda této metody je, že v případě vady vzdálené daleko od sondy a s průřezem menším než průřez ultrazvukového svazku dochází k neodhalení vady [5].

Odrazová metoda: Při odrazové metodě se do kontrolovaného vzorku vysílají krátké ultrazvukové impulsy, které se na rozhraní dvou prostředí odrazí a vrací se zpět. Například rozhraní: vada a zkoušený materiál nebo rozhraní: okolní prostředí a zkoušený materiál. Jelikož je mezi vyslaným impulzem a odraženým impulzem časová prodleva, lze použít pouze jednoho elektroakustického měniče tzv. jednosondové zkoušení. Přístroj zaznamenává dobu od vyslání ultrazvukového impulzu až po registraci odraženého impulzu přijímačem [5].

Rezonanční metoda: *„Při rezonanční metodě se do zkoušeného materiálu vysílají ultrazvukové vlny, jejichž frekvence se mění. Když se tloušťka předmětu rovná celistvému násobku poloviční délky vlny vysílaného ultrazvuku, vznikne ve zkoušené součásti stojaté vlnění. Při stojaté vlně dodává vysílač minimální energii do kontrolovaného předmětu, který se při stojaté vlně dostane do vlastní rezonance a to buď na základní nebo některé vyšší harmonické frekvenci. “* [3]

3.9 Impedanční defektoskopie

Princip impedanční defektoskopie je založen na měření změny lokální mechanické impedance zkoušeného pole. Tato metoda se nejčastěji používá v leteckém průmyslu ke kontrole lepených spojů. Speciální sonda generuje v testovaném vzorku ohybové vlnění s frekvencí 1-11 kHz. Čím větší mechanická impedance, tím větší je kvalita lepeného spoje (tuhost struktury). Použití impedanční defektoskopie je vhodné u lepených spojů typu potah (hliník, sklolaminát, CFRP) s lehkým vnitřním elementem (polyuretan, voštinové jádro, tuhá výplň).

Výhody impedanční defektoskopie:

- Použití suchého bodového kontaktu
- Rychlost kontroly (až 10 cm/s)
- Souvislý posuv sondy
- Jednoduché vyhodnocení výsledků [3].

3.10 Prozařovací nedestruktivní kontrola

Princip této metody je založen na šíření energie prostorem. Je-li šíření energie prostřednictvím elektromagnetických vln, mluvíme o rentgenovém záření a záření gama. Elektromagnetické vlny je možné rozlišovat dle jejich schopnosti pronikat materiálem, tato vlastnost závisí na jejich energii, tedy vlnové délce. Šíří-li se energie prostřednictvím hmotných částic (elektrony, neutrony, částice alfa), hovoříme o korpuskulárním (částicovém) záření.

Ionizující záření se při průchodu vadou (dutinou) zeslabuje více, než při průchodu materiálem a tím se indikuje vada. Na filmu, kam záření dopadá, se vada projeví jako tmavší místo [2].

Vznik rentgenového záření

Princip záření rentgenkou: Katoda je rozžhavená wolframová spirála a produkuje elektrony, které jsou urychlovány mezi anodou a katodou vysokým napětím. Kinetická energie

dopadajících elektronů na wolframový terčík na anodě se změní z 99 % na teplo a pouze 1 % na záření X [2].

Lineární urychlovače a betatrony: *„Betatron je kruhový indukční urychlovač elektronů, ve kterém elektrony dosahují podstatně vyšších rychlostí a tím i kinetické energie nežli v rentgence. Po dopadu elektronů na terčík vzniká brzdné záření (které se i v anglofonní literatuře nazývá „bremsstrahlung“). Elektrony jsou urychlovány točivým elektrickým polem, vytvářeným střídavým magnetickým polem. “* [12]

Radionuklidy: Vlastnost radionuklidů je taková, že jejich jádra se samovolně rozpadají a vyzařují záření gama. Toto záření není možné zastavit, proto se používají jako ochrana silné olovněné kryty [2].

4 Vývojové trendy v oblasti nedestruktivního zkoušení materiálu

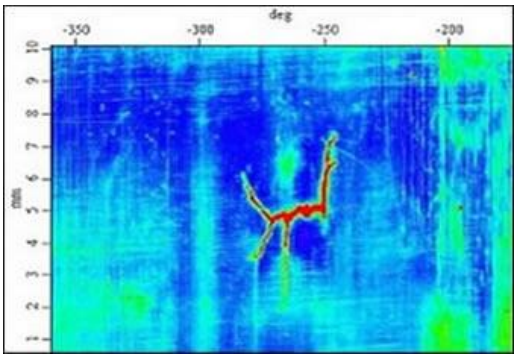
4.1 Trendy v oblasti vizuálního nedestruktivního zkoušení

Z principu metody přímé je patrné, že vývoj této metody nebude už příliš možný. U nepřímé metody dochází k neustálému zlepšování a zdokonalování videostopů, především rozlišovacích schopností přístrojů a přesnějšímu vyhodnocování tvaru a polohy vady. Jednou z moderních metod, je metoda stereoskopická, která funguje na podobném principu jako lidský zrak. Přes měření pixel bodů, které jsou stranově posunuté, se určuje měřítko v milimetrech. Dosahuje přesnosti do 10% z odečítání rozměrů. Dalším moderním přístrojem pro vizuální zkoušení materiálu jsou 3D průmyslové endoskopy. Princip spočívá v rychlém střídání obrazů ze dvou kamer (50 x za vteřinu) a zobrazení obrazu na monitoru. Obsluha pak musí mít speciální brýle, které se střídavě zatemňují. Když je na monitoru pravá část obrazu, zatmaví se levá část brýlí a stejně tak i naopak. Lidský mozek si pak z obou obrazů udělá vjem prostorového obrazu [7].

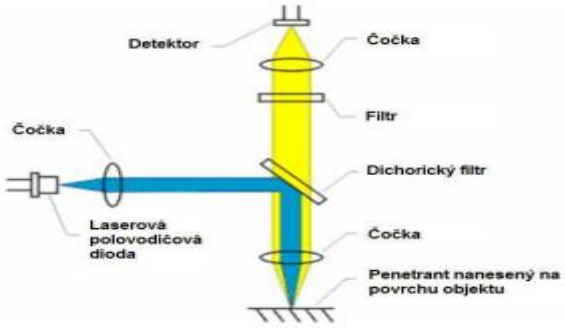
4.2 Trendy v oblasti kapilární nedestruktivní metody

Nejmodernější trendy v této oblasti určuje vývoj a použití laserů. Jednou z moderních kapilárních metod je tedy metoda Laser scanner penetrant inspection dále jen LSPI. Při použití LSPI dochází k osvětlení povrchu zkoušeného vzorku fokusovaným optickým svazkem laserové polovodičové diody s ultrafialovým spektrem. Po dopadu optického svazku na penetrant se přes dichorický filtr odfiltruje ultrafialové záření a poté dopadá paprsek na detektor (obr. 7). Detektor může být například CCD kamera, která pořizuje digitální fotografie o vysokém rozlišení. Pomocí vhodného softwaru pak určí velikost vady. (obr. 6) Tím odpadá vliv subjektivního vyhodnocení člověka, jako u klasické kapilární zkoušky. Rozlišovací schopnost této metody je až 0,025 mm [7, 8].

Obr. 6 Ukázka vady metodou LSPI [17]



Obr. 7 schéma metody LSPI [17]



4.3 Trendy v oblasti elektromagnetické nedestruktivní metody

Jedna z moderních elektromagnetických nedestruktivních metod je metoda vířivými proudy eddy current array (pole sond). Uspořádání sond je do matice nebo může být uspořádání dle profilu měřeného povrchu. Tato metoda je vhodná k testování velkých ploch. Výhoda metody eddy current array je obrazový výstup, na rozdíl od klasické elektromagnetické kontroly, kde jsou výstupem jen křivky. Další výhody oproti klasické elektromagnetické kontrole jsou: výrazné urychlení kontroly, kontrola velkých ploch při jednom průchodu, srozumitelnější interpretace výsledků, vyšší spolehlivost a pravděpodobnost odhalení necelistvostí. Nevýhodou je vznik parazitních elektromagnetických vazeb, které mají špatný

vliv na přesnost měření. Elektromagnetické vazby se odstraňují multiplexováním. To znamená rychlé buzení skupin navzájem sousedících sond v senzoru [13].

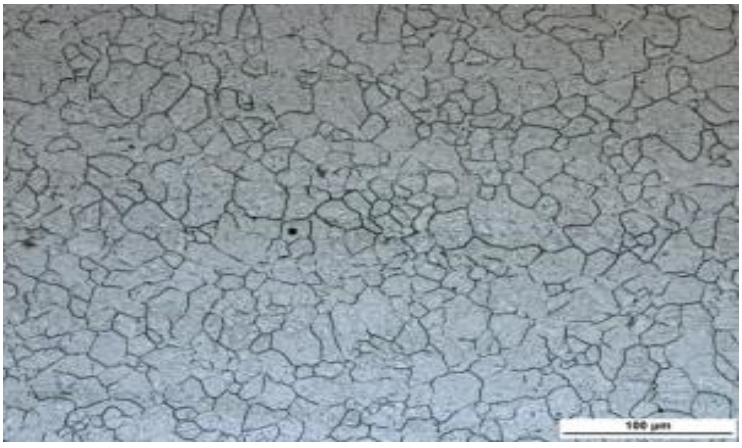
4.4 Trendy v oblasti holografické nedestruktivní metody

Holografická metoda je dnes běžně používána. S rostoucím využitím kompozitních materiálů v leteckém i kosmickém odvětví rostou i nároky zkušebních metod. Například zkoušení rotorových listů vrtulníku z kompozitních materiálů (na bázi uhlíkových nebo kevlarových vláken). Při zatížení rotorových listů proudem vzduchu dochází v přítomnosti vnitřní vady (delaminace) k malé deformaci povrchu. Tuto deformaci lze indikovat pouze holografickou metodou. Dalším příkladem testování holografickou metodou je testování pneumatik. Plášť pneumatiky se skládá z několika vrstev, které při vulkanizaci na sebe dokonale nepřilehnou. Tím vznikají mezi vrstvami nepatrné vzduchové bubliny, které mohou být v některých případech příčinou havárie [3].

4.5 Trendy v oblasti metalografické nedestruktivní metody

Vývoj mikroskopů a fotografických zařízení nám v dnešní době umožňuje mikrostrukturu vyfotit v provozních podmínkách a podrobit pak důkladné analýze v laboratoři (obr. 8). V současné době je to i nejrychlejší metoda [3].

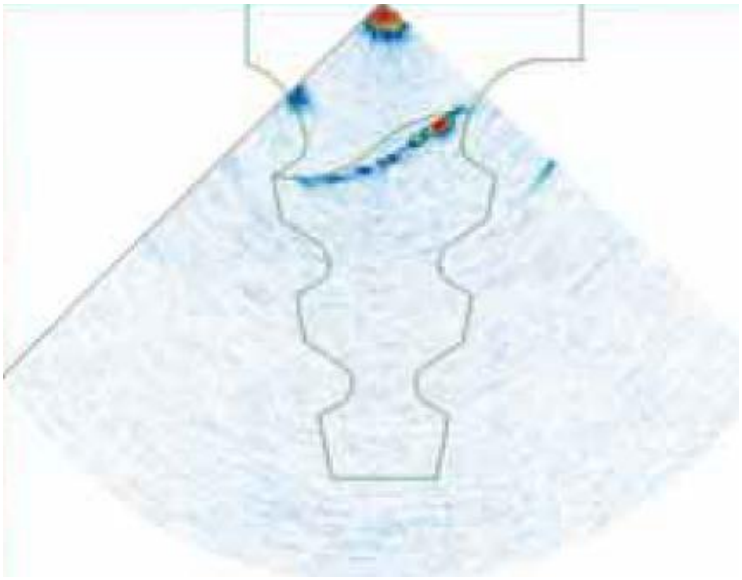
Obr. 8 Mikrostruktura zušlechtěné oceli naleptaná na zviditelnění hranic původního austenitického zrna [18]



4.6 Trendy v oblasti ultrazvukové nedestruktivní metody

Phased array: Jedna z moderních metod. Tato metoda vznikla jako odezva na zkoušení malých trhlin v geometricky složitých součástech, rozlišitelnost při zkoušení heterogenních svárů a zvýšení přesnosti velikosti vady v jaderné energetice. Hlavní výhoda metody phased array je proměnlivý úhel vysílání ultrazvukového paprsku. Dosud používané jednoduché sondy umožňovaly, šíření paprsku jen jedním úhlem. Metoda phased array využívá soustavy miniaturních piezoelektrických měničů, vícenásobných ultrazvukových členů a elektronického opožďování pulsů k vzniku ultrazvukových paprsků, které se dají elektronicky směrovat, zaostřovat a vychylovat. Touto metodou lze dosáhnout velké přesnosti, rychlosti a provedení vícenásobných úhlových kontrol. Výstupem jsou podrobné řezy vnitřních struktur obdobné ultrazvukovým obrázkům v medicíně [11]. Ukázka výstupu metody Phased array (obr. 9).

Obr. 9 Phased array - trhlina v závěsu lopatky [11]



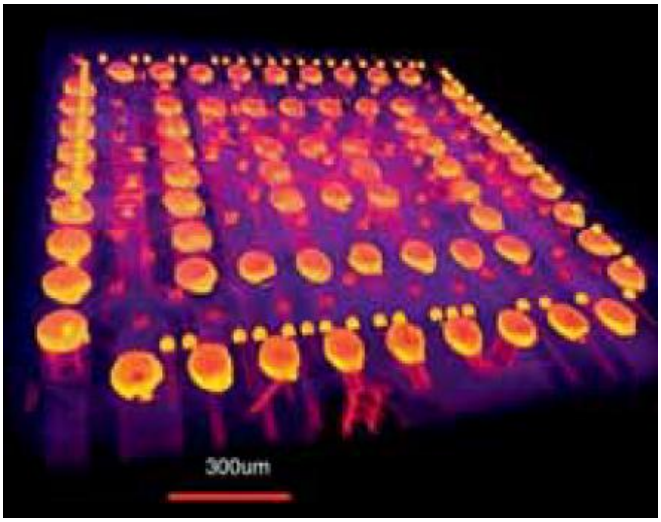
Metoda TOFD (Time of Flight Diffraction): Používá se k nedestruktivní kontrole svárů. Do češtiny lze název přeložit, jako difrakční technika měření doby průchodu. Metoda TOFD spočívá v interakci ultrazvukových vln s okraji vad, odražená vlna v tomto případě není důležitá. *„Okraj vady při interakci s ultrazvukovou vlnou emituje difrakční vlny a z doby průchodu difrakčního signálu se pak určuje velikost vady. "* [11]

Metoda TOFD se používá k určování hloubkových rozměrů vad. Aplikace metody TOFD má i některá omezení, například jako všechny ultrazvukové metody je i tato metoda omezena velikostí zrna zkoušeného materiálu. Dále se nehodí k indikaci vad ležících blízko pod povrchem zkoušeného materiálu, jelikož echo od vady může být skryto echem od laterální vlny. Přesnost určování velikosti vady klesá s blízkostí zkoušeného povrchu [11].

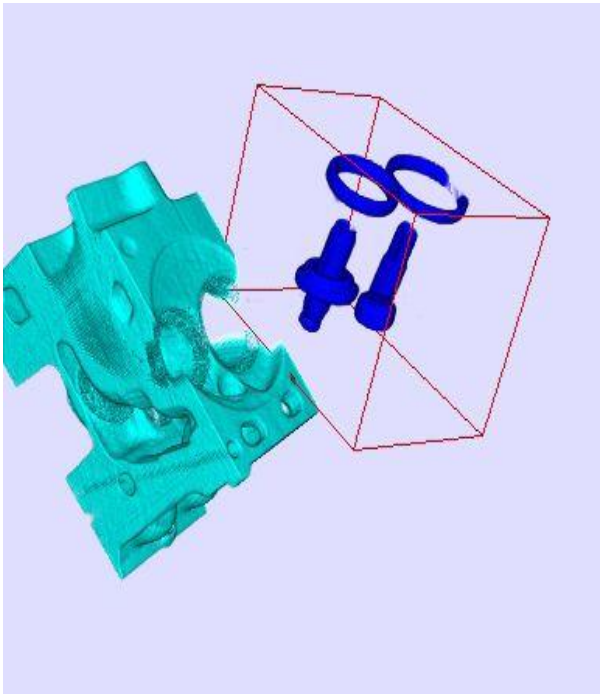
4.7 Trendy v oblasti prozařovací nedestruktivní metody

Trojrozměrná počítačová tomografie-3D CAT (Computer Aided Tomography). Princip této metody spočívá v tom, že ze 720 dvojrozměrných rentgenových snímku se za pomoci výkonného softwaru vytvoří 3D obraz (obr. 10). 3D obraz na monitoru můžeme libovolně natáčet, zkoumat ze vnitř a oddělovat materiály s jinou hustotou (obr. 11). Díky tomu, že 3D obraz byl vytvořen z rentgenových snímků lze zkoumat materiály samostatně dle hustoty. Využití metody například k hledání překážek v palivovém vedení, trhliny a bubliny v odlitcích a měření jejich tvarů a rozměrů [11]. Digitální rentgenové zařízení (obr. 12).

Obr. 10 RTG počítačová tomografie – studie pouzdra polovodiče [11]



Obr. 11 Oddělení materiálu s jinou hustotou v 3D CAT [11]



Obr. 12 digitální rentgenový přístroj [11]

5 Závěr

Cílem této bakalářské práce je vytvoření uceleného přehledu nejčastěji používaných defektoskopických zkoušek a popsání současného stavu z oblasti vývoje a moderních trendů. Při psaní bakalářské práce bylo využito vysokoškolských materiálů, učebnic, odborné literatury, příspěvků v odborných časopisech a internetových stránek zabývajících se touto problematikou.

Z prostudování těchto zdrojů vyplývá, že nejvíce inovativní a progresivní vývoj je především u prozařovacích a ultrazvukových nedestruktivních metod. Například metody computer aided tomography, time of flight diffraction a phased array. Naopak z principu vizuálních a kapilárních nedestruktivních metod je patrné, že progresivnější vývoj nelze očekávat. U těchto metod je vývoj směřován zejména ke zlepšování rozlišovacích schopností přístrojů a lepší prezentace výsledků. Dále je zřejmé z náročnosti některých nedestruktivních metod, že jsou kladeny velké nároky na znalosti, zrak a zkušenosti personálu. Skutečným odborníkem se člověk stává až po získání mnohaleté praxe. Rozvoj nedestruktivní defektoskopie je diktován trendy světové ekonomiky a rozvojem materiálového inženýrství. Do budoucna je snaha po mechanizaci a automatizaci zkušebních postupů, které zvýší produktivitu zkoušení a potlačí vliv subjektivního faktoru člověka.

6 Použitá literatura a další zdroje

[1] PTÁČEK, L.: *Nauka o materiálu*, ISBN 80-7204-283-1, CERM, Brno 2003, 516 s.

[2] KOPEC, B. a kol.: *Nedestruktivní zkoušení*, ISBN 978-80-7204-591-4, CERM, Brno 2008, 569 s.

[3] DUBENSKÝ, R., MINAŘÍK, V., ČERMÁK, F.: *Defektoskopie – nedestruktivní zkoušení*, ISBN-01-00844-4, ČVUT, Praha 1992, 205 s.

[4] MACHÁČEK, M.: *Encyklopedie fyziky,* ISBN 80-204-0237-3, MLADÁ FRONTA, Praha 1995, 408 s.

[5] BROŽEK, M.: *Strojírenská technologie I*, ISBN 978-80-213-1780-2, ČZU, Praha 2008, 80s.

[6] SVOBODA, E. a kol: *Přehled středoškolské fyziky,* ISBN 80-7196-116-7, PROMETHEUS, Praha 2003, 497 s.

[7] KREIDL, M.: *Senzory neelektrických veličin : Technická diagnostika. 1.vyd*., ISBN 80-7300-158-6, BEN, Praha 2006, 406 s.

[8] BALDEV, R., JAYAKUMAR, T., THAVASIMUTHU, M.: *Practical non-destructive testing.* ISBN 1-84265-081-5, ALPHA SCIENCE INTERNATIONAL, India 2002, 102 s.

[9] ZBYNĚK, B., VOLÁK, J. : *Nedestruktivní hodnocení materiálu energetických komponent.* Czech Society for Nondestructive Testing, Ostrava november 9-11 2011.

[10] REGAZZO, R., REGAZZOVA, M.: *Ultrazvuk - základy ultrazvukové defektoskopie*, ISBN 978-80-7300-466-8, BEN, Praha 2013, 290 s.

[11] TECHMAGAZIN Jak fungují metody NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ*,* [online]. 2011, srpen. [cit.2015-03-03]. Dostupné z www.techmagazin.cz/ke_stazeni/T082011M.pdf

[12] HOBST, L.,: *PERSPEKTIVY ROZVOJE RADIOGRAFIE VE STAVEBNICTVÍ,* ISBN 978-80-214-3662-6, VITIUM, Brno 2008, 20 s.

[13] *OLYMPUS CORPORATION*. Eddy current array tutorial [online]. 3/2015 [citováno 2015-03-27]. Dostupné z: http://www.olympus-ims.com/cs/ndt-tutorials/eca-tutorial/

[14] *Olympus-ims* [online]. 1.11.2013 [cit.2015-03-03]. Dostupné z http://www.olympus-ims.com/cs/rvi-products/iplex-tx/

[15] *OVMT* [online]. 23.4.2012 [cit.2015-03-03]. Dostupné z http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/kapilarni_zkousky.pdf

[16] *QPGMBH* [online]. 2014 [cit.2015-03-03]. Dostupné z http://www.qpgmbh.de/cz/nedestruktivni-zkouky/magneticka-prakova-metoda.html

[17] *Laser-NDT* [online]. 2015 [cit.2015-03-04]. Dostupné z http://www.laser-ndt.com/applications_crack_detection_nuclear.html

[18] *COMTEST FHT* [online]. 2015 [cit.2015-03-04]. Dostupné z http://www.comtesfht.cz/metalografie

7 Seznam obrázků

Obr. 1 Použití Sondy IPLEX

Obr. 2 Postup kapilární metody I

Obr. 3 Postup kapilární metody II

Obr. 4 vyhodnocení zkoušky

Obr. 5 Ukázka práškové metody pod UV světlem

Obr. 6 Ukázka vady metodou LSPI

Obr. 7 schéma metody LSPI

Obr. 8 Mikrostruktura zušlechtěné oceli naleptaná na zviditelnění hranic původního austenitického zrna

Obr. 9 Phased array - trhlina v závěsu lopatky

Obr. 10 RTG počítačová tomografie – studie pouzdra polovodiče

Obr. 11 Oddělení materiálu s jinou hustotou v 3D CAT

Obr. 12 digitální rentgenový přístroj

8 Seznam zkratek

3D CAT	Computer Aided Tomography (Trojrozměrná počítačová tomografie)
CCD	Caharge coupled device
CFRP	Carbon fiber reinforced polymer
doc.	Docent (vědecko-pedagogická hodnost vysokoškolského pedagoga)
Ing.	Ingeneur (technické vědy, ekonomika apod.)
LSPI	Laser scanner penetrant inspection
Ph.D.	Philosophiae doctor (humanitní a společenské vědy)
RNDr.	Rerum naturalium doctor (přírodní vědy – matematika, fyzika apod.)
RTG	Radioizotopový termoelektrický generátor
TOFD	Time of flight diffraction (difrakční technika měření doby průchodu.)