Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Kapilární metoda - nedestruktivní defektoskopie

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Autor bakalářské práce: Jiří Novotný

© 2020 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jiří Novotný

Inženýrství údržby

Název práce

Kapilární metoda – nedestruktivní defektoskopie

Název anglicky

Dye penetrant inspection – Nondestructive testing

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je podrobně popsat nedestruktivní zkoušení materiálů se zaměřením na kapilární metodu. V práci bude uveden základní popis principu barevné i fluorescenční metody a dále bude práce obsahovat porovnání výhod a nevýhod s ostatními metodami nedestruktivní defektoskopie.

Metodika

1. Úvod
2. Cíl a metodika práce
3. Nedestruktivní defektoskopie (popis a rozdělení metod)
4. Kapilární metoda (princip a předpisy, barevná a fluorescenční metoda, využití)
5. Porovnání s ostatními nedestruktivními metodami zkoušení (výhody, nevýhody, atd.)
6. Závěr

Doporučený rozsah práce

30-40

Klíčová slova

defektoskopie, kapilární metoda, penetrant

Doporučené zdroje informací

ČESKÁ SPOLEČNOST PRO NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ, – KOPEC, B. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí : (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.

Jiles, D.: Introduction to the principles of materials evaluation, CRC Press, 2008. ISBN 9780849373923

Předpisy, normy a periodika.

Shull, P. J.: Nondestructive evaluation : theory, techniques, and applications, New York : CRC, c2007, ISBN 978-0-8247-8872-8

Předběžný termín obhajoby

2019/2020 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů

Elektronicky schváleno dne 14. 12. 2018

doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2019

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 09. 12. 2019

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Kapilární metoda – nedestruktivní defektoskopie vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom že, na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne:..... Podpis:.....

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu doc. Ing. Martinu Pexovi, Ph.D., za čas, cenné rady a připomínky při zpracování této práce.

Kapilární metoda - nedestruktivní defektoskopie

Abstrakt: Tato bakalářská práce se zabývá nedestruktivní defektoskopií, primárně zaměřenou na kapilární metody. V první části jsou definovány vady jako celek. V další části se práce zaměřuje na jednotlivé nedestruktivní metody, popisuje stručně jednotlivé metody, přičemž klade důraz na penetrační metodu. V poslední části porovnává všechny metody s kapilární metodou, vyzdvihuje jednotlivé výhody a nevýhody. V závěru je shrnut základní obsah práce.

Klíčová slova: defektoskopie, kapilární metoda, penetrant

Dye penetrant inspection - Nondestructive testing

Summary: This bachelor thesis deals with non-destructive defectoscopy, primarily focused on dye penetrant inspection. The first part defines defects as a whole. In the next part the work focuses on individual non-destructive methods, briefly describes the individual methods, while emphasizing the penetration method. The last part compares all methods to the dye penetrant inspection, highlights the individual advantages and disadvantages. The conclusion summarizes the basic content of the work.

Keywords: defectoscopy, dye penetrant inspection, penetrant

Obsah

1 Úvod ... 1

2 Cíl a metodika práce ... 2

3 Nedestruktivní defektoskopie ... 3

3.1 Vizuální metody ... 5

3.1.1 Přímá vizuální kontrola ... 5

3.1.2 Nepřímá vizuální kontrola ... 5

3.2 Magnetická metoda prášková (polévací) ... 7

3.2.1 Princip ... 7

3.2.2 Způsoby magnetování ... 10

3.2.3 Druhy magnetizace ... 12

3.3 Metoda vířivých proudů ... 14

3.3.1 Princip ... 14

3.3.2 Způsoby metody vířivých proudů ... 15

3.4 Zkoušky ultrazvukem ... 16

3.4.1 Princip ... 16

3.4.2 Metody používané při zkoušení ultrazvukem ... 16

3.5 Zkoušky radiologické ... 18

4 Kapilární (penetrační) zkouška ... 20

4.1 Princip ... 20

4.2 Základy teorie kapilárních metod ... 20

4.3 Rozdělení kapilárních metod ... 23

4.4 Rozdělení kapilárních prostředků ... 24

4.5 Průběh zkoušky ... 29

5 Porovnání kapilární metody s ostatními ... 32

5.1 Porovnání s vizuálními metodami ... 32

5.2 Porovnání s práškovou metodou ... 32

5.3 Porovnání s metodou vířivých proudů ... 33

5.4 Porovnání s metodou ultrazvukem ... 33

5.5 Porovnání s prozařovací metodou ... 34

6 Závěr ... 35

7 Seznam použité literatury ... 36

8 Seznam obrázků ... 38

1 Úvod

Kvalita, bezproblémovost, či bezpečnost jakéhokoliv výrobku patří k vlastnostem, které se u každého produktu očekávají. Proto je nutností tyto parametry produktu kontrolovat. Testování těchto parametrů se provádí jak u polotovaru, kde včasné odhalení nevhodné součásti ušetří mnoho energie, tak u nově vyrobené součásti, či u součásti už dlouho fungující. Těmito kontrolami lze snadno předejít haváriím strojů, objektů a tím zabránit nejen velkým finančním výdajům spojených s opravou, ba dokonce koupi nových strojů, ale co je mnohem důležitější, lze tím zabránit ztrátám na lidských životech, kterými jsou poruchy často doprovázeny.

Je nutné konstatovat, že konstrukční materiály, které se používají pro stavbu zařízení a strojů, nejsou nikdy téměř zcela bez vad. Je to dáno zákonitostmi tvorby struktury, nedokonalostmi výrobních technologií, vlivem lidského faktoru a dalšími jinými podmínkami.

Kvůli vyvíjejícímu se průmyslu se lidé začali zabývat problematikou nedestruktivního zkoušení již v polovině 19. století. Velký vliv na rozvoj defektoskopie mají stále rostoucí ceny surovin, energie a lidské práce. Díky mnohaletému bádání bylo objeveno mnoho způsobů testování, které se postupem času stále a stále zdokonalují, aby poskytly co nejlepší a nejpřesnější informace o vadách materiálů.

Dnes si průmyslovou výrobu bez těchto zkoušek nelze představit. Je vyvinuto mnoho různých metod, které se navzájem doplňují. Bohužel se ani na jednu z metod nelze stoprocentně spolehnout, to znamená, že žádná metoda nedává schopnost detekovat všechny vady, které se vyskytují jak v polotovarech, tak v hotových výrobcích. Aby bylo zaručeno, že všechny vady, které by se mohly ve výrobku teoreticky vyskytnout, budou zjištěny, je nutné použít současně co možná nejvíce metod. K nejefektivnějšímu odhalení chyb je nutné dobře znát fyzikální jevy jednotlivých metod a jejich možnosti.

Tato práce se zabývá převážně nedestruktivním zkoušením povrchových vad, zkoušky vnitřních vad jsou uvedeny ve stručnosti.

2 Cíl a metodika práce

Cílem této bakalářské práce je popis nejběžněji používaných nedestruktivních metod zkoušení (dále jen „NDT“) materiálu. Práce by měla charakterizovat jednotlivé metody, jejich principy, využití atd. Hlavním cílem je zevrubně popsat kapilární metodu a porovnat ji s ostatními zkouškami. Vyzdvihnout její klady, a naopak i poukázat na její slabé stránky. Snahou bude objektivně zhodnotit výhody a nevýhody prostřednictvím informací získaných z rešerše, k tomu bude použito odborných knižních i internetových zdrojů.

Dále bude metodika této práce spočívat v popsání zkoušky dvou vzorků pomocí kapilární metody. Zkouška bude provedena základním postupem, což znamená: očistění povrchu, nanesení penetrační kapaliny, chvíli poté její odstranění, následné nanesení vývojky a nakonec vyhodnocení vzorků. Po prohlídce výsledku zkoušky bude vyhodnoceno, zda jsou předměty nadále použitelné.

3 Nedestruktivní defektoskopie

Definice vad

Pod pojmem vada se rozumí odchylka od vlastností předepsaných v technických normách nebo dalších technických dokumentech, ať už se jedná o odchylky rozměrů, tvaru, barvy atd. Pro účely NDT jsou vady chápány především jako odchylky od necelistvosti materiálu, struktury nebo chemického složení. [1]

Dělení vad

Vady se třídí podle vnějších znaků do skupin a v rámci těchto skupin na jednotlivé druhy podle typu výrobku, například odlitky, svary, tvářené výrobky apod. (viz Tabulka 1). Charakteristiky vad jednotlivých výrobků uvádějí příslušné normy (ČSN 42 1240).

Tabulka 1- Základní třídění vad [1]

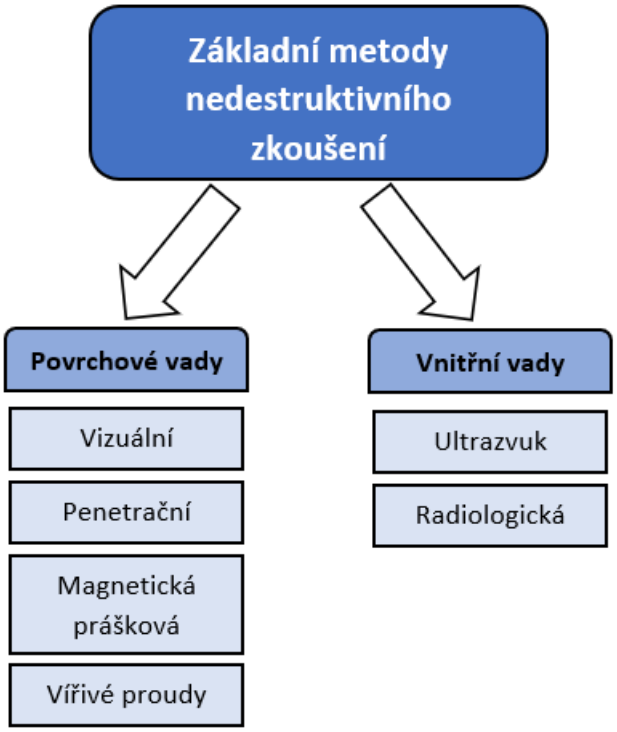
Skupina vady		Všeobecná charakteristika
číslo	název	
1	Vady rozměrů	Nedodržení požadavků na předepsané jmenovité rozměry výrobku a jejich mezní úchylky
	Vady tvaru a polohy	Nedodržení požadavku na vzdálenosti vyjadřující polohu posuzované plochy, osy nebo roviny souměrnosti výrobku, vzhledem k její jmenovité poloze
2	Vady povrchu	Nedodržení požadavku na předepsané provedení povrchu
3	Necelistvosti	Necelistvost hmoty výrobku
4	Vady zjišťované zvláštními laboratorními zkouškami	Nedodržení požadavků na předepsané hodnoty mechanických, technologických a fyzikálních vlastností výrobku, nedodržení předepsané makrostruktury, mikrostruktury apod.

Obecně se jako vady nedokonalosti materiálu nebo součásti považují:

1) staženiny,
2) vločkové trhliny,
3) vycezeniny (segregace),
4) makroskopické nekovové vměstky,
5) podélné trhliny (praskliny),
6) příčné trhliny (praskliny).

Rozdělení metod nedestruktivního zkoušení

Z hlediska typu vady, kterou je potřeba identifikovat, se dají jednotlivé metody NDT rozdělit buď na vady na povrchu anebo na vady ukryté uvnitř součásti. Podle toho se poté volí jedna z metod zkoušení (viz Obr. 1).



Obr. 1 - Základní dělení NDT

Povrchové zkoušky NDT

Zkoušky povrchové patří mezi speciální obor nedestruktivního zkoušení materiálu, který zahrnuje takové metody, jež umožňují zjišťovat necelistvosti výhradně v povrchových vrstvách materiálu. Jedná se především o trhliny vystupující na povrch kontrolovaného výrobku. Jak bylo zmíněno výše, mezi povrchové zkoušky NDT patří: vizuální, kapilární, mg. práškové a vířivými proudy. [2]

Vnitřní zkoušky NDT

Obdobně jako u povrchového zkoušení se jedná o speciální obor nedestruktivního zkoušení, který ovšem cílí na podpovrchové vady materiálu, mezi něž například patří: dutiny, segregace, vměstky. Nejčastěji se využívá zkoušení ultrazvukem nebo prozařováním.

3.1 Vizuální metody

Vizuální kontrola patří mezi nejjednodušší a levné defektoskopické metody, pomocí které se zjišťuje výskyt povrchových vad materiálu či součástky (trhliny, praskliny, koroze atd.). [1]

3.1.1 Přímá vizuální kontrola

Nejjednodušší kontrola, při níž se prohlíží přímo na přístupný zkoušený povrch. Při pozorování nesmí být přerušena optická dráha mezi okem a kontrolovanou plochou. Zkoumat lze pouhým okem, nebo pomocí zrcadel, lupy či mikroskopu o malém zvětšení (3 až 6krát). [1]

3.1.2 Nepřímá vizuální kontrola

V případě, kdy je kontrolované místo špatně přístupné, ať už z důvodu nepřístupnosti nebo z důvodu ohrožení zdraví pracovníků, se používá nepřímá vizuální metoda. Jedná se například o tyto případy: vnitřky nádob, trubek, radioaktivně nebo chemicky zamořené prostory atd. Přesná definice nepřímé metody je taková, že optická dráha mezi okem a povrchem je přerušena. Kontrola se provádí pomocí různých optických zařízení přes vláknovou optiku až po zařízení s televizním přenosem obrazu. [1]

Tuhé endoskopy

Tuhé endoskopy neboli boroskopy jsou optické přístroje s objektivem na jednom konci a okulárem na druhém (viz Obr. 2). Mají trubkovitý tvar, ve kterém se nachází systém čoček a zrcadel. V trubici se také nachází vestavěný zdroj na osvětlení. Jejich úkolem je zvětšovat obraz předmětu a dohlédnout tam, kam oko pozorovatele nedohlédne. Klasické endoskopy se vyrábějí od průměru 3 mm a jejich délka může být až několik desítek metrů. U některých typů lze nástavce spojovat v různém sklonu, tudíž výsledný systém se může složit do různých potřebných tvarů. Pro kontrolování velmi úzkých otvorů existují miniboroskopy, jejichž vnější průměr může být i 0,9 mm. [3], [4]

Obr. 2 - Tuhý endoskop [5]

Ohebné endoskopy

Ohebné endoskopy, též nazývané fibroskopy (viz Obr. 3). V těchto přístrojích se pro pozorování i osvětlování užívají vláknové světlovody, tvořené svazkem jemných skleněných vláken. Světlovody lze díky oplášťovanému flexibilnímu pouzdru do určité míry ohýbat. To umožňuje i kontrolu míst nepřístupných pro tuhé endoskopy. Konec fibroskopu je opatřen výměnným objektivem, který lze dálkově ovládat a natáčet do požadovaného směru. Podle typu endoskopu a optiky je možné pozorovat vyšetřovanou oblast ve směru vzhledem k ose pod úhlem 0° nebo 90°. Maximální délka flexibilní části může dosahovat 3 m. [1], [3]

Obr. 3 - Ohebný endoskop [6]

Videoskopy

Tyto přístroje fungují podobně jako fibroskopy (viz Obr. 4). Jejich využití se upřednostňuje tam, kde je potřeba získat obraz ve vyšší kvalitě ať už z hlediska rozlišení, anebo z hlediska reálnosti barev. Pro přenos obrazu slouží miniaturní CCD čip umístěný na konci endoskopu. Videoskopy mají stejné výhody jako fibroskopy, tzn. možnost ohýbaní nástavce, ovládání na dálku a schopnost měnit parametry optiky. K největším výhodám patří velký dosah (až 30 m) a snadná manipulace. Kontrolovaná oblast se sleduje na barevném TV monitoru. Záznam je možné uložit. Jako příslušenství jsou při kontrolách používány různé háky, nůžky atd. [1], [7], [8]

Obr. 4 - Videoskop *[9]*

Podmínky pro vizuální kontroly

Aby mohla být vizuální kontrola řádně provedena, musí se splnit několik základních podmínek [1]:

a) Kvalifikace pracovníka – pracovník musí mít odpovídající znalosti o technologii výroby, konstrukci a v jakém provozu se zkoušená součást nachází. Dále o typech zjistitelných vad a místa, ve kterých se tyto necelistvosti nejčastěji vyskytují. Další neméně důležitou podmínkou je dobrá zraková schopnost pracovníka.

b) Úprava povrchů – ze zkoumaných míst musí být odstraněny veškeré nečistoty, které by zhoršovaly zjistitelnost vad, nebo jejich správné vyhodnocení.

c) Osvětlení – kontrolovaná část musí být osvětlena denním nebo bílým umělým světlem, světlo by mělo umožňovat řídit intenzitu i směr a clonění.

d) Provedení kontroly – systematická kontrola, aby byly odhaleny všechny vady, následné zařazení do kategorie, tj. vada přípustná, nepřípustná atd.

3.2 Magnetická metoda prášková (polévací)

S prvním pokusem se lze setkat už v roce 1868, kdy S. M. Saxby navrhl, aby se magneticky zkoumala ocel pro výrobu hlavní děl a pušek. Výsledky pokusů jeho a dalších badatelů bohužel upadly v zapomnění. Až v roce 1912 došla jeho myšlenka k uplatnění, kdy americký fyzik C. W. Burrows navrhl požadavek, aby vedle mechanických zkoušek bylo zavedeno také magnetické zkoušení materiálu. V roce 1917 se Američan William Hoke pokusil najít trhliny v sudech na střelný prach pomocí magnetických indikací. Skutečně průmyslové užití této metody se zavedlo v roce 1929. Svůj podíl na tom měli Viktor de Forest a Foster Doane, kteří vytvořili celosvětově známou společnost jménem Magnauflux, proslulou až do dnešních dnů. U zrodu magnetické metody práškové stál i Čech Ing. Karásek. [1], [10]

3.2.1 Princip

Pokud se předmět z feromagnetického materiálu zmagnetizuje, tak se v místě necelistvosti vytvoří rozptylové magnetické pole, které je schopné přitahovat částice magnetického detekčního prášku. Tím vznikne indikace vady. Přítomné výsledné indikace

se zjišťují vizuální prohlídkou. Touto metodou lze zjišťovat necelistvosti na povrchu, ale také vady, které jsou těsně pod povrchem zkoušeného předmětu. Bohužel vady vnitřní takto nelze zjišťovat. Magnetická prášková metoda se rozděluje na dva zkušební postupy – suchý a mokrý. [11]

Suchý způsob

Jedná se o způsob, kde se ke zviditelnění necelistvostí povrchu používá suchý magnetický prášek. Ten se nanáší na zkoušený předmět ručně, elektrostatickou pistolí nebo sprejem. Při hromadném zkoušení se používá speciální zařízení zvané vířivý hrnec. Prášek se používá buď barevný (černý, šedý, červený) nebo fluorescenční, který má větší průměr zrna. Zkouška probíhá následovně:

- odstranění hrubých nečistot, rzi, okují a tuků,
- pomocí měrky se určí potřebná intenzita magnetování a následné zmagnetizování,
- poprášení detekčním práškem,
- po skončení poprášení se opatrně sfoukne přebytečný prášek,
- vyhodnocení vytvořených indikací vad.

Základní vlastnosti magnetického prášku

Od dobrého prášku se vyžaduje snadná tvorba dobře viditelných a ostře ohraničených indikací vad materiálu. Na to mají vliv následující vlastnosti:

a) magnetické vlastnosti

Prášek musí být feromagnetický, o vysoké permeabilitě, magneticky stejnorodý. Měl by být vyroben z magneticky měkkého materiálu, aby po ukončení magnetizace nezůstal zmagnetizovaný.

b) optické vlastnosti

Důležitá je barva prášku, mělo by se jednat pouze o přirozené barvy. Umělým barvením se zhoršují magnetické vlastnosti. Jinou vlastností je fluorescence prášku. Intenzita fluorescence se vyjadřuje fluorescenčním koeficientem β. Prášek převážně fluoreskuje žlutozeleně, modrozeleně nebo oranžově.

c) velikost a tvar prášku

V praxi se pro určení velikosti používá střední průměr částic d_s (50 % částic prášku se rovná nebo je větší než uváděná hodnota):

- jemné prášky (d_s = 3 až 8 μm),
- střední prášky (d_s = 8 až 16 μm),
- hrubé prášky (d_s = 16 až 32 μm).

d) chemické složení

Nejčastěji se používá čisté železo, karbonylželezo nebo oxidy železa - červený Fe_2O_3 nebo černý Fe_3O_4.

Mokrý způsob

Jestliže se na zkoušený povrch nanáší magnetický prášek rozptýlený v nosné kapalině (lehký olej, směs petroleje a oleje, nebo vody), jedná se o mokrý způsob. Tímto způsobem se zkouší převážná část materiálů a výrobků. Prášek se nanáší ve formě suspenze, a to poléváním, nástřikem ze spreje nebo pistole, či ponořením. Nedoporučuje se nátěr štětcem. Používá se prášek jemnějšího zrnění než u suchého způsobu, takže je možnost zjištění i velmi jemných vad. Stejně jako u suchého způsobu se používá prášek barevný nebo fluorescenční. Zkouška probíhá obdobně jako u suchého způsobu.

Základní vlastnosti detekční suspenze

Vlastnosti detekčních suspenzí závisí na vlastnostech nosných kapalin, mezi něž patří oleje, petroleje nebo voda s přísadami.

a) Viskozita

Její hodnota značně ovlivňuje tvorbu indikace vad. Čím je nižší, tím rychleji jsou částice v prášku doprovázeny do míst s rozptylovými poli. Udává se jako hodnota dynamické viskozity (Pa.s).

b) Povrchové napětí

Důležitá hodnota u vodných suspenzí z důvodu vysokého povrchového napětí vody. Pro snížení tohoto napětí se používají různá smáčidla, která zlepšují smáčivost povrchu.

c) Hodnota pH

Hodnota důležitá pro vodné roztoky. Čím je hodnota pH vyšší, tím lépe je zkoušený povrch předmětu chráněn suspenzí proti korozi. Jelikož příliš zásadité vodné suspenze nepříznivě poškozují pokožku pracovníka, volí se hodnota pH v rozmezí 8 až 9,5.

d) Obsah prášku v suspenzi

Řídí se podle směrnic výrobce. Moderní prášky se dávají do suspenze v těchto poměrech:

- barevné prášky (5 až 10 $g.l^{-1}$ nosné kapaliny),
- fluorescenční prášky (0,5 až 2 $g.l^{-1}$ nosné kapaliny).

V žádném případě nesmí obsah prášku přesahovat 20 $g.l^{-1}$.

e) Fluorescence nosné kapaliny

Nosná kapalina suspenze fluorescenčního prášku nesmí snižovat fluorescenci prášku a nesmí sama fluoreskovat.

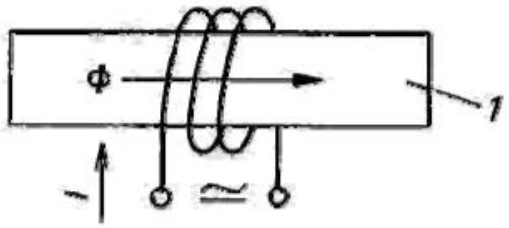
3.2.2 **Způsoby magnetování**

Zkoušený předmět je nutné zmagnetovat kolmo na směr zjišťované vady, aby se v místě vady vytvořilo rozptylové pole. K tomu slouží dva základní magnetovací způsoby – pólový a cirkulární [1], [4].

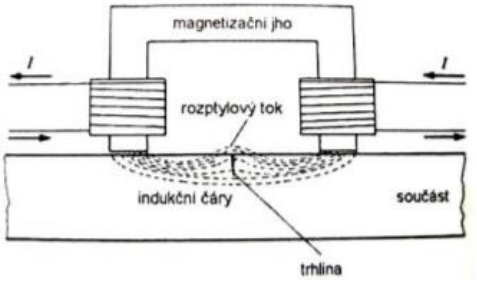
Pólové magnetování

Jedná se o způsob, při němž se na koncích nebo alespoň na části zkoušeného předmětu vytvářejí trvalé nebo dočasné magnetické póly. Vytvořené magnetické pole je většinou rozložené ve směru podélné osy předmětu, a proto se nazývá toto magnetování také podélné. Tento způsob zjišťuje především příčné vady (kolmé na osu předmětu). Pólové magnetování se rozděluje:

- cívkové magnetování (viz Obr. 5),
- magnetování jhem (viz Obr. 6).



Obr. 5 – Cívkové magnetování *[4]*

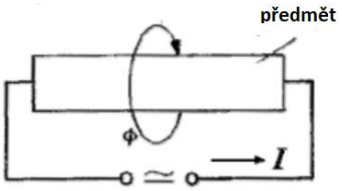


Obr. 6 – Magnetováním jhem *[1]*

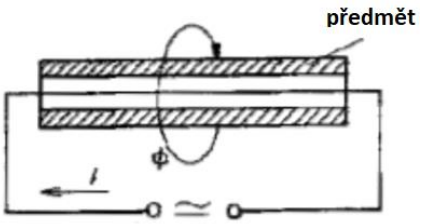
Cirkulární magnetování

Cirkulární magnetování je způsob, při kterém se využívá magnetických účinků elektrického pole. Na rozdíl od podélného magnetování nevznikají v předmětu jasné póly. Magnetická pole tvoří uzavřené dráhy, jejichž roviny jsou kolmé ke směru proudu. Z důvodu protékání proudu předmětem ve směru jeho podélné osy se vytvoří příčné magnetické pole, tímto se zjišťují podélné necelistvosti. Toto je důvod, proč se tento způsob nazývá příčné nebo také proudové magnetování. Cirkulární magnetovaní se dělí na:

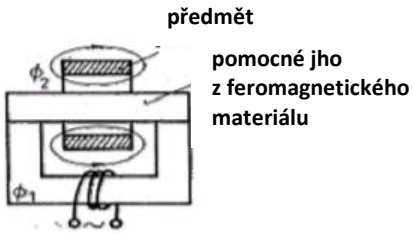
- magnetování průchodem proudu (viz Obr. 7),
- magnetování pomocným vodičem (viz Obr. 8),
- magnetování indukcí proudu v předmětu (viz Obr. 9).



Obr. 7 – Magnetování průchodem proudu *[4]*



Obr. 8 – Magnetování pomocným vodičem *[4]*



Obr. 9 – Magnetování indukcí proudu v předmětu *[4]*

Impulsní magnetování

Mezi další způsoby magnetování patří impulsní magnetování, které může být jak pólové, tak cirkulární.

Kombinované magnetování

V případě, že je předmět současně magnetován příčně a zároveň podélně, jedná se o magnetování kombinované. V jedné pracovní operaci lze tedy zjistit jak podélné, tak i příčné vady.

3.2.3 Druhy magnetizace

K buzení magnetického pole ve zkoušeném předmětu se využívá střídavý i stejnosměrný proud. Na typu proudu závisí mnoho faktorů, např. síla průniku magnetického pole do materiálu, nároky na odmagnetování tělesa. [1], [12]

1) Střídavý proud – frekvence 50 Hz. Výhodou je snadnost odmagnetování a nevýhody jsou nižší podpovrchová zjistitelnost vad a při delším magnetování dochází k ohřátí výrobku.
2) Stejnosměrný proud – málo používán. Výhodou je zjistitelnost podpovrchových necelistvostí a nevýhodou je obtížné odmagnetování.
3) Impulsní proud – kvůli krátkému trvání impulsu se předmět nezahřívá a kvůli tomu na elektrodách v místech dotyku nevznikají opaly.

Přístroje

1) Ruční magnety

Jedná se o jednoduchá zařízení na magnetovaní materiálu. Rozdělují se buď na permanentní magnety nebo na elektromagnety.

2) Přenosné proudové zdroje

Jde v principu o robustní transformátory, umožňující transformovat síťové napětí na hodnoty 4 až 10 V. Odebíraný proud na sekundárním vinutí bývá v řádu stovek až několik tisíc A.

3) Mobilní proudové zdroje

Je to výkonnější obdoba přenosných proudových zdrojů. Jejich magnetovací proudy jsou od 4 000 do 10 000 A. Jejich hmotnost se pohybuje od 100 do 700 kg.

4) Stacionární univerzální přístroje

Jsou označovány i jako horizontální defektoskopy. Jsou určené pro sériovou kontrolu a lze do nich upnout předměty od délky 350 do 4 000 mm. Rozsah proudů od 2 000 do 5000 A.

5) Automatizované stacionární přístroje

Jedná se o jednoúčelová zařízení pro hromadnou kontrolu stejných nebo tvarově málo odlišných součástí. Vyznačují se vysokým stupněm mechanizace a automatizace.

Odmagnetování

I po ukončení zkoušky magnetickou práškovou metodou zůstává ve zkoušeném předmětu remanentní (zbytková) indukce. Toto zbytkové zmagnetovaní je nežádoucí z celé řady důvodů [1]:

- přitahování drobných výrobků, feromagnetických nečistot, třísek a pilin, které můžou znečistit stroj a následně ho zničit,
- při elektrickém svařování nemusí dojít k dostatečnému provaření svaru,
- může nepříznivě ovlivnit přesnost měřících zařízení.

Odmagnetování lze provést několika způsoby [1]:

a) vnějším střídavým magnetickým polem s klesající amplitudou,
b) přepínáním polarity SS proudu, napájejícího demagnetizační cívku, jehož hodnota se postupně snižuje až na nulu,
c) magnetováním výrobku polem opačné polarity.

Hodnocení zkoušky

Vyhodnocení zahrnuje okamžitě po ukončení zkoušky vyhledání indikací a nanesení indikačního prostředku. Inspekce musí probíhat za pracovních podmínek předepsaných normou. Záznam indikací lze provést fotografováním, případně otiskem na plastickou pásku. Při vyhodnocování dochází také k objevení irelevantních indikací. Vznikají tam, kde se vytvoří magnetický rozptylový tok, který není nad necelistvostí. Jejich příčinou může být [1], [4]:

- náhlá změna magnetických vlastností,
- náhlá změna průřezu,
- změna struktury materiálu,
- nadměrná intenzita magnetizace součásti,
- zachycení nečistot na povrchu.

3.3 Metoda vířivých proudů

Tento fenomén objevil Francouz Dominique Arago během první poloviny 19. století. Leon Foucalt poté princip vysvětlil a pojmenoval. Metoda vířivých proudů má své počátky v objevu elektromagnetické indukce Michaelem Faradayem v roce 1831. Faradayovi, slavnému chemikovi, jsou přičítány objevy jako magneto-optický efekt, elektromagnetická rotace, daimagnetismus, a mnoha dalších. V roce 1879 vědec Hughes zaznamenal změny ve vlastnostech cívky, když ji umístil do kontaktu s kovy s různou permeabilitou a vodivostí. V roce 1948 začal Friedrich Förster vyvíjet vysoce citlivé přístroje měřící magnetické pole. Roku 1963 se zařízení pro měření magnetického pole od firmy Förster poprvé nainstalovalo na družici Mariner II a prozkoumalo magnetické pole Venuše. Jeho sonda je také umístěna na povrchu měsíce. [1], [7]

3.3.1 Princip

Působí-li na zkoušený předmět střídavé magnetické pole cívky, indikuje v něm střídavé napětí. Jelikož kovový předmět představuje uzavřený proudový vodič, vznikají v něm cirkulární proudy, nazývané vířivé. Tyto proudy působí svými magnetickými účinky zpětně na pole původní – budící. Vlivem vířivých proudů je budící pole zeslabováno, takže vzniká výsledné pole dané složením obou vektorových polí. Informace o stavu zkoušeného výrobku je dána amplitudou a fází výsledného pole. Vyhodnocení se děje prostřednictvím napětí, které je výsledným polem indukováno, a to [4], [13]:

- přímo v cívce, která budí magnetické pole,
- ve druhé měřící cívce.

Hustota a rozložení vířivých proudů závisí zejména na fyzikálních vlastnostech předmětu, tj. na elektrické vodivosti, permeabilitě, rozměrech a kmitočtu proudu v budící cívce.

V ideálním případě, kdyby se nechaly působit vířivé proudy na dva totožné objekty, by voltmetr ukázal u obou případů totožnou hodnotu napětí. Jestliže by však byla na druhém předmětu například trhlina, snímač v měřícím vinutí by ukázal jinou hodnotu. Tohoto efektu lze využívat například i v případě, kdy je potřeba zjistit, zda jsou určité součásti vyrobeny ze stejného materiálu.

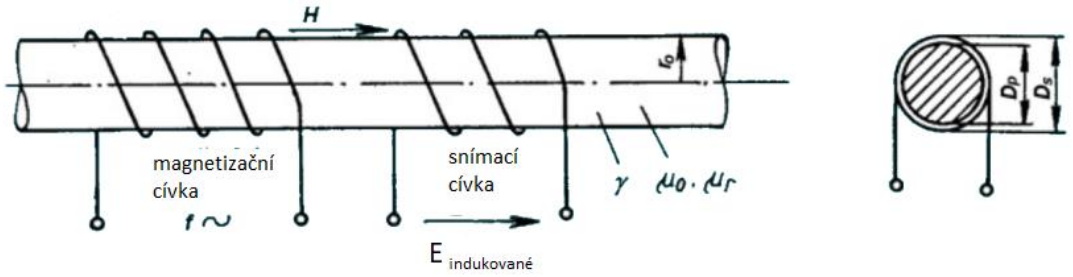
3.3.2 **Způsoby metody vířivých proudů**

V podstatě se využívají dva způsoby, a to [4]:

- způsob průchozí cívky,
- způsob přiložené cívky.

Způsob průchozí cívky

Tento systém má dvě vinutí, a to: budící a měřící (viz Obr. 10). Obě vinutí jsou navinuta na trubkovitém plastovém nosiči a jádro je tvořeno zkoušeným předmětem. Průměry cívky se volí tak, aby zkoušený předmět cívku co nejvíce vyplnil, což znamená, aby činitel zaplnění byl co největší.



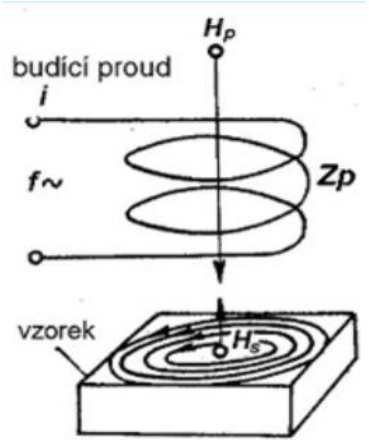
Obr. 10 – Způsob průchozí cívky *[4]*

V praktické aplikaci se u tohoto způsobu používají dva cívkové systémy s budicím a měřícím vinutím. Elektrické snímače pracují vždy v diferenciálním zapojení (napětí na měřicích vinutí působila proti sobě). Mechanicky mohou být snímače uspořádány:

1) odděleně – jedním snímačem prochází kontrolovaný výrobek a druhým etalonový výrobek,
2) společně – porovnávají se dvě sousední oblasti stejného výrobku, v případě rozdílných fyzikálních vlastností předmětu vzniká rozdílové napětí, podle amplitudy a fáze lze soudit druh a velikost vady.

Způsob přiložené cívky

Způsob se využívá především u rozměrnějších výrobků (viz Obr. 11). Přiložená cívka se napájí střídavým proudem a radiálně se přikládá k povrchu zkoušeného předmětu. Na vrstvách povrchu jsou indikovány vířivé proudy. Mg. pole těchto vířivých proudů zpětně ovlivňuje vlastnosti přiložené cívky. Tento efekt způsobuje změnu její impedance. Způsobem přiložené cívky lze zjišťovat vady nejen ve feromagnetických, ale i neferomagnetických kovech.



Obr. 11 – Způsob přiložené cívky *[4]*

3.4 Zkoušky ultrazvukem

Ultrazvuk je mechanické vlnění, jehož kmitočet je vyšší než rozsah slyšitelnosti lidského ucha. Jedná se o frekvenci vyšší než 20 kHz. Pro zkoušení se využívají frekvence v rozmezí 0,5 MHz až do 20 MHz. Čím je frekvence vlnění vyšší, tím menší vady je možné detekovat. [1], [11]

Ultrazvukem lze zjišťovat vady jak v kovovém, tak v nekovovém materiálu. Tímto zkoušením lze nejen rozpoznávat vady materiálu, ale uplatňuje se také například v měření tlouštěk, elastičnosti, pevnosti a v poslední době i vnitřního pnutí. Významnou výhodou je možnost zkoušení přímo za provozu. [1], [11]

3.4.1 Princip

Principem této zkoušky je pronikání ultrazvuku do materiálu, kde se na rozhraní dvou rozdílných prostředí odráží a rozptyluje. Odražené vlnění (echo) se indikuje a vyhodnocuje pomocí ultrazvukových defektoskopů, které jsou schopny informovat nejen o přítomnosti vady, ale také o její poloze a velikosti. Identifikovat lze jen takové vady, jejichž rozměry kolmé na směr šíření jsou větší než poloviční délka vlny. [11]

3.4.2 Metody používané při zkoušení ultrazvukem

Ke zjišťování vad ultrazvukem se používají tyto defektoskopické metody [4]:

- základní: rezonanční, průchodová, odrazová,
- ostatní: impedanční, akustické emise, zviditelnění vad.

Rezonanční metoda

Metoda spočívá v tom, že se frekvence UZ vln mění do okamžiku, kdy celistvý násobek jedné poloviny vlnové délky je roven tloušťce zkoušeného výrobku. V tomto okamžiku vzniká v materiálu stojatá vlna, kterou registruje přístroj. Metoda je vhodná pro kontrolu rovnoběžných ploch. Tloušťka stěn se může pohybovat od 0,1 mm do 100 mm.

Průchodová metoda

Principem je měření ultrazvukové energie, která projde zkoušeným povrchem. Hlavními zdroji jsou dvě sondy. První sonda vysílá vlny do materiálu (vysílací sonda), druhá sonda tyto vlny přijímá (přijímací sonda). Nachází-li se v materiálu vada, začne se šířící vlna odrážet a za vadou vzniká stín, který snižuje energii přicházející do přijímače. Vada se vyhodnocuje jako rozdíl energií mezi neporušeným a vadným materiálem. Touto metodou nelze zjistit hloubku ani velikost vady.

Odrazová metoda

Metodu lze provádět na rozdíl od průchodové metody jen z jedné strany, ovšem musí se počítat s dvojnásobnou délkou dráhy. UZ svazek se vysílá spojitě nebo impulsově. Při použití spojitého svazku je metoda podobná metodě průchodové s tím rozdílem, že sonda vlny vysílá a zároveň odražené přijímá. U impulsové metody se vysílají krátké ultrazvukové impulsy. Tato metoda poskytuje nejvíce informací o zkoušeném materiálu, a proto se v defektoskopii nejvíce používá.

Impedanční metoda

Je založena na změně velikosti impedance v místě vady. Používá se především pro zjišťování vad o malých tloušťkách.

Metoda akustické emise

Jedná se o registraci ultrazvukových vln, které vznikají uvolněním energie při přechodu z elastické do plastické deformace. Používá se při ověření pevnostních vlastností materiálu.

Metoda zviditelnění vad

U této metody se vysílá ultrazvukové vlnění spojitě. Princip metody je závislý na průchodu UZ materiálem a ultrazvukovou optikou. Výhodou této metody na rozdíl

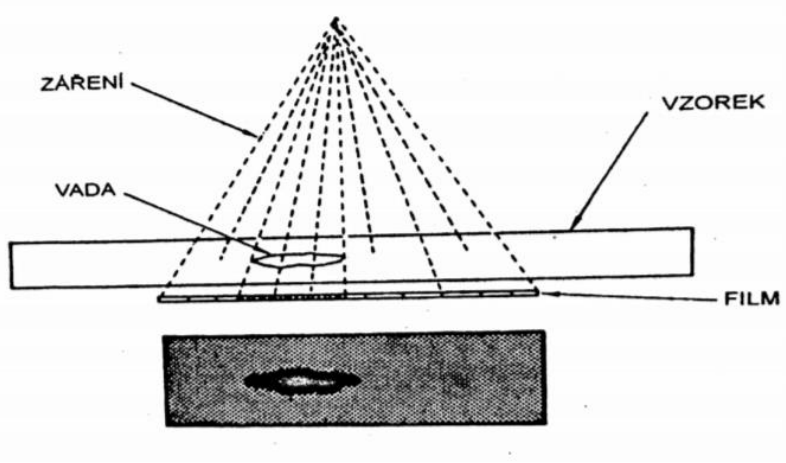
od ostatních je, že umožňuje zjistit nejen přítomnost vady, ale poznat i její tvar, druh a polohu.

3.5 Zkoušky radiologické

Též se někdy označuje jako metoda prozařovací (RT). Hlavním principem této metody je zeslabování procházejícího ionizujícího záření při průchodu testovaným materiálem (viz Obr. 12). Zeslabení je závislé převážně na tloušťce materiálu. Pokud se v materiálu nachází defekt s vhodnou orientací vůči směru záření, je záření v tomto místě méně zeslabeno (může být i více – záleží na materiálu). Výsledek vychází z rozdílu proniklého záření skrz zkoušený předmět. Metoda se převážně využívá ke kontrole svarů a odlitků. [14]

V průmyslu se obecně v RT používá několik druhů záření. První je rentgenové záření (záření X), jehož vlnové délky se pohybují v intervalu od 10^{-14} do 10^{-9} m. Další je gama záření o vlnových délkách 5.10^{-13} do 10^{-10} m. Dále je možno zmínit tok elektronů, neutronů nebo protonů. [1]

V podstatě existují dva způsoby záznamu obrazu pro nedestruktivní zkoušení metodou prozařovací. Prvním je radiografie, ve které se prošlé záření zachytává na film nebo paměťovou fólii. Druhým je radioskopie, jedná se o kontrolu v tzv. reálném čase. Výsledné rtg. záření je převáděno na viditelné světlo, za použití zesilovače obrazu nebo polovodičového detektoru. Metoda používá dva zdroje záření, a to rentgenku nebo radionuklidy. [10], [12]



Obr. 12 – Princip prozařování *[1]*

Rentgenka

Rozumí se tím technické zařízení, jehož prostřednictvím se získává rentgenové záření o požadované energii. V podstatě se jedná o elektronku s katodou se žhaveným drátem a anodou z těžkého kovu tvořící terčík. [4]

Radionuklidy

Prvky, jejichž atomové jádro je nestabilní a samovolně se rozpadá, se nazývají radionuklidy. Rozpadnutím jádra se uvolňuje záření (známé jako záření gama), které má stejnou povahu jako záření X. I když existují radionuklidy v přírodním stavu, na zkoušení se obvykle využívají uměle vyrobené. [4]

4 Kapilární (penetrační) zkouška

Už v Rakousku-Uhersku za císaře Franze Josefa I. se začala používat kontrolní metoda nazývaná petrolejová zkouška. Bohužel není známo, kdo prvně použil metodu, tzv. „petrolej a bělení“ pro zjišťování trhlin v železničních součástech. Metoda byla čím dál tím více nahrazována magnetickou metodou práškovou. Kvůli rychle rostoucímu leteckému průmyslu se těsně před a během druhé světové války začaly stále častěji používat nemagnetické lehké kovy, které nemohly být zkoušeny magnetickou metodou práškovou. V této době vzniklo nezávisle na sobě několik firem, jež začaly produkovat barevné a fluorescenční detekční tekutiny. [1], [12]

4.1 Princip

Kapilární metody (dále jen „PT“) jsou založeny na využití charakteristických vlastností kapalin, tzv. kapilárních jevů. Mezi nejdůležitější patří: povrchové napětí, viskozita, krajový úhel, kapilární elevace a kapilární tlak. Princip této metody spočívá ve využití vzlínavosti a smáčivosti penetrantů a jejich barevnosti nebo fluorescence. Zkoušený povrch se jimi pokrývá. Následně penetranty vnikají do vad. Po odstranění přebytku penetrantu vzlíná zbytek na povrch, kde za pomoci vývojky vytvoří barevnou nebo fluorescenční indikaci vady. Ta se následně hodnotí vizuálně. [15], [16]

PT lze zkoušet jak kovové, tak i nekovové materiály (sklo, plasty, glazovanou keramiku). Pórovité materiály a materiály, které narušují kapilární prostředky, nelze zkoušet. Bohužel metoda je velmi citlivá na pečlivost provedení jednotlivých pracovních fází zkušebního postupu. Proto např. při nedostatečném očistění a odmaštění povrchu nebo při nedodržení potřebného času může zkouška poskytnout nesprávné informace o kvalitě zkoušeného povrchu. [1], [12], [17]

4.2 Základy teorie kapilárních metod

Pod souborným názvem kapilární vlastnosti kapalin jsou zahrnuty následující fyzikální jevy.

Viskozita

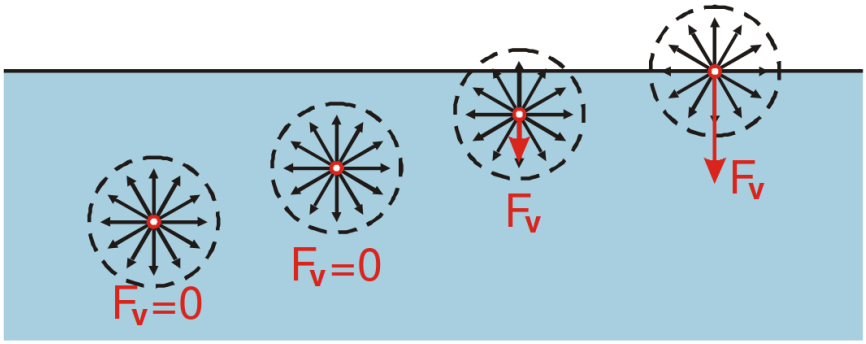
V kapilárních metodách se využívá především kinematická viskozita (podíl dynamické viskozity a hustoty kapaliny). Jednotkou je $m^2.s^{-1}$, dříve se používala jednotka

1 stok. Viskozita má vliv na použitelnost penetračních prostředků. Ovlivňuje zejména rychlost, s níž penetrant vniká a opět vystupuje z necelistvostí. Penetrant s vysokou viskozitou vniká do vad pomalu. [3], [4]

Povrchové napětí

Na molekulu uvnitř kapaliny působí přitažlivé síly všech okolních molekul. Tyto síly jsou ve všech směrech stejné, takže výslednice těchto sil uvnitř kapaliny je rovna nule. Jinak je tomu na povrchu kapaliny. U molekul, které jsou na povrchu, nejsou dané síly kompenzovány ze strany plynné fáze, a proto jsou molekuly vtahovány určitou silou dovnitř kapaliny. Vlivem těchto sil se kapalina chová tak, aby počet povrchových molekul byl co nejmenší, tzn. zaujme kulový tvar, nebo se snaží tento tvar nabýt (viz Obr. 13). Důvodem je, že daný objem kapaliny má nejmenší možný povrch.

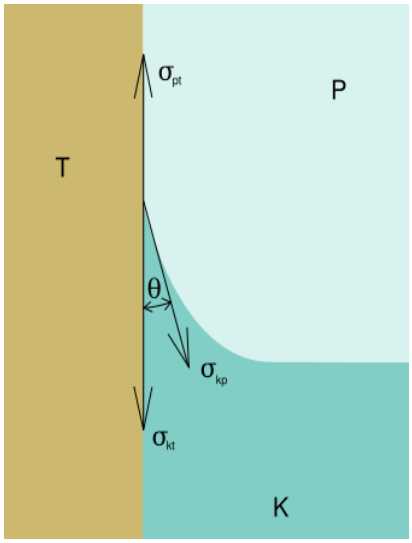
Síly, které se snaží bránit zvětšování povrchu, se nazývají povrchové napětí. To je definováno jako „síla působící kolmo k jednotce délky v povrchu kapaliny“. Povrchové napětí je stejně velké ve všech směrech a ve všech místech povrchu. Jednotka povrchového napětí podle SI soustavy je $N.m^{-1}$. Vliv tohoto napětí je především na smáčivost povrchu detekční kapaliny. [1]



Obr. 13 – Povrchové napětí *[18]*

Krajový úhel

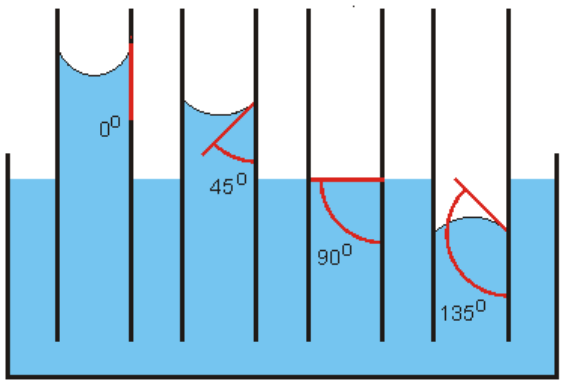
Pozoruje-li se stykové místo povrchu kapaliny se stěnou nádoby, lze zjistit různě velké zdvižení nebo snížení okraje. Stýkají se zde tři prostředí: kapalina, vzduch nebo jiný plyn a pevné těleso (viz Obr. 14). Úhel, který svírá povrch kapaliny se stěnou pevného tělesa, se nazývá krajový úhel (úhel kontaktu). Jeho velikost závisí na rozdílu povrchového napětí stěny vzhledem ke vzduchu a vzhledem ke kapalině. Tomuto rozdílu se též říká adhezní konstanta. Je-li adhezní konstanta kladná, okrajový úhel je ostrý a kapalina stěnu smáčí. Je-li konstanta záporná, kapalina stěnu nesmáčí. U detekčních kapalin je úhel vždy malý. [1]



Obr. 14 – Krajový úhel *[19]*

Kapilární elevace

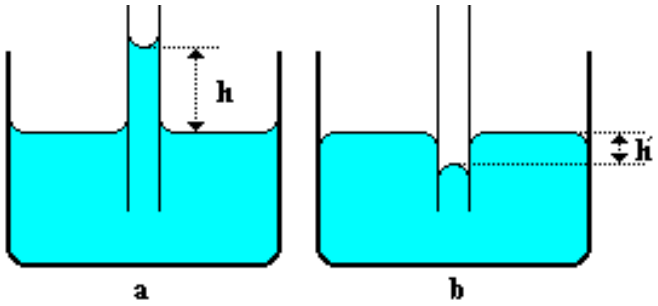
Ponoří-li se kapilára (tenká skleněná trubice) do smáčivé kapaliny kolmo k jejímu povrchu, pak v důsledku přilnavých (adhezních) sil stoupají molekuly kapaliny vzhůru po stěnách trubice. Kapalina je vtahována vlivem povrchového napětí v trubici do určité výšky, kde vytváří zakřivený, konkávní povrch. Tento stav se nazývá kapilární elevace (viz Obr. 15). Jelikož se hledaná vada chová jako kapilára, je kapilární elevace důležitá pro detekci. [1]



Obr. 15 – Kapilární elevace *[20]*

Kapilární tlak

V kapalině směrem od povrchu dovnitř vzrůstá vlivem kohezních (soudržných) sil tlak. Tento vzrůst tlaku se označuje jako kohezní tlak. Při zakřiveném povrchu, který vzniká v kapiláře, lze pozorovat změnu tlaku. Tento tlak, kterým povrchová vrstva působí na ostatní kapalinu, se přičítá k tlaku koheznímu. Zmiňovaný přídavný tlak se nazývá kapilární tlak (viz Obr. 16). [1]



Obr. 16 – Kapilární tlak *[21]*

4.3 Rozdělení kapilárních metod

Kapilární metody se rozlišují podle způsobu označení a hodnocení vad. [1], [4]

Metoda barevné indikace

Necelistvost povrchu se označuje barvou (většinou červenou), která co nejvíce kontrastuje se svým okolím (často bílým). Následné hodnocení probíhá při denním nebo umělém světle.

Metoda fluorescenční

Vada se indikuje tak, že při ozáření UV světlem nejčastěji zeleně fluoreskuje, a tím kontrastuje s okolím, které je tmavé. Hodnocení se provádí v tzv. černém světle.

Metoda dvojúčelová

Hlavní složkou je luminofor, který je zároveň barvivem, tudíž penetrant může být použit jako barevný, nebo jako fluorescenční. Záleží na tom, jaký druh osvětlení se zvolí (bílé nebo UV světlo).

4.4 Rozdělení kapilárních prostředků

Nazývají se tak činidla, která jsou potřebná k provedení penetrační zkoušky (viz Obr. 17). Mezi tato činidla patří [1], [3]:

- odmašťovače,
- rozpouštědla - čističe,
- penetranty,
- vývojky,
- emulgátory.

Všechny tyto prostředky dohromady tvoří kapilární soubor (set), který by měl být vždy od jednoho výrobce.

Obr. 17 – Kapilární prostředky *[22]*

Odmašťovače

Odmašťovač je organické (benzin, aceton aj.) nebo neorganické (louh sodný nebo draselný ve vhodném zředění) činidlo, jehož úkolem je před nanesením detekční kapaliny odstranit ze zkoušeného povrchu tuk nebo olej.

Rozpouštědla - čističe

Čistič je kapalina sloužící k odstranění penetrantu z povrchu zkoušeného předmětu nebo k odstranění nežádoucího pozadí. Základem je organické rozpouštědlo, často kombinované s emulgátorem, popř. dalšími látkami.

Penetranty (detekční kapaliny) [1], [23], [24]

Penetranty se skládají ze směsí kapalných ropných produktů a organických rozpouštědel. Jsou to kapaliny, které se nanáší na povrch zkoušeného materiálu, vnikají do povrchových vad, kde i po odstranění přebytku penetrantu setrvávají. Následným vzlínáním na povrch jsou necelistvosti zviditelňovány.

Penetranty se dělí podle různých hledisek:

1. typu označení indikace:
   a. penetranty barevné – výrazný barevný kontrast s bílou vývojkou,
   b. penetranty fluorescenční – světélkují při ozáření ultrafialovými paprsky,
   c. penetranty dvojúčelové – obsahují luminofor.

2. smytelnosti penetrantu vodou:
    a. penetranty nesmytelné – vodou se nedokonale odstraní,
    b. penetranty smytelné – obsahují vhodný emulgátor.
3. obsahu emulgátoru v penetrantu:
    a. penetranty emulgační - obsahují emulgátor, který spolu s penetrantem proniká do necelistvostí,
    b. penetranty postemulgační (následně emulgované) - emulgátor se nanáší na přebytek penetrantu až po uplynutí penetračního času, takže do vady proniká pouze penetrant, ve kterém není emulgátor.

Důležité vlastnosti penetrantu:

1. penetrační schopnost – vlastnost kapaliny rychle pronikat do necelistvostí a udržet se v nich. Závisí na řadě dalších činitelů a to:
    - nosném médiu,
    - viskozitě penetrantu,
    - smáčivosti,
2. těkavost – měla by být co nejmenší,
3. bod vzplanutí – požadavek je, aby bod vzplanutí byl vyšší než 50 °C,
4. chemická netečnost – penetranty musí být netečné a nekorozivní ke zkoušenému materiálu i k nádobám, v nichž jsou přechovávány,
5. rozpouštěcí schopnost nosného média – nosné kapaliny penetrantů musí být dobrými rozpouštědly barviva nebo luminoforu,
6. toxicita a zápach – musí být nejedovaté a nejlépe bez zápachu, neměly by škodit lidskému organizmu.

Vývojky

Kapilární vývojka je činidlo, které se po odstranění přebytku penetrantu nanáší na zkoušený povrch předmětu, kde napomáhá vzlínání penetrantu z vad a společně s ním indikuje necelistvost. Základem všech druhů vývojek je práškovitá složka bílé barvy,

jemného zrnění, která nesmí být hygroskopická. Druhou složkou je nosné prostředí (vzduch, voda, aceton, líh, benzin aj.).

Hlavním úkolem vývojky je vytvořit a zvýraznit indikaci vady, aby byla co nejvíce viditelná. Dalším úkolem, především u barevné metody, je zamaskovat okolí povrchu necelistvosti, nejčastěji bílým zbarvením.

Vývojky se podle druhu nosného prostředí rozdělují do tří skupin:

a. suché vývojky – nosným prostředím je vzduch nebo jiný vhodný hnací plyn. Vývojky se na zkoušený povrch naprašují.

b. mokré vývojky těkavé – práškovitá složka vývojky je rozptýlena v těkavém rozpouštědle, např. v acetonu Nejčastěji se na povrch nanáší stříkacími pistolemi, spreji apod.

c. mokré vývojky vodné – práškovitá složka vývojky je rozmíchaná ve vodě, která navíc obsahuje smáčedlo, příp. retardační přísady. Vývojky se většinou předehřívají na 65 °C a nanášejí se ponořením do vývojkové lázně. Díky tomu odpadá sušení povrchu po oplachu vodou při odstraňování přebytku penetrantu.

Požadované vlastnosti vývojek:

1) výborná sorpční schopnost - napomáhá vzlínání penetrantu z necelistvostí,
2) jemná zrnitost, aby indikace vad byly ostře ohraničené a výrazné,
3) musí co nejvíce maskovat barvu pozadí, tj. barvu povrchu materiálu,
4) musí se snadno nanášet a vytvářet jemný povlak,
5) musí se snadno smáčet detekční kapalinou,
6) musí být snadno odstranitelná z povrchu součásti,
7) nesmí poškozovat zkoušený materiál,
8) nesmí škodit lidskému zdraví.

Emulgátory

Jsou to povrchově účinné látky, usnadňující rozptýlení pevných nebo kapalných látek v kapalině (obvykle ve vodě), ve které se normálně nerozpouštějí. V kapilárních zkouškách emulgátory usnadňují odstranění přebytku penetrantu z povrchu zkoušeného materiálu.

Základní druhy:

a. emulgátory lipofilní – rozptýlené v tucích, nejsou rozpustné ve vodě. V přítomnosti vody však vytvářejí emulzi s detekční kapalinou. V odpadních vodách nejsou biologicky odbouratelné.

b. emulgátory hydrofilní – v detekční tekutině se nerozpouštějí, rozpouštějí se však ve vodě a v přítomnosti penetrantu vytvářejí s vodou emulzi. Jsou biologicky odbouratelné.

Požadavky na emulgátory:

- musí snadno reagovat s detekční kapalinou na zkoušeném povrchu,
- musí být vhodné i pro použití ve velkých otevřených nádržích, proto musí mít vyšší bod vzplanutí, nízkou těkavost, nepatrný zápach a být nejedovaté.

Měrky

Zjistitelnost vad kapilárními metodami je ovlivňována celou řadou různých činitelů. K jednoznačnému určení vhodnosti detekčního prostředku nestačí pouze fyzikální údaj. Proto je nutno používat pomůcky, které umožňují hodnotit technologické vlastnosti detekčních prostředků srovnáním se známými prostředky sloužícími jako etalon. Srovnávací metodou lze pak nepřímo usuzovat na zjistitelnost necelistvostí daným způsobem zkoušení. Tyto pomůcky, používané ke srovnání, se nazývají kapilární měrky. [1]

Měrky s umělou necelistvostí

U těchto měrek jsou rozměry vad známé, přesně definované a zaručují dobrou reprodukovatelnost zkoušky. Nevýhodou těchto měrek je, že umělá necelistvost se od přirozených vad značně liší, proto získané výsledky lze na skutečné vady vztahovat jen přibližně. Mezi tyto měrky patří:

- americká zkušební měrka (US Navy Test Block),
- měrka IIW,
- měrka WÖEST,
- kuželová měrka.

Měrky s přirozenou necelistvostí

Základem je přirozená necelistvost, u které se sice neznají přesně rozměry, ale detekční prostředky se při detekci chovají obdobně jako u skutečných vad. Nevýhodou těchto měrek je jejich krátkodobá použitelnost z důvodu zaplnění přirozené necelistvosti zkoušenými detekčními prostředky. I při dobrém čistění lze tyto měrky použít maximálně asi 30krát. Typy měrek:

- hliníková měrka,
- ohybová měrka,
- chromová měrka.

Metoda bez měrek

Vzhledem k nevýhodám výše zmíněných měrek se posuzuje kvalita penetračních prostředků a citlivost metody bez měrek. Vždy se jedná o postupy srovnávací, kde se kvalita známých prostředků hodnotí vzhledem ke kvalitě zkoumaných. Srovnáváním se většinou posuzuje jen jedna vlastnost (např. smáčivost, fluorescence atd.) a z ní se usuzuje na kvalitu celkovou. Mezi tyto způsoby se řadí:

- meniskový způsob,
- křivky roztékavosti.

Základní podmínky

Aby zkouška proběhla bez problémů a bez rizik, je nutné dodržet několik podmínek.

Důležité je dodržení penetračního času neboli doby, po kterou musí být penetrant v přímém kontaktu se zkoušeným povrchem materiálu. Délka je závislá na druhu detekční kapaliny, teplotě zkoušení, kvalitě povrchu, charakteru zjišťovaných vad a požadované citlivosti zkoušky. V běžné praxi se délka pohybuje mezi 5 až 20 minutami. [4]

Dalším důležitým předpokladem je správná teplota. Ta by se měla pohybovat v rozmezí od +5 do +50 °C, tedy pokud výrobce neuvádí jinak. Dále se nesmí zapomínat na dostatečné osvětlení, které by mělo být u barevné metody minimálně 500 luxů. Nesmí se opomenout ani lidský faktor, např. fyzická únava očí a s ní spojený nepříznivý vliv na průkaznost zkoušky. Pracovník by neměl prohlídku provádět déle než 4 hodiny za směnu. Přitom je nutné, aby vždy po 2 hodinách měl přestávku (30 minut). [4]

4.5 Průběh zkoušky

Průběh zkoušky materiálu lze obecně popsat těmito pěti pracovními fázemi [4], [12]:

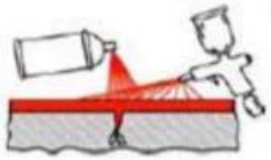
Příprava povrchu zkoušeného materiálu

Účelem je odstranit veškeré tuhé i kapalné nečistoty, a to nejen z povrchu, ale i z necelistvostí (viz Obr. 18). Mechanické odstraňování ve většině případů nestačí, proto se upřednostňuje chemický způsob. Rovněž se využívá očistění pomocí ultrazvuku. Po očistění je nezbytné důkladné osušení.

Obr. 18 – Čištění *[25]*

Nanesení detekční kapaliny

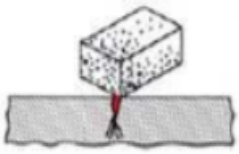
Povrch materiálu se pokryje rovnoměrnou vrstvou penetrantu a nechá se působit 5 až 20 minut (mimořádné případy až 24 hodin), aby pronikl do necelistvostí (viz Obr. 19). Malé předměty se do kapaliny přímo ponoří. U větších předmětů se kapalina nanáší na povrch nátěrem nebo nástřikem.



Obr. 19 – Nanesení penetrantu *[25]*

Odstranění přebytků detekční kapaliny z povrchu předmětu

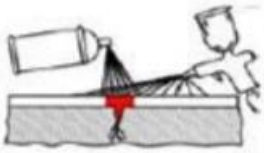
Po uplynutí penetračního, popř. i emulgačního času, se musí povrchová vrstva penetrantu odstranit (viz Obr. 20). Důvodem je, aby detekční kapalina uzavřená ve vadách mohla vzlínat na čistý povrch a tím vytvořit výraznou kapilární indikaci. Nežádoucí je ovšem nadměrné očištění, které může vymýt detekční kapalinu z necelistvostí.



Obr. 20 – Odstranění přebytečného penetrantu *[25]*

Nanesení vývojky

Na povrch očištěný od zbytku penetrantu se nanese vývojka (viz Obr. 21). Následně dojde ke vzlínání penetrantu z vad směrem k povrchu a barevné indikaci ve vývojce.



Obr. 21 – Nanesení vývojky *[25]*

Vyhodnocení kapilárních indikací

Provádí se obvykle dvakrát. Prohlídka se provádí pouhým okem nebo lupou zvětšující 2krát až 6krát. Poprvé bezprostředně po nanesení vývojky, kdy se vytvoří indikace větších vad. Podruhé po uplynutí doby cca 10 minut, kdy se zaručeně projeví jemné necelistvosti.

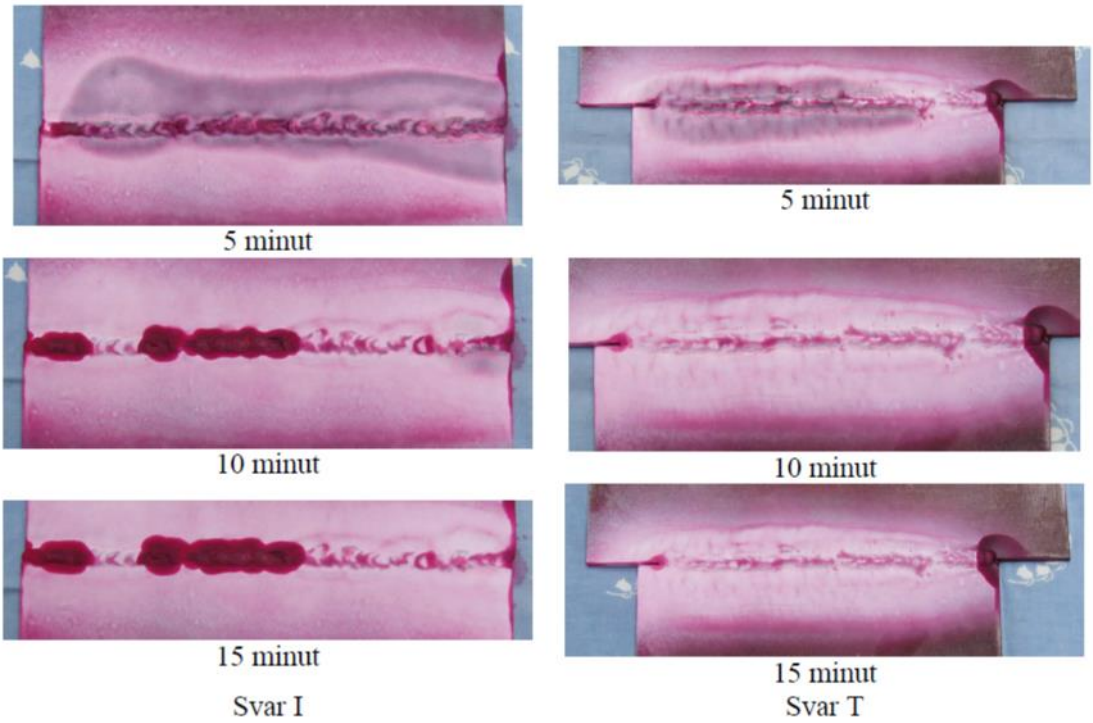
Kapilární zařízení

Při zkoušení menšího počtu výrobků se obvykle používá ruční způsob. Pro hromadnou kontrolu se už musí používat speciální zkušební zařízení, nazývané kapilární linka. Toto zařízení je tvořeno řadou několika nádrží pro jednotlivé kapilární prostředky a pracovním stolem pro hodnocení výsledků zkoušky, případně zatemňovací kabinkou. Předměty se můžou nořit do kapilárních lázní jednotlivě nebo naskládány v drátěných koších. Kapilární linky převážně využívají fluorescenčního postupu a pracují vždy buď emulgačním nebo postemulgačním způsobem s mokrou nebo suchou vývojkou. [1]

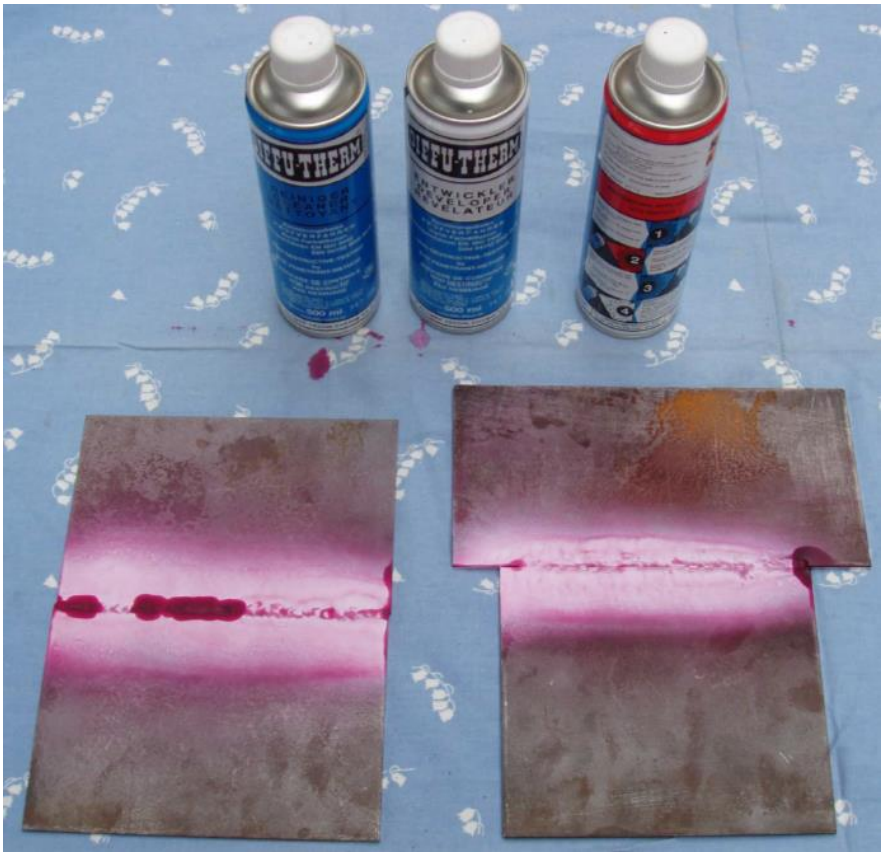
Zkouška kapilární metodou

Při zkoušení bylo využito dvou vzorků. První vzorek byl svařenec ve tvaru „I“ a druhý svařenec ve tvaru „T“. Byla zvolena metoda barevné indikace za pomoci červeného penetrantu a světlé vývojky. Povrchy vzorků byly řádně očištěny, aby zbytky nečistot nedaly vzniknout falešným indikacím. Následovalo nanesení penetrantu pomocí spreje, který se nechal 10 minut působit. Po uplynutí doby se penetrant odstranil z povrchu zkoušených předmětů. Poté se aplikovala vývojka též ve spreji. Každých 5 minut se rozvíjející se indikace dokumentovala (viz Obr. 22). [26]

Z výsledků lze konstatovat, že ve svaru u vzorku ve tvaru písmene I byly indikovány necelistvosti, které by měly tento předmět vyřadit z dalšího používání. Naopak u vzorku ve tvaru písmene T nebyly zaznamenány žádné vady, kromě indikací v mezerách, které se nacházely v rozích dvou k sobě přiložených plechů. Tyto indikace byly způsobeny nedostatečným odstraněním penetrantu v těchto spárách. Vzorek zkoušený kapilární metodou lze posoudit za vyhovující. Vzorky a použité kapilární prostředky lze vidět na Obr. 23.



Obr. 22 – Výsledek kapilární zkoušky *[26]*



Obr. 23 – Kapilární prostředky a vzorky *[26]*

5 Porovnání kapilární metody s ostatními

Níže budou zmíněny výhody a nevýhody kapilární metody vůči ostatním zkouškám. Bude se vycházet z poznatků získaných z rešerše ve výše uvedeném textu.

5.1 Porovnání s vizuálními metodami

Nejdříve zde budou shrnuty výhody vizuální zkoušky před kapilárními metodami. Mezi jedny z největších a zjevných výhod patří nenáročnost a jednoduchost vizuální zkoušky. K provedení této zkoušky není potřeba žádných přístrojů ani prostředků, čímž se logicky snižují i finanční náklady na provedení. Pouze v případech, kdy je potřeba zkoumat vady okem nepozorovatelné, se musí pořídit zvětšovací přístroj, např. lupa, mikroskop. Mezi další výhody patří možnost zjišťování necelistvostí v dutinách zkoumaného předmětu, kde nelze aplikovat penetrační prostředky nutné k vykonání kapilární zkoušky. Dále lze zmínit minimální vybavenost pracovního prostředí, ve kterém je nutno dodržet pouze podmínky dobrého osvětlení. Též nelze opomenout snadnější postup pro uskutečnění zkoušky. Jediný shodný krok v porovnání s kapilární zkouškou je nutné očistění zkoušeného předmětu, následné kroky (tedy nanesení detekční kapaliny, její odstranění a nanesení vývojky) odpadají. Složitější postup u kapilární metody přináší vyšší riziko způsobení chyby, a to ve smyslu jak neodhalení vyskytující se chyby v materiálu, tak i vytvoření nepravé indikace.

Nyní budou zmíněny výhody kapilárních metod. Mezi ně patří hlavně barevná indikace necelistvostí, které jsou mnohem snadněji viditelné než u metody vizuální, dále možnost hromadné kontroly výrobků pomocí kapilární linky, čímž se postup o hodně zrychlí.

5.2 Porovnání s práškovou metodou

Nejzásadnější výhoda kapilární metody, která vyplývá z principu zkoušení, je taková, že penetrační metodou lze zkoušet více druhů materiálu. Není omezena pouze na feromagnetické materiály. U kapilárního způsobu je snadnější indikace vad, protože u magnetické metody se používají barvy, které nejsou od barvy povrchu zkoušeného výrobku příliš odlišné. Výhodou kapilární metody je také to, že nedochází k ovlivnění fyzikálních vlastností zkoušeného materiálu, jako je například zmagnetizování předmětu.

Tato metoda není ani ovlivněna orientací vady, kdy se u práškové metody musí zkoumat jak podélně, tak příčně, aby byly všechny vady zachyceny.

Nyní výhody práškové metody. Hlavním kladem je možnost zjišťování vad nejen na povrchu výrobku, ale také i lehce pod povrchem. Další výhodou na rozdíl od kapilární metody, kde penetrační prostředky jsou již po jednom použití znehodnoceny (tedy znovu nepoužitelné), u mg. metody je možné indikační prostředek opakovaně využít.

5.3 Porovnání s metodou vířivých proudů

Je dobré znovu zmínit materiál zkoušeného předmětu. I když tentokrát lze zkoušet metodou vířivých proudů jak feromagnetické, tak neferomagnetické kovy, přesto kapilární metoda má značně větší použitelnost. Kapilární metoda není závislá na rozměrech součásti.

Nyní výhody vířivých proudů. Jedná se o jednu z mála metod, která umožňuje měření při vysokých teplotách (kontrola za tepla válcovaných materiálů). Další výhodou je, že před kontrolou není třeba speciálně upravovat povrch. Jde o bezkontaktní metodu, tudíž odpadá možnost poničení zkoušeného výrobku např. nesprávným provedením zkoušky. Touto metodou lze zkoumat nejen necelistvosti, ale je možné ji využít i jinak. Mimo jiné se dá kontrolovat tloušťka laku, mechanické napětí atd.

5.4 Porovnání s metodou ultrazvukem

Největším rozdílem těchto dvou metod je jejich pole využití. Ultrazvukem lze zjišťovat pouze vady vnitřní, a naopak kapilární metodou pouze vady povrchové. Ultrazvuk má navíc mnohem širší využití, nemusí se jednat pouze o zjišťování vad. Může též měřit tloušťku, vlastnosti materiálu apod.

Bylo by dobré začít tím, že ultrazvukovou metodou lze zkoušet předměty přímo za provozních podmínek. Součást není potřeba demontovat ze stroje, aby se na zkoušený výrobek mohly použít všechny potřebné prostředky. Kladem je i doba, za kterou je schopna metoda indikovat vady. Čas závisí především na správném připevnění sond/y.

Nevýhodou metody je, že ne všechny vady mohou být indikovány, přestože se ve zkoušené součásti vyskytují. Jde především o vady kolmé na povrch, na který je sonda připevněna.

5.5 Porovnání s prozařovací metodou

Stejně jako u ultrazvuku je rozdíl v použitelnosti těchto zkoušek. Prozařovací metodou se na rozdíl od kapilární metody zjišťují jen vady podpovrchové.

Silných stránek se oproti penetrační zkoušce moc nevyskytuje. Hlavní výhodou prozařovací metody je též rychlost indikace vady.

Výhod na straně kapilární metody je mnohem více. Nejzásadnější je bezpečnost zkoušky, kdy u prozařovací metody hrozí ozáření ionizujícím zářením, které je lidskému tělu nebezpečné. Obdobně jako u UZ, prozařovací metoda nezjistí všechny chyby. Jedná se o vady tenké a rovnoběžné s povrchem zkoušeného povrchu. Výhodou je i mobilnost zkušebního zařízení. Vybavení rentgenové metody bývá nepřenosné.

6 Závěr

Cílem nedestruktivního zkoušení je odhalit vady v materiálu, které by mohly vést k poškození součástky nebo celého stroje. Je velmi důležité určit typ tohoto defektu a popsat jeho velikost, tvar a polohu. Díky nasbíraným informacím lze následně vyhodnotit, zda je potřeba předmět upravit, anebo ho úplně vyřadit z provozu. V současné době výsledky používaných metod defektoskopie postačují k získání údajů, které vedou k vyhodnocení vad. Jelikož jsou měření někdy složitá, časově náročná a nákladná, je snaha jednotlivé metody stále vyvíjet a zdokonalovat.

Snahou této bakalářské práce je seznámení s nedestruktivním zkoušením materiálu. Jsou zde popsány základní principy jednotlivých metod NDT. Hlavní důraz v bakalářské práci je kladen na kapilární metody, u kterých jsou zmíněny i důležité fyzikální jevy, bez kterých by zkouška nemohla být provedena. S ohledem na to, že jde o zkoušku identifikující povrchové vady, je práce soustředěna i na další zkoušky odhalující defekty na povrchu, pro doplnění jsou zmíněny také metody podpovrchové.

Kapilární metoda díky své jednoduchosti patří k jedné z nejpoužívanějších zkoušek z NDT. Touto metodou lze zjišťovat vady povrchové (trhliny, praskliny a póry). Skládá se z pěti primitivních kroků, které vedou k výrazné indikaci vady. Potřebné pomůcky k vykonání zkoušky se nazývají souborným názvem kapilární prostředky (odmašťovače, čističe, penetranty, vývojky a emulgátory). Kapilární zkouška má široké využití, co se materiálu zkoušeného předmětu týče. Nepoužitelná je pro porézní nebo savé povrchy. Vyhodnocení probíhá vizuálně pod bílým nebo UV světlem, záleží, zda byla použita barevná či fluorescenční metoda.

Na konci bakalářské práce jsou na základě získaných informací zhodnoceny jednotlivé výhody i nevýhody všech metod v porovnání s kapilární metodou. Vše je hodnoceno pouze z teoretického hlediska, proto je možné, že v praxi jednotlivé výhody nemusejí stoprocentně platit a mohou se stát třeba i nevýhodami. Jako nejméně výhodná metoda oproti kapilární se jeví metoda čistě vizuální (bez zvýraznění defektů).

Porovnáním kapilární metody s ostatními metodami nebyla shledána dominance ani jedné z nich, a není proto možné jasně vydefinovat nejvhodnější metodu.

7 Seznam použité literatury

[1] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: nauka o materiálu IV.* 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.

[2] MEISTER, R., M. RANDALL, H. PATTEE, L. WILLIAMS a D. MITCHELL. *Summary of nondestructive testing theory and practice* [online]. 1972 [cit. 2020-02-19].

[3] DUBENSKÝ, Rudolf, Václav MINAŘÍK a František ČERMÁK. *Defektoskopie-nedestruktivní zkoušení*. 2.přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 1992. ISBN 80-01-00844-4.

[4] VĚCHET, Mojmír, Jaroslav KESL a Lumír ŠPIKA. *Defektoskopie v otázkách a odpovědích*. 1. Praha: SNTL, 1989. ISBN 80-03-00100-5.

[5] *Boroskop* [online]. [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: https://www.natis.cz/endoskopy-boreskopy/pevne-endoskopy-model-micrendo-1.8-4.0mm/det/6/42/87/811/0

[6] *Ohebný endoskop* [online]. [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: https://www.natis.cz/endoskopy-boreskopy/ohebny-endoskop-model-flexilux-eco-fiberscope/det/6/42/88/849/0

[7] HALMSHAW, R. *Non-destructive testing*. 2nd ed. London: E. Arnold, 1991. ISBN 0-340-54521-6.

[8] YAMADA, Hiroshi, Takashi TOGASAKI, Masanobu KIMURA a Hajime SUDO. High-density 3D packaging sidewall interconnection technology for CCD micro-camera visual inspection system. *Electronics* [online]. 86. 2003, **86**(8), 67-75 [cit. 2020-02-02]. DOI: 10.1002/ecjb.10063. ISSN 8756663X.

[9] *Videoskop* [online]. b.r. [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: https://www.olympus-ims.com/cs/rvi-products/iplex-tx/

[10] MIX, Paul. *Introduction to nondestructive testing: a training guide*. I. title. New York: Wiley, 1987. ISBN 0471-83126-3.

[11] BROŽEK, Milan. *Strojírenská technologie I: (návody ke cvičením)*. Vyd. 2., přeprac., rozš. V Praze: Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, katedra materiálu a strojírenské technologie, 2008. ISBN 978-80-213-1780-2.

[12] SHULL, Peter. *Nondestructive evaluation: theory, techniques, and applications*. I. title. New York: M. Dekker, 2002. Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.), 142. ISBN 0-8247-8872-9.

[13] ZENG, Zhiwei, Pengcheng DING, Jiayi LI, Shaoni JIAO, Junming LIN a Yonghong DAI. Characteristics of Eddy Current Attenuation and Thickness Measurement of Metallic Plate. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* [online]. 32. 2019, **32**(1), 1-9 [cit. 2020-02-27]. DOI: 10.1186/s10033-019-0419-6. ISSN 10009345.

[14] *ATG* [online]. [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: https://www.atg.cz/

[15] IREK, P. a J. SŁANIA. Material factors in relation to development time in liquid-penetrant inspection. Part3. *Archives of Metallurgy* [online]. 62. 2017, **62**(1), 41-49 [cit. 2020-02-19]. DOI: 10.1515/amm-2017-0006. ISSN 17333490.

[16] GUIRONG, Xu, Guan XUESONG, Qiao YULIANG a Gao YAN. Analysis and Innovation for Penetrant Testing for Airplane Parts. *Procedia Engineering* [online].

2015, , 1438-1442 [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814037989?via%3Dihub

[17] MILITARU, Elena-mădălina, Andreea-diana MOROŞANU, Mariana GORAN a Gabriel DUMITRU. Research of NDT examination of the turbine components using liquid penetrant inspection. *TEHNOMUS* [online]. 2017, , 183-188 [cit. 2020-02-19]. ISSN 1224029X.

[18] *Povrchové napětí* [online]. b.r. [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: https://ag-acko.webnode.cz/news/a17-kapaliny-povrchove-napeti/

[19] *Krajový úhel* [online]. b.r. [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: https://kof.zcu.cz/vusc/pg/termo09/mechanics/v/v2.htm

[20] *Kapilární elevace* [online]. b.r. [cit. 2020-02-09]. Dostupné z: https://old.vscht.cz/fch/prikladnik/prikladnik/p.12.1.4.html#avpr

[21] *Kapilární tlak* [online]. b.r. [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/643-kapilarita

[22] *Kapilární prostředky* [online]. b.r. [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: http://www.defektoskopie.cz/produkty/pt-metoda-kapilarni/kapilarni-prostredky/kapilarni-prostredky-tiede/

[23] *Insight: Non-Destructive Testing* [online]. 48. 2006, **48**(3) [cit. 2020-02-19]. ISSN 13542575.

[24] *Engineering Letters* [online]. 15. 2007, **15**(1) [cit. 2020-02-19]. ISSN 1816093X.

[25] *Penetrační prostředky* [online]. [cit. 2020-02-25]. Dostupné z: http://www.ndttrade.cz/category/39/penetracni-prostredky-sk

[26] PEXA, Martin a Zdeněk ALEŠ. *Technická diagnostika [elektronický zdroj]: cvičení / Martin Pexa, Zdeněk Aleš*. 2011. ISBN 9788021321762.

8 Seznam obrázků

Obr. 1 - Základní dělení NDT 4
Obr. 2 - Tuhý endoskop [5] 5
Obr. 3 - Ohebný endoskop [6] 6
Obr. 4 - Videoskop [9] 6
Obr. 5 – Cívkové magnetování [4] 11
Obr. 6 – Magnetováním jhem [1] 11
Obr. 7 – Magnetování průchodem proudu [4] 11
Obr. 8 – Magnetování pomocným vodičem [4] 11
Obr. 9 – Magnetování indukcí proudu v předmětu [4] 11
Obr. 10 – Způsob průchozí cívky [4] 15
Obr. 11 – Způsob přiložené cívky [4] 16
Obr. 12 – Princip prozařování [1] 18
Obr. 13 – Povrchové napětí [18] 21
Obr. 14 – Krajový úhel [19] 22
Obr. 15 – Kapilární elevace [20] 22
Obr. 16 – Kapilární tlak [21] 23
Obr. 17 – Kapilární prostřekdy [22] 24
Obr. 18 – Čištění [25] 29
Obr. 19 – Nanesení penetrantu [25] 29
Obr. 20 – Odstranění přebytečného penetrantu [25] 29
Obr. 21 – Nanesení vývojky [25] 29
Obr. 23 – Kapilární prostředky a vzorky [26] 31
Obr. 22 – Výsledek kapilární zkoušky [26] 31

Seznam použitých zkratek a symbolů

A	ampér
CCD	Charge Coupled Device
Hz	hertz
IIW	International Institute of Welding
kg	kilogram
kHz	kilohertz
mg	magnetické
MHz	megahertz
m	metr
mm	milimetr
N	newton
NDT	metody nedestruktivního testování
PT	zkoušení kapilární
RT	zkoušení radiografické
rtg	rentgenové
s	sekunda
SI	mezinárodní systém jednotek
SS	stejnosměrný
UV	ultrafialové
UZ	ultrazvuk
V	volt
°C	stupeň Celsia
β	beta