

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2012

Michal Forman

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Využití ultrazvukové defektoskopie v materiálovém inženýrství

Michal Forman

Bakalářská práce

2012

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal Forman**
Osobní číslo: **D07318**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**
Název tématu: **Využití ultrazvukové defektoskopie v materiálovém inženýrství**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

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

Metody nedestruktivního testování
Typy vad zjistitelné nedestruktivními zkouškami
Použití ultrazvukového defektoskopu

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Kopec, B. a kol.: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. CERM Brno 2008, ISBN 978-80-7204-591-4

Ptáček, L. a kol.: Nauka o materiálu I.-II. CERM, s.r.o. Brno 1999, ISBN 80-7204-193-2

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Švanda, Ph.D.

Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání bakalářské práce: **24. února 2012**

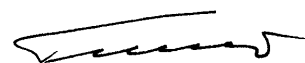
Termín odevzdání bakalářské práce: **31. května 2012**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 24. února 2012

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, kterým jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 24. 5. 2012

Michal Forman

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Pavlu Švandovi, PhD. za zhotovení zkušebních vzorků a za poskytnuté rady a připomínky k této práci.

ANOTACE

Tato práce se zabývá využitím ultrazvukové defektoskopie pro nedestructivní zkoušení materiálů. Jsou zde popsány metody nedestructivního testování materiálů a typy vad zjistitelné těmito nedestructivními metodami. Praktická část se věnuje měření s ultrazvukovým defektoskopem.

KLÍČOVÁ SLOVA

ultrazvuková defektoskopie, nedestructivní metody, vady materiálů

TITLE

The use of ultrasonic flaw detection in materials engineering

ANNOTATION

This work deals with using of ultrasonic flaw detection for non-destructive testing of materials. It describes methods of materials non-destructive testing and type of defects detectable by these non-destructive methods. Practical part of the work attends to measure with ultrasonic flaw defectoscop.

KEYWORDS

ultrasonic flaw detection, non-destructive methods, defects of materials

Obsah

1	ÚVOD.....	9
2	METODY NEDESTRUKTIVNÍHO TESTOVÁNÍ	10
2.1	Vizuální metody.....	11
2.1.1	Faktory ovlivňující provedení vizuální kontroly	12
2.1.2	Průmyslové endoskopy	13
2.2	Kapilární metody	14
2.2.1	Princip kapilárních metod.....	15
2.2.2	Rozdělení kapilárních metod	15
2.2.3	Kapilární prostředky	15
2.2.4	Postup kapilární zkoušky.....	16
2.3	Zkoušky magnetoinduktivní a elektroinduktivní.....	18
2.3.1	Metoda rozptylových toků.....	18
2.3.1.1	Princip metody.....	18
2.3.1.2	Postup zkoušky	19
2.3.1.3	Další možné způsoby indikací rozptylových toků.....	22
2.3.2	Metoda vířivých proudů.....	24
2.3.2.1	Princip metody.....	25
2.3.2.2	Zkušební metody.....	26
2.4	Metody prozařovací (průmyslová radiologie)	27
2.4.1	Princip prozařovací metody.....	28
2.4.2	Postup při radiografických zkouškách.....	30
2.5	Ultrazvuková metoda.....	32
2.5.1	Princip ultrazvukových zkoušek.....	32
2.5.2	Fyzikální základy.....	32
2.5.3	Druhy ultrazvukových vln	34
2.5.4	Zdroje ultrazvuku.....	36
2.5.5	Metody ultrazvukové defektoskopie.....	38
2.5.6	Postup při ultrazvukové zkoušce	40
3	TYPY VAD ZJIŠTITELNÉ NEDESTRUKTIVNÍMI ZKOUŠKAMI.....	41
3.1	Pojem vady a základní dělení vad.....	41
3.2	Vady jako anomálie fyzikálního prostředí.....	42
3.2.1	Prvkové složení.....	42
3.2.2	Heterogenita.....	42
3.2.3	Drsnost	43
3.3	Charakteristika necelistvostí a makroskopických vad.....	44
3.3.1	Vycezeniny (segregace).....	44
3.3.2	Dutiny	45
3.3.3	Trhliny	46
3.3.4	Makroskopické nekovové vměstky	49
3.4	Vady mikrostruktury.....	49
3.4.1	Způsoby zjišťování nedestruktivními zkouškami.....	49
3.4.2	Strukturní vady	50
3.5	Únavový lom.....	51
4	POUŽITÍ ULTRAZVUKOVÉHO DEFEKTOSKOPU	53
4.1	Univerzální ultrazvukový defektoskop DIO 562.....	53
4.1.1	Stručný popis defektoskopu.....	54
4.1.2	Menu přístroje – přehled.....	56

4.2	Postup měření	57
4.3	Zkušební vzorky	61
4.3.1	Naměřené rozměry.....	63
4.3.2	Zhodnocení měření	70
4.4	Návrh úlohy pro měření ultrazvukovým defektoskopem	70
5	ZÁVĚR	71
	Použité zdroje	72
	Seznam obrázků.....	73
	Seznam tabulek.....	75
	Seznam příloh	75

1 ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá využitím ultrazvukové defektoskopie jako jedné z metod pro nedestruktivní testování materiálů a výrobků, tedy zjišťování jejich stavu, zda neobsahují necelistvosti, aniž by se tím narušila jejich budoucí použitelnost nebo ovlivnila schopnost plnit požadované funkce.

Zkoušení ultrazvukem má v nedestruktivním zkoušení materiálů a výrobků nezastupitelné místo a patří již desítky let mezi nejvíce využívané metody. Využívá se v oblasti zkoušení a diagnostiky výrobků, výrobních zařízení, dopravních prostředků, konstrukcí atd. Standardně se ultrazvuk používá pro kontrolu základního materiálu, svarových spojů, návarů a pro měření tloušťky stěn.

Bakalářská práce se v první části zaměřuje na popis základních, nejvíce využívaných metod nedestruktivního testování. U každé zkušební metody je popsán její princip, průběh, její výhody a nevýhody, a také možnosti použití. Druhá část je věnována typům vad zjistitelným těmito nedestruktivními zkouškami, tedy charakteristice jednotlivých typů vad a možného způsobu jejich zjišťování. Třetí část se zabývá praktickým využitím ultrazvukové metody s možností vytvoření laboratorní úlohy, kterou by bylo možné později využít při výuce. Dále tato část obsahuje stručný popis ultrazvukového defektoskopu a je podrobně popsán postup při měření s tímto přístrojem.

2 METODY NEDESTRUKTIVNÍHO TESTOVÁNÍ

Nedestruktivní testování (non-destructive testing – NDT), označované též jako nedestruktivní defektoskopie, tvoří nedílnou část kontroly jakosti výrobků jak v předvýrobní a výrobní fázi, tak v provozu. Slouží k zajištění bezporuchovosti, spolehlivosti a bezpečnosti v odvětvích jako je doprava, chemický průmysl, jaderná energetika, stavebnictví, atd. [1, 2]

Pojem nedestruktivní testování zahrnuje metody používané pro zkoušení materiálů nebo výrobků, aniž by došlo k jejich poškození nebo ovlivnění schopnosti plnit požadované funkce. Obecně se používá ke zjišťování necelistvosti materiálu, tedy k vyhledání plošných nebo vnitřních vad materiálu. [1, 2]

Defektoskopické metody zjišťují vady většinou nepřímo. Prostředníkem je fyzikální veličina, která v interakci s prostředím mění své parametry. Změna parametrů veličiny závisí na homogenitě prostředí, tj. zkoušeného materiálu. Anomálie ve zkoušeném materiálu způsobují lokální změny zkoušené veličiny. Měření a rozbor těchto změn je ekvivalentní zjišťování vad a stanovení jejich velikosti, tvaru, polohy a je základem metod nedestruktivního zkoušení. [7]

Základním kritériem pro rozlišení metod nedestruktivního testování je tedy použitá veličina, energie nebo látka. Obecně se však běžně používané defektoskopické metody dělí podle toho, zda jsou schopné identifikovat vady na povrchu nebo uvnitř materiálu (výrobku) a to takto: [7]

Zjišťování povrchových vad:

- vizuální metody
- penetrační (kapilární) metody
- magnetoinduktivní a elektroinduktivní metody

Zjišťování vnitřních vad:

- magnetoinduktivní a elektroinduktivní metody
- prozařovací (radiologické) metody
- akustické (ultrazvukové) metody

Uvedené metody mohou mít řadu variací. Patří sem tepelné metody, optické metody, akustická emise, zkoušky těsnosti a jiné.

Přehled a použitelnost nedestruktivních metod pro zjišťování vad, jež se běžně nacházejí ve strojírenských a hutních výrobcích, uvádí tabulka 2.1.

Tab. 2.1 – Přehled a použitelnost defektoskopických metod [7]

Velikost použitelná ke zkoušení	Princip	Přerušeni uvislosti		Dutiny				Vměstky				Vady struktury													
		Povrchové trhliny	Vnitřní trhliny	Povrchové praskliny	Vnitřní praskliny	Zásojeniny	Studený spoj	Trhliny, póry	Bodliny	Stážení	Řezy	Měrné slazeniny	Mikrobubliny	Nagrnvořeny bořen	Sárutkové sířst	Zařruřeniny	Některé vřstřky	trůky	Křivky vřstřky	Strukturální vřstřky	Ořbení	Nespojivá řz. vřstřky			
Energie	Elektrická energie	Elektro-magnetické vlny	Rentgenové zářeni	Registrace lokálních změn intenzity rentgenového zářeni	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
			Zářeni gama	Registrace lokálních změn intenzity zářeni gama	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		Efekt tromagnetické pole	Magnetický lok	Registrace rozptylových toků	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			Magnetická síla	Registrace změny intenzity magnetického pole (metoda odřru)	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		Elektrický proud	Vřivé proudy	Registrace změny impedance cívky	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			Střidavý proud	Střidavý proud	Registrace potenciátových skoků na nespojitostech materiálu	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Mechanická energie	Elastické vlny	Střidavý proud		Registrace potenciátových skoků na nespojitostech materiálu	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		Střidavý proud	Registrace potenciátových skoků na nespojitostech materiálu	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Hmoty	Kapaliny	Fasivny	Střidavý proud	Registrace změny frekvence a interference zvukového vřnení	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
			Ulřazvuk	Registrace odřazených ultrazvukových vřn, registrace změny intenzity ultrazvukových vřn	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		Alicivny	Barevná kapalina	Kapilární elevace barevné kapaliny ve vadách	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Fluorescenční kapalina	Kapilární elevace fluorescenční kapaliny ve vadách		●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
		Kyselina	Naleptání povrchu a kapilární elevace kyseliny ve vadách	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		

● Spoleřlivá indikace ○ Měně spoleřlivá a nespořlivá indikace, omezený rozsuh pouřiti ○ nemořná indikace

Z tabulky je zřejmé, že každá z metod má své vymezené možnosti a omezení, které jsou dané jejich fyzikální podstatou. Žádná metoda tedy není univerzální a neumožňuje zjištění všech typů vad, které se mohou vyskytnout ve zkoušeném materiálu nebo výrobku. Pro zaručení dokonalé zjistitelnosti všech typů vad je zapotřebí použít více zkušebních metod, které se vzájemně doplňují. [7]

2.1 Vizuální metody [1, 2]

Vizuální kontrola je nejjednodušší nedestruktivní kontrola, která se používá pro zjišťování a posuzování druhu, velikosti, polohy a četnosti povrchových vad zkoušeného objektu. Může být používána samostatně nebo jako součást ostatních

nedestruktivních zkoušek. Výhodou vizuální metody je přímé a okamžité vyhodnocování vad, použití pro všechny druhy materiálů, minimální zaškolení zkušebního pracovníka. Nevýhodou metody je, že jí lze vyhodnocovat pouze povrchové vady

Vizuální kontrolu lze podle provedení rozdělit do dvou základních kategorií:

- a) **přímá kontrola** – provádí se pouhým okem nebo pomocí lupy zvětšující 2 až 15krát. Používá se v případě, kdy je dostatečný přístup ke kontrolovanému povrchu. Podmínkou pro použití je dobrá zraková schopnost pracovníka, dostatečné osvětlení kontrolovaného povrchu denním nebo umělým světlem o minimální intenzitě 500 luxů.
- b) **nepřímá kontrola** – provádí se pomocí dokonalejších optických nebo optoelektrických přístrojů a zařízení (např. endoskopy, videoskopy, přístroje s optickými vlákny, filmová technika). Používá se v případech, kdy není možné provést přímou vizuální kontrolu a to jednak z důvodu nepřístupnosti (potrubní systémy, tlakové nádoby) nebo z důvodu nebezpečnosti.

2.1.1 Faktory ovlivňující provedení vizuální kontroly

- 1) **vlastnosti materiálu** – na provedení vizuální kontroly mají vliv fyzické rozměry a podmínky kontrolovaného objektu.
- 2) **stav povrchu** – základním požadavkem je čistota povrchu. Z pozorovaného povrchu musí být odstraněny všechny nečistoty, které by mohly zakrývat povrchové vady.
- 3) **barva světla** – barva dopadajícího světla může zvyšovat kontrast mezi hledanými vadami a povrchem objektu.
- 4) **textura povrchu** – ovlivňuje množství a kvalitu světla, které se odráží do očí kontrolora. Velmi hladký povrch může způsobovat nepříjemné oslnění nebo v opačném případě drsný povrch může vyžadovat speciální druh osvětlení.
- 5) **únava kontrolora** – má vliv na zrakové schopnosti, především na ostrost zraku a akomodační schopnost (schopnost současného ostrého vidění blízkých i vzdálených předmětů).

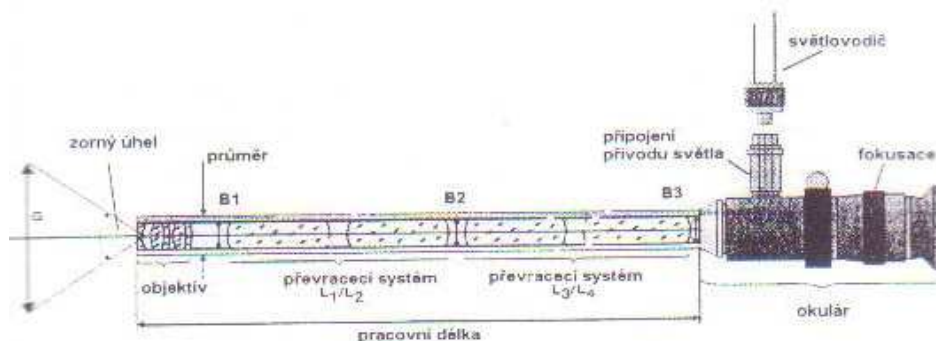
2.1.2 Průmyslové endoskopy

Průmyslové endoskopy jsou přístroje používané pro vizuální kontrolu obtížně přístupných míst, zjišťování stupně opotřebení různých součástí, stavu a postupu koroze, posuzování kvality svarů apod.

Podle konstrukce se průmyslové endoskopy dělí na pevné (boroskopy) a ohebné (fibroskopy, videoskopy).

Pevné endoskopy (boroskopy)

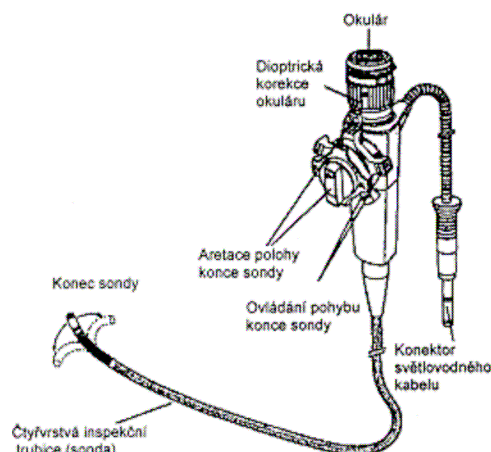
Pevné endoskopy (obr. 2.1) jsou tvořeny neohebným trubkovým tělesem (inspekční trubicí), které je na jednom konci opatřeno okulárem a na druhém konci objektivem. Uvnitř inspekční trubice je klasická optická soustava pro přenos obrazu. Pevné endoskopy se používají v případech, kdy je přímý přístup ke kontrolovanému povrchu. Vyrábějí se v různém délkovém a průměrovém provedení inspekční trubice a se širokým optickým vybavením, kdy je možné měnit zorný úhel v rozmezí 20° až 140° vzhledem k ose tělesa endoskopu.



Obr. 2.1 – Pevný endoskop (boroskop) [1]

Ohebné endoskopy (fibroskopy)

Obraz je přenášen pomocí svazku optických vláken uložených uvnitř ohebné inspekční trubice. Fibroskop (obr. 2.2) je na konci opatřen výměnným objektivem, který je možno dálkově ovládat a natáčet do libovolného směru. Pomocí výměnných objektivů lze měnit optické parametry endoskopu (zorné pole a úhel, zvětšení). Na straně okuláru je možné pomocí adaptéru připojit fotografické zařízení, videokameru apod. pro vytvoření dokumentace nebo pro sledování průběhu kontroly. Tyto endoskopy se využívají pro kontrolu obtížně přístupných povrchů.



Obr. 2.2 – Ohebný endoskop (fibroskop) [6]

Videoskopy

Konstrukční provedení a použití je podobné jako u fibroskopů. Obraz je přenášen pomocí miniaturní barevné videokamery s CCD čipem, který je umístěn na konci endoskopu. Tento čip umožňuje podstatné zvýšení rozlišovací schopnosti a maximální věrohodnost barev v porovnání s fibroskopy. Videoskopy mají kromě všech výhod fibroskopů (ovládání na dálku, ohebnost, možnost změny optických parametrů) navíc delší dosah (až 30 m) a jednoduchou manipulaci. Průběh kontroly se sleduje na TV monitoru.

2.2 Kapilární metody [1, 2]

Kapilární metody využívají kapilárních vlastností určitých kapalin (penetrantů) ke zjišťování otevřených povrchových vad materiálu, jako jsou např. trhliny, póry, poretity apod. Použití těchto metod na zjištění vnitřních vad, které nejsou spojeny se zkoušeným povrchem, není možné. Výhodou metody je použitelnost pro všechny nesavé materiály bez povrchové vrstvy, citlivost na malé necelistvosti, požadavek minimální zkušební na zkušební pracovníka. Nevýhodou metody je, že jí lze vyhodnocovat pouze otevřené povrchové necelistvosti, nutnost přípravy zkoušeného objektu, zdlouhavost metody.

2.2.1 Princip kapilárních metod

Princip kapilární metody je založen na využití smáčivosti a vzlínivosti vhodných detekčních kapalin (penetrantů), a dále na jejich barevnosti či fluorescenci. Tyto kapaliny se nanášejí na povrch zkoušeného předmětu a pronikají do jeho nečistostí (vad) spojených s povrchem. Po odstranění přebytečné kapaliny ze zkoušeného povrchu pak kapalina, která zůstala v jeho vadách, vzlíná vlivem kapilárních sil a sacím účinkem nanesené vývojky na povrch předmětu. Detekční kapalina spolu s kontrastní vývojkou vytváří barevnou nebo fluoreskující indikaci vady, která se hodnotí vizuálně.

2.2.2 Rozdělení kapilárních metod

Kapilární metody se rozdělují z hlediska druhu vytvořené indikace a způsobu jejího hodnocení na:

- a) **metodu barevné indikace** – přítomnost vady se projevuje vytvořením kontrastní barevné indikace (většinou červené nebo modré na bílém podkladě). Hodnocení vzniklých indikací se provádí v denním nebo umělém bílém světle.
- b) **metodu fluorescenční** – přítomnost vady se po ozáření zkoušeného povrchu ultrafialovým zářením (tzv. černým světlem) projevuje světélkující indikací (žlutozelené nebo modrozelené světélkování).
- c) **metodu dvojúčelovou** – přítomnost vady se projevuje v závislosti na druhu použitého osvětlení (bílé nebo UV světlo) buď barevnou nebo fluorescenční indikací.

2.2.3 Kapilární prostředky

Kapilární prostředky jsou činidla, která jsou potřebná pro provedení kapilární zkoušky. Rozdělují se na:

- 1) **Penetranty** (detekční kapaliny) – kapaliny, které jsou nanášeny na zkoušený povrch, aby vnikaly do jeho povrchových vad a po odstranění jejich přebytečného množství z povrchu materiálu pak kapalina, která zbyla ve vadách vzlíná a tyto vady zviditelňuje.

- 2) **Vývojky** – činidla, která jsou po odstranění přebytečného množství penetrantu nanášena na zkoušený povrch, kde napomáhají penetrantu vzlínat z vad a poté s ním společně vytváří kapilární indikaci.
- 3) **Odmašťovače a čističe** – odmašťovače jsou činidla, sloužící pro odstranění mastnoty (tuku nebo oleje) ze zkoušeného povrchu před nanesením penetrantu. Jako odmašťovače se používají různá organická rozpouštědla (benzín, aceton, chlorovaná rozpouštědla aj.), nebo anorganické chemikálie (vhodně zředěný sodný nebo draselný louh). Čističe jsou kapaliny sloužící k odstranění penetrantu ze zkoušeného povrchu. Jejich základ tvoří organické rozpouštědlo, které bývá kombinováno s dalšími látkami (např. emulgátory).
- 4) **Emulgátory** – povrchově účinné látky, umožňující smísení látek, které jsou jinak nesmíselné. U kapilárních zkoušek emulgátory usnadňují odstranění přebytečného penetrantu ze zkoušeného povrchu.

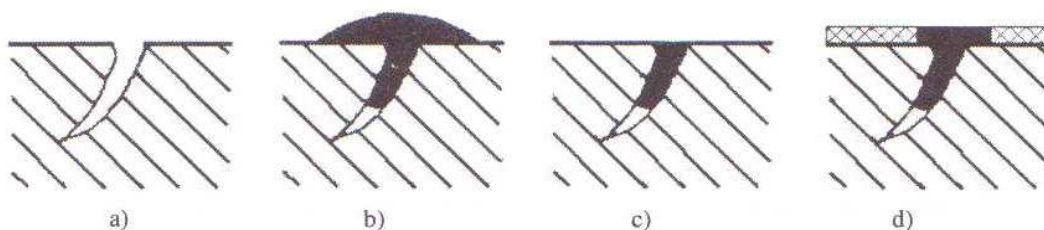
2.2.4 Postup kapilární zkoušky

Postup při kapilární zkoušce (obr. 2.3) se provádí v následujících pěti základních krocích:

- 1) **Příprava povrchu** – spočívá v odstranění všech tuhých i kapalných nečistot ze zkoušeného povrchu a z necelistvostí, které se na něm nacházejí. Odstranění nečistot se dosahuje použitím ocelového kartáče, brusných papírů, broušením apod. Následně se zkoušený povrch odmastí a důkladně osuší, čímž se usnadní vnikání detekční kapaliny do povrchových necelistvostí.
- 2) **Nanesení detekční kapaliny (penetrace)** – způsob nanášení detekční kapaliny závisí na rozměrech zkoušeného objektu. Při kontrole rozměrnějších objektů se kapalina nanáší nástřikem vzduchovou pistolí, sprejem ve formě aerosolu, fixírkou. Další možností je natírání penetrantu štětkou nebo poléváním. Objekty menších rozměrů se ponořují do penetrační lázně. Doba penetrace potřebná pro vniknutí detekční kapaliny do případných necelistvostí se pohybuje v rozmezí 5 až 20 minut, v mimořádných případech (např. detekce jemných trhlin) až několik hodin.
- 3) **Odstranění přebytku detekční kapaliny** – přebytečná detekční kapalina musí být odstraněna ze zkoušeného povrchu z důvodu, aby nevytvářela barevné nebo fluoreskující pozadí, které by mělo nepříznivý vliv na rozeznatelnost indikací vad. Volba způsobu odstranění záleží na chemickém složení detekční kapaliny a nesmí

při něm dojit k vyplavení detekční kapaliny z necelistvostí. U detekční kapaliny obsahující emulgátor se přebytek odstraní oplachem jemným proudem vody, případně se povrch otře vlhkou houbou. Při použití penetrantu neobsahujícího emulgátor se nejprve přebytečné množství setře dobře sající látkou a poté se povrch opláchne vodou nebo speciálními čistícími prostředky. Po oplachu se povrch osuší textilní látkou, teplým vzduchem nebo použitím sálavého tepla.

- 4) **Aplikace vývojky** – pracovní fáze, při které se na zkoušený povrch nanáší barevně kontrastní látka (vývojka). Podle formy, v jaké se vývojka nanáší, se rozlišuje i způsob aplikace. Vývojka ve formě prášku se nanáší buď ručním zaprašováním nebo pomocí elektroakustické pistole. Tyto způsoby jsou používány zejména u fluorescenčních postupů. Vývojky ve formě suspenze z vývojkového prášku, který je rozptýlen v těkavé kapalině nebo vodě, se nanášejí nástřikem. Používají se při hromadném zkoušení.
- 5) **Vyhodnocení zkoušky** – provádí se pouhým okem nebo pomocí lupy. Při vyhodnocení zkoušky se povrch zkoušeného objektu prohlíží dvakrát. Poprvé se prohlíží ihned po nanesení vývojky, kdy se indikují velké vady. Podruhé po uplynutí určitého času (obvykle 10 – 30 minut), kdy se zjišťují jemné vady, které potřebují k vytvoření indikace delší dobu. U metody barevné indikace se povrch zkoušeného předmětu prohlíží v rozptýleném bílém světle a případná vada se projeví vznikem barevné indikace (červená nebo modrá na bílém pozadí). Vyhodnocení fluorescenční metody se provádí v zatemněném prostoru, kdy se zkoušený povrch prohlíží pod černým světlem ultrafialové lampy. Přítomné vady se projevují světélkováním, přičemž neporušený povrch se jeví jako temně modrofialový.



Obr. 2.3 – Kapilární zkouška: a) povrch po očištění, b) povrch po nanesení kapaliny, c) povrch po otření, d) povrch po nanesení vývojky [4]

2.3 Zkoušky magnetoinduktivní a elektroinduktivní (zkoušky elektromagnetické)

Zkoušky založené na magnetické a elektrické indukci se používají ke zjišťování povrchových vad nebo vad nacházejících se v těsné blízkosti pod povrchem.

Podle základního zkušebního principu lze zkoušky rozdělit na:

1. metody rozptylových toků

2. metody vířivých proudů

Tato skupina nedestruktivních zkoušek nachází své uplatnění zejména v hutních provozech a ve vstupních a výstupních kontrolách polotovarů ve strojírenství. [7]

2.3.1 Metoda rozptylových toků

Metoda rozptylových toků, jenž je také často označována jako **metoda magnetická prášková**, je používána pro indikování povrchových a podpovrchových necelistvostí. Výhodou této metody je její jednoduchost, citlivost na malé necelistvosti, snadná obslužnost. Nevýhodou metody je její použitelnost pouze na feromagnetické materiály a není ji tedy možné aplikovat na materiály jako jsou měď, hliník, titan apod. Další nevýhodou je, že citlivost metody je závislá na orientaci magnetického pole vůči vadě. [1, 2]

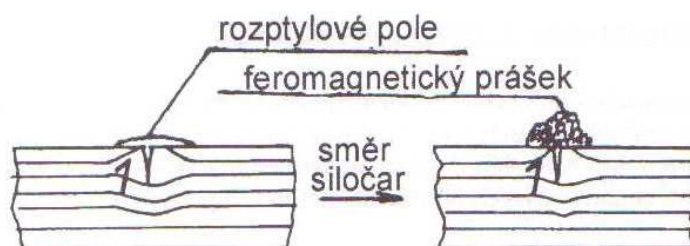
2.3.1.1 Princip metody [1]

Principem metody je zviditelnění rozptylového magnetického toku nad povrchovou nebo podpovrchovou necelistvostí. Při zmagnetování zkoušeného objektu magnetickým polem se v místě vady podstatně zvýší magnetický odpor materiálu, který způsobuje zakřivování a zhušťování siločar (rozptyl siločar). Část z těchto siločar vystupuje ze zkoušeného materiálu nad jeho povrch a vytváří tzv. rozptylový tok vady.

Takto vzniklý magnetický rozptylový tok se indikuje buď pomocí suchého feromagnetického prášku (barevné, fluorescenční) nebo detekční suspenzí, kterou tvoří feromagnetický prášek rozptýlený ve vhodné kapalině (řídký olej, voda nebo jiná kapalina). V místě, kde rozptylový tok vystupuje nad povrch materiálu, dochází

k zachycování (hromadění) prášku a vykreslení obrysu vady (obr. 2.4). V oblastech mimo vadu se prášek nezachycuje, takže se vada lépe zviditelní. Výsledek zkoušky se vyhodnocuje vizuálně.

Další možností indikování magnetického rozptylového toku je pomocí snímacích sond. Tento způsob se využívá v automatických kontrolních linkách.



Obr. 2.4 – Identifikace vady práškovou metodou [4]

2.3.1.2 Postup zkoušky [1]

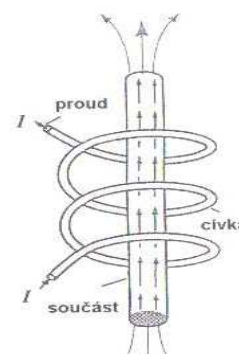
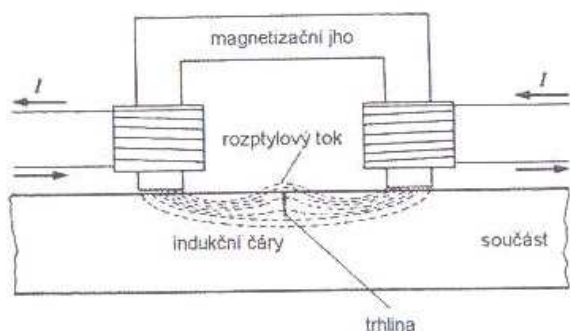
Při použití magnetické práškové metody se zkouška provádí v těchto hlavních následujících krocích:

- 1) **Úprava povrchu pro zkoušku** – citlivost metody přímo závisí na jakosti povrchu zkoušeného objektu. Aby bylo možné indikovat malé nečelistvosti, musí být povrch zbaven všech nečistot, rzi, okují, mastnoty a ostrých rýh. Při aplikaci suchého feromagnetického prášku a olejové suspenze nesmí být povrch zkoušeného objektu vlhký. Zkoušené objekty s tmavým povrchem se pro zvýšení kontrastu mohou natřít tenkou vrstvou speciální bílé barvy.
- 2) **Magnetizace zkoušeného objektu** – aby se v místě vady vytvořilo rozptylové pole, musí se zkoušený objekt zmagnetovat a to nejlépe ve směru kolmém na směr zjišťované nečelistvosti. Nečelistvosti, které jsou rovnoběžné se směrem působícího magnetického pole nelze zjistit, protože nenarušují magnetické pole. Z tohoto důvodu je zapotřebí použít více způsobů zmagnetování, aby se dosáhlo co nejkolmějšího směru magnetického pole ke směru předpokládaných vad.

Rozeznávají se tyto tři základní způsoby magnetizace:

- a) **pólová (podélná) magnetizace** – magnetický tok prochází zkoušeným objektem i mimo něj. V místech vstupu a výstupu magnetických siločar vznikají magnetické póly. Tento způsob magnetizace slouží ke zjišťování příčně

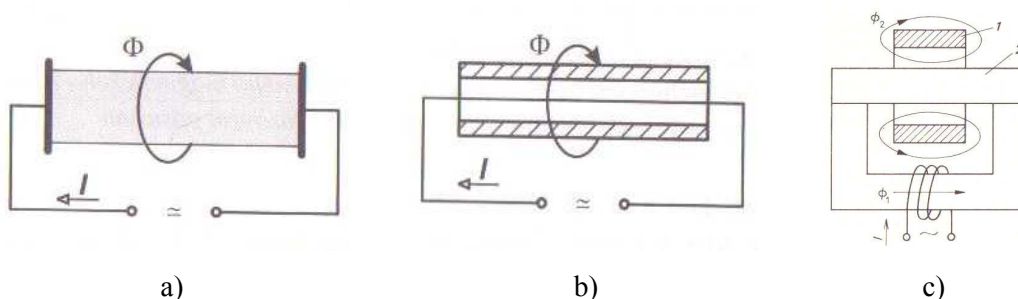
orientovaných vad a realizuje se buď pomocí magnetizačního jha (permanentní magnet, elektromagnet) (obr. 2.5) nebo cívkou (obr. 2.6).



Obr. 2.5 – Magnetování magnetizačním jhem [1]

Obr. 2.6 – Magnetizace cívkou [1]

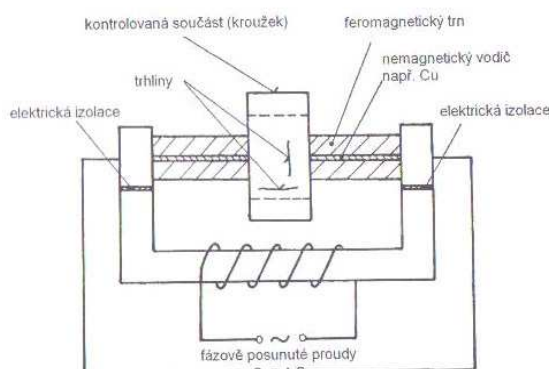
b) **cirkulární (příčná) magnetizace** – magnetický tok je uzavřen ve zkoušeném objektu a nedochází tedy ke vzniku výrazných magnetických pólů. Slouží k indikování podélně orientovaných vad. Cirkulární magnetizace může vzniknout přímým průchodem proudu zkoušeným objektem (obr. 2.7a), průchodem proudu pomocným vodičem vloženým do zkoušeného objektu (obr. 2.7b) a nebo indukcí proudu ve zkoušeném objektu (obr. 2.7c).



Obr. 2.7 – Cirkulární (příčná) magnetizace [2, 5]

a) průchodem proudu, b) pomocným vodičem, c) indukcí proudu,
 Φ – magnetický tok, I – proud, 1 – zkoušený objekt, 2 – pomocné jho

c) **kombinovaná magnetizace** – spočívá v současné magnetizaci zkoušeného předmětu dvěma na sebe prostorově kolnými magnetickými poli. Pomocí kombinované magnetizace lze indikovat libovolně prostorově orientované vady jedinou pracovní operací. Kombinované magnetizace lze dosáhnout např. kombinací indukce proudu v součásti a pomocného vodiče (obr. 2.8).



Obr. 2.8 – Kombinovaná magnetizace pomocným vodičem a indukcí proudu v součásti [1]

- d) **impulsní magnetizace** – jedná se o zvláštní způsob magnetizace, při kterém se magnetické pole ve zkoušeném objektu vytváří buď proudovými impulsy, nebo se objekt vkládá do cívky buzené proudovými impulsy. Rozptylové pole je v místě vady vyvoláno zbytkovým magnetizmem. [5]

3) Nanášení detekčního prostředku (vyvolání indikace) [1, 5] – pro zviditelnění rozptylových polí se povrch zkoušeného zmagnetovaného objektu pokrývá detekčním feromagnetickým práškem. Rozlišují se tyto dva základní způsoby nanášení:

- a) **nanášení suchých prášků** – suchý prášek se v průběhu magnetování nanáší na zkoušený povrch rovnoměrným naprašováním. Používají se nádoby s děrovaným dnem (sítkem) nebo ruční rozprašovače se zásobní nádobkou na prášek. Po ukončení naprašování se přebytečný prášek opatrně sfoukne z povrchu. Při magnetování buzeným pole se magnetování ukončuje až po odstranění přebytečného prášku.
- b) **nanášení suspenzí** – suspenze se na zkoušený povrch nanáší poléváním z ruční nádoby, štětcem, nástřikem ze spreje nebo stříkací pistole, ponořením do lázně s detekční kapalinou. Nanášení suspenzí se musí vždy ukončit dříve než magnetování.

Při impulsním magnetování se zkoušený objekt nejdříve zmagnetuje proudovými impulsy, a teprve poté se nanáší detekční prostředek.

- 4) **Vyhodnocení indikací** – vyhodnocení případných indikací se provádí vizuálně pod vhodným osvětlením. Při použití barevných indikačních prášků se jako osvětlovací zařízení používají žárovky nebo zářivky. V případě použití fluorescenčních prášků se zkoušený povrch osvětluje černým světlem (ultrafialovým zářením) pomocí rtuťové nebo halogenové výbojky v zatemněném prostoru.
- 5) **Odmagnetování** – po ukončení zkoušky magnetickou práškovou metodou zůstává ve zkoušeném předmětu zbytková magnetizace, která je nežádoucí. Působením zbytkové magnetizace se na předmět zachycují drobné feromagnetické nečistoty, třísky apod., které mohou zapříčinit omezení funkce (např. u styčných ploch pohyblivých částí) nebo přímo poškození stroje či zařízení. Dále zmagnetované části u měřicích zařízení mohou ovlivňovat jejich přesnost. Proto je nutné po zkoušce provést odmagnetování předmětu. To se provádí magnetováním zkoušeného předmětu polem opačné polarity, než mělo magnetické pole při provádění zkoušky.

2.3.1.3 Další možné způsoby indikací rozptylových toků

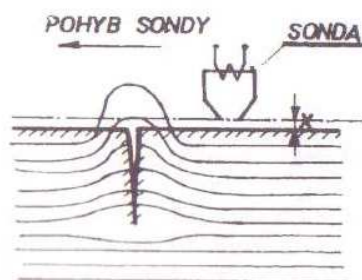
Nanášení feromagnetického prášku na povrch zkoušeného objektu není jedinou možností, jak indikovat rozptylové toky a tím upozornit na jeho vady. Výhodou práškových metod je jejich jednoduchost, ale na druhé straně jsou zdlouhavé a nestačí výrobnímu tempu, zejména v oblasti sériové výroby. Tam jsou potřebné takové kontrolní metody, které by eliminovaly subjektivní vliv obsluhy a neomezovaly rychlost výroby.

Těmto požadavkům nejlépe vyhovuje indikace rozptylových toků snímacími sondami, které reagují na rozptylové magnetické pole vznikem elektrického napětí, jež je možné dále zesilovat a registrovat. Registraci umožňuje rovněž magnetografická metoda.

Metoda pohyblivé sondy

Nejjednodušším snímačem rozptylového toku je snímací cívka. Při pohybu snímací cívky v magnetickém poli se v ní indukuje elektrické napětí, které je úměrné počtu závitů snímací cívky a rychlosti vzájemného pohybu snímací cívky a rozptylového toku (obr. 2.9). Indukovaný proud, jež vznikl v sondě, je zesílen a zviditelněn např. pomocí osciloskopu. V průběhu kontroly je nutné pohybovat sondou

určitou rychlostí a v malé vzdálenosti x nad povrchem zkoušeného objektu, aby byl proudový náraz dostatečně silný. [7]



Obr. 2.9 – Schéma metody pohyblivé sondy [7]

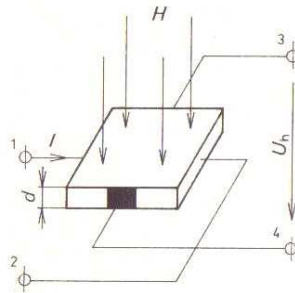
Feromagnetické sondy

Feromagnetické sondy na rozdiel od snímacích cívek nevyžadujú relatívny pohyb vŕči mŕenému poli. Tyto sondy se vyznačujú veľkou citlivosťou.

Mŕení rozptylových toků nad vadami se provádí pomocí tzv. diferenciálních sond, u kterých jsou jádra uspořádána vedle sebe a na každém z nich je samostatné budící a mŕící vinutí. Tyto sondy mŕí rozdíl magnetických polí mezi místy, v nichž se nacházejí jádra sondy. Pokud je magnetické pole homogenní, je výstupní napětí sondy nulové. Sonda reaguje pouze na nehomogenní pole způsobené vadou. [1]

Hallova sonda

Sonda je tvořena tenkou polovodičovou destičkou se čtyřmi vývody (obr. 2.10) a princip její činnosti je založen na využití Hallova jevu, který nastává při průchodu proudu destičkou. Nepůsobí-li na destičku magnetické pole, jsou protilehlé body na bočních stranách destičky na stejném potenciálu, tj. není mezi nimi žádné napětí. Vložením destičky do magnetického pole dojde k vychýlení nosičů náboje k jedné boční straně destičky a mezi jejími protilehlými body vznikne Hallovo napětí, které lze mŕit citlivým mŕícím přístrojem (milivoltmetrem). Hodnota tohoto napětí je úměrná intenzitě magnetického pole, do něhož je destička vložena. [1, 5]



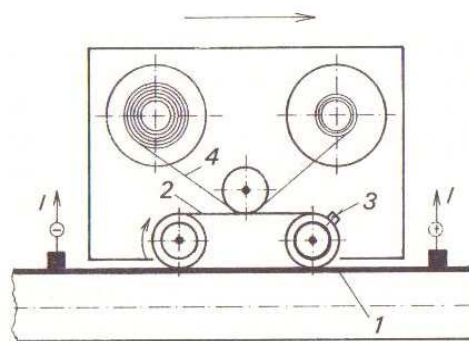
Obr. 2.10 – Hallova sonda [5]
 1 až 4 – vývody sondy, I – proud procházející destičkou,
 H – intenzita mag. pole kolmého k ploše destičky,
 U_h – Hallovo napětí, d – tloušťka destičky

Magnetografická metoda

Magnetografická metoda je založena na snímání rozptylových toků nad vadami pomocí magnetografického záznamového prostředku na magnetografický pásek (obr. 2.11).

Proces kontroly se skládá ze dvou operací:

- 1) zmagnetování zkoušeného místa. V této fázi dochází k záznamu rozptylových toků na magnetografický pásek, který je přiložen na povrch zkoušeného objektu.
- 2) snímání zápisu z magnetografického pásku pomocí snímače (např. magnetofonová hlava nebo feromagnetická sonda).



Obr. 2.11 – Magnetografická metoda [5]
 1 – zkoušený povrch, 2 – magnetografický pásek,
 3 – mazací hlava, 4 – kopie záznamu

2.3.2 Metoda vířivých proudů

Metoda vířivých proudů se využívá stejně jako magnetická prášková metoda pro zjišťování povrchových a podpovrchových nečelstností materiálů (např. trhlin,

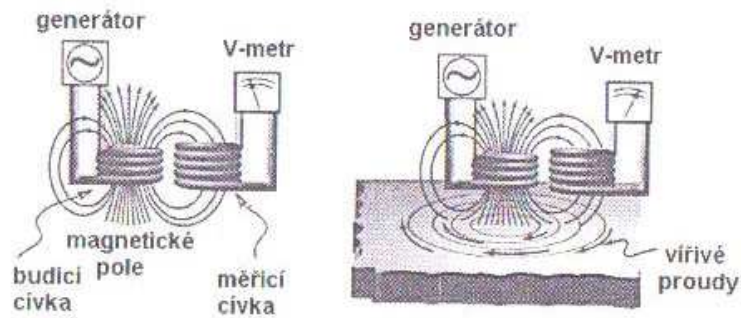
povrchových prasklin, poruch svarů apod.). Dále se používá k určení polohy a hloubky koroze kovových materiálů atd. Mezi výhody této metody patří vysoká citlivost, rychlost kontroly, před zkouškou není třeba speciálně upravovat povrch objektu (stačí jednoduché očištění), měření při vysokých teplotách. Nevýhodou metody je použitelnost jen na elektricky vodivé materiály a omezená detekce vad hluboko pod povrchem. [1, 2]

2.3.2.1 Princip metody

Zkoušený objekt je vystaven působení střídavého magnetického pole, které je vytvořeno budící cívkou a v objektu se indukuje střídavé napětí (obr. 2.12). V důsledku toho, že zkoušený objekt tvoří uzavřený proudový vodič, vytvářejí se v něm vířivé (cirkulární) proudy. Tyto vířivé proudy působí zpětně svým magnetickým účinkem na původní magnetické pole – budící. Působením vířivých proudů je původní magnetické pole od budící cívky zeslabováno, čímž vzniká pole výsledné, které je dáno vektorovým složením obou dílčích polí (pole budícího a pole od vířivých proudů). Výsledné pole bude záviset na magnetických a elektrických parametrech zkoušeného objektu, jenž jsou ovlivňovány jeho strukturním stavem. Vyhodnocení stavu zkoušeného objektu se provádí prostřednictvím napětí, které je výsledným magnetickým polem indukováno, a to:

- přímo v cívce, která budí magnetické pole (měří se impedance vinutí této cívky co do velikosti a fáze). Metoda příložné cívky.
- ve druhé cívce, která je měřicí (snímače se dvěma vinutími, měří se amplituda a fáze napětí na měřicím vinutí). Metoda průchozí cívky. [1, 5]

Pro použití metody má základní význam hustota a rozložení vířivých proudů ve zkoušeném objektu. Hustota a rozložení vířivých proudů závisí na elektrické vodivosti, permeabilitě a rozměrech objektu, a také na frekvenci budícího proudu. Obsahuje-li zkoušený předmět např. trhlinu, dochází ke zhoršení jeho vodivosti, zmenší se intenzita indukovaných vířivých proudů i intenzita zeslabovaného pole, které je jimi vyvoláno. Následkem toho se výsledné pole zvýší a tím i indukované napětí. Zvýšením napětí se indikuje přítomnost necelistvosti. [5]

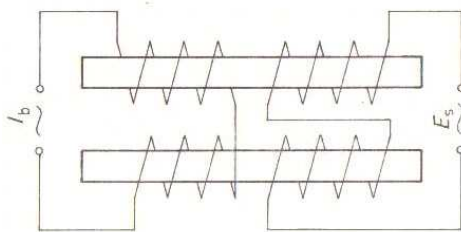


Obr. 2.12 – Princip metody vířivých proudů [1]

2.3.2.2 Zkušební metody [1, 5]

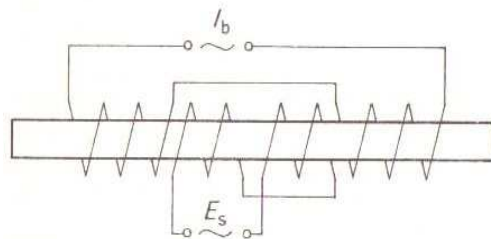
Podle uspořádání snímacích (měřících) cívek vzhledem ke zkoušenému objektu se rozlišují dvě základní zkušební metody:

- a) **metoda s průchozí cívkou** – zkoušený objekt prochází snímačem obsahujícím dvě vinutí. Jedno je magnetizační (budící) a druhé měřící. Magnetizační vinutí je napájeno střídavým proudem a vytváří střídavé magnetické pole. Účinkem magnetického pole vířivých proudů na původní pole dochází ke vzniku výsledného magnetického pole, které indukuje napětí v měřicím vinutí. Snímače mohou být uspořádány odděleně (obr. 2.13) nebo jsou spojeny v jeden celek (obr. 2.14). V případě odděleného uspořádání procházejí jedním snímačem zkoušené objekty a v druhém snímači je vložen etalonový výrobek s vlastnostmi ověřenými jinými metodami. U snímačů spojených jako jeden celek se porovnávají dvě sousední oblasti téhož zkoušeného objektu při jeho průchodu snímačem. Při rozdílných fyzikálních vlastnostech obou objektů, nebo obou porovnávaných oblastí, dochází k indukovaní rozdílných napětí v měřicích vinutích snímačů. Vzniká tedy rozdílové napětí, z jehož amplitudy a fáze lze určit velikost a druh odchylky, která napětí vyvolala. Metoda s průchozí cívkou se používá pro kontrolu trubek, drátů, tyčí, apod.



Obr. 2.13 – Oddělené uspořádání snímače [5]

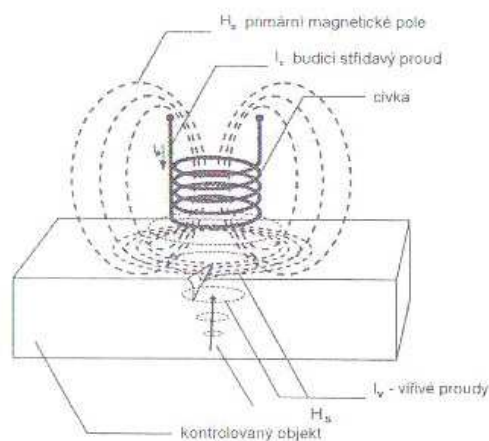
I_b – budící střídavý proud,
 E_s – snímané napětí



Obr. 2.14 – Společné uspořádání snímače [5]

I_b – budící střídavý proud,
 E_s – snímané napětí

b) **metoda s příložnou cívkou** – u této metody se cívka napájená střídavým proudem radiálně přikládá k povrchu zkoušeného objektu. V povrchových vrstvách vznikají vířivé proudy, jejichž magnetické pole ovlivňuje vlastnosti přikládané cívky – mění její impedanci. Tento průběh ukazuje obr. 2.15, kde H_p je primární (budící) magnetické pole od magnetizačního proudu v cívce I_b , H_s je sekundární (reakční) magnetické pole od vířivých proudů I_v , indukovaných ve zkoušeném objektu. Zpětné působení vířivých proudů se bude měnit s magnetickými a elektrickými vlastnostmi zkoušeného objektu. Dále bude záviset na vzdálenosti cívky od povrchu objektu a na tloušťce objektu. Metoda s příložnou cívkou se kromě zjišťování vad používá pro měření tloušťky nevodivých vrstev na vodivém základním materiálu, měření tloušťky laků, bezdotykové měření vodivosti apod.



Obr. 2.15 – Princip příložné cívky [1]

2.4 Metody prozařovací (průmyslová radiologie)

Prozařovací metoda patří mezi objemové nedestruktivní zkoušky. Umožňuje tedy zjišťování jak povrchových, tak především vnitřních nečistostí. Výhodou metody je použitelnost pro většinu materiálů nezávisle na jejich tvaru a povrchu. Mezi nevýhody této metody patří omezení tloušťky kontrolovaného materiálu podle jeho hustoty, nebezpečné radiační prostředí, vysoké nároky na zkušenost při vyhodnocování vad. [1, 2]

Průmyslová radiologie využívá pro nedestruktivní zkoušení materiálů rentgenové záření, gama záření nebo tok neutronů (neutronové záření).

2.4.1 Princip prozařovací metody

Princip této metody spočívá v prozařování materiálu jedním z uvedených typů záření a v následném zviditelnění prošlého zeslabeného záření pomocí vhodného detektoru intenzity záření, který je umístěn za zkoušeným materiálem. Zeslabení intenzity záření záleží na hustotě materiálu a na jeho tloušťce. Je-li tloušťka zkoušeného materiálu zeslabena ve směru záření vadou o určité velikosti a vhodné orientaci, dopadne v průmětu vady na použitý detektor záření o větší intenzitě než v ostatních částech. Vytváří se reliéf intenzity (reliéf kontrastu), ze kterého lze usuzovat na typové a rozměrové charakteristiky vad.

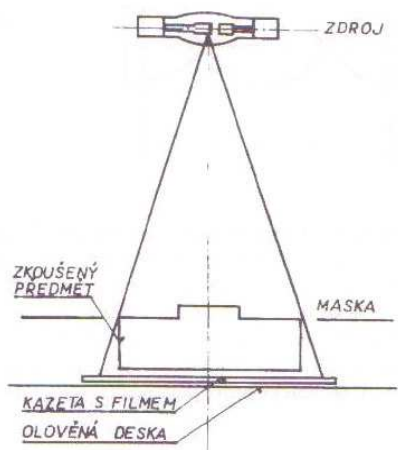
V závislosti na použitém detektoru záření se vada zobrazí buď jako tmavší skvrna na světlejším pozadí (při použití radiografického filmu) a nebo jako světlejší bod na tmavším pozadí (při zobrazení na obrazovce monitoru).

Podle druhu použitého detektoru záření se radiologické metody dělí na:

a) radiografická metoda

Nejpoužívanější prozařovací metoda. Záření prošlé kontrolovaným materiálem je zachycováno na speciální radiografický film (obr. 2.16). Působením záření vzniká v citlivé vrstvě filmu latentní (neviditelný) obraz. Následným fotochemickým zpracováním filmu se získá viditelný negativní obraz (radiogram), který je možno prohlížet prosvětlováním pomocí tzv. negatoskopu.

V současné době se začíná využívat digitální radiografie s použitím paměťových fólií. Tyto fólie jsou uloženy v „kazetách“ a používají se obdobně jako rentgenové filmy. [1, 2]

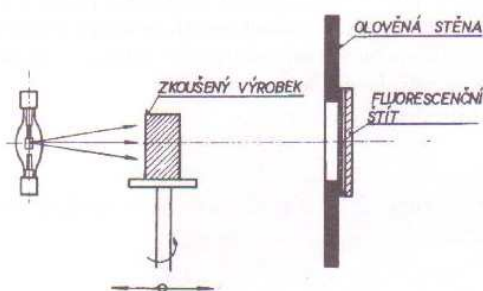


Obr. 2.16 – Schéma radiografie [7]

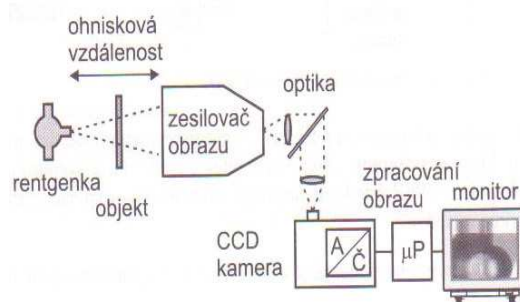
b) radioskopická metoda

Principem této metody je zobrazení obrazu záření prošlého zkoušeným materiálem na fluorescenčním stínítku (obr. 2.17) nebo na obrazovce monitoru (rentgenotelevizní systém). Rentgenotelevizní systém (obr. 2.18) využívá detektory záření, které převádějí dopadající záření na elektrický nebo optický signál. Signál je zesílen a po analogově-číslicovém převodu dále číslicově zpracován a zobrazen na monitoru.

Radioskopie je využívána při sériové kontrole výrobků (např. kontrola odlitků, kontrola svarů při kontinuální výrobě svařovaných trub). [2]



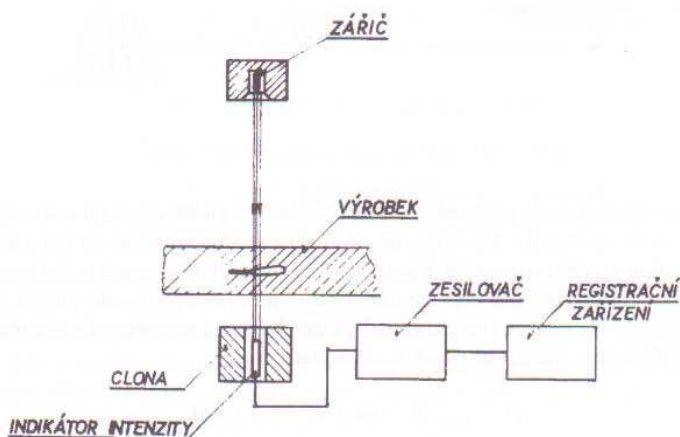
Obr. 2.17 – Fluorescenční stínítko [7]



Obr. 2.18 – Rentgenotelevizní systém [2]

c) radiometrická metoda

Při radiometrické měřicí metodě (obr. 2.19) se nezíská obraz reliéfu záření jako u předchozích způsobů, ale se měří lokální změny intenzity záření, které projde pouze určitou částí zkoušeného materiálu. K detekci prošlého záření se používají speciální dozimetrické přístroje, jenž jsou citlivé na změny intenzity pronikavého záření. Radiometrická metoda se používá i pro měření tloušťky materiálů. [5, 6]



Obr. 2.19 – Radiometrická metoda [7]

2.4.2 Postup při radiografických zkouškách [1, 5, 7]

Cílem při radiografických zkouškách je vyhotovit kvalitní radiogram, který co nejzřetelněji zobrazuje případné nečelistvosti ve zkoušeném objektu. Postup při prozařovacích zkouškách lze rozdělit do následujících kroků:

- 1) Úprava povrchu zkoušeného objektu** – úprava povrchu spočívá v odstranění všech hrubých nečistot (např. zbytky strusky, rozstřík svarového kovu, mechanické nečistoty apod.), které by mohly vést k mylnému vyhodnocení radiogramu. Před prozařovací zkouškou musí být provedena vizuální kontrola povrchových nečelistvostí.
- 2) Volba druhu záření a jeho energie vzhledem k prozařovanému objektu a jeho tloušťce** – rentgenové záření je nejpoužívanějším druhem záření. Využívá se při kontrole oceli do tloušťky stěny 75 mm. U ostatních kovů do tloušťek rovnocenným 75 mm oceli, přibližně v poměru jejich měrných hmotností. Gama záření se využívá v technicky odůvodněných případech (např. na montážích, požadavek projekce) nebo při kontrole oceli s tloušťkou stěny nad 75 mm. Energie záření se volí tak, aby se dosáhlo co nejlepší zjistitelnosti vad vzhledem k použitému způsobu prozařování.
- 3) Geometrické uspořádání zkoušky** – celkové uspořádání závisí na rozměrech a tvaru zkoušeného objektu, a dále také na přístupnosti a podmínkách prozařování.
- 4) Volba typu filmu a fólií** – radiografický film slouží k záznamu záření prošlého zkoušeným objektem a k jeho zviditelnění po vyvolávacím procesu. Radiografické filmy se v zásadě vyrábějí ve čtyřech typech a liší se pouze označením podle výrobce. Podle amerických norem a předpisů, zejména ASTM E-94 se filmy rozdělují podle svých vlastností (viz tab. 2.2).

Tab. 2.2 – Typy filmů podle ASTM E-94 [1]

Typ filmu	Citlivost	Kontrast	Zrnitost
1	nízká	velmi vysoký	velmi jemná
2	střední	vysoký	jemná
3	vysoká	střední	hrubá
4A	velmi vysoká	velmi vysoký /A/	velmi hrubá /B/

Podle ASTM E-94 nebo DIN 54 111, ale i podle ČSN EN 444, je volba filmu závislá na:

- materiálu
- tloušťce
- energii záření

Fólie se používají ke zvýšení účinku prošlého záření na citlivou vrstvu filmu, čímž se dosáhne zkrácení expoziční doby. Kromě toho působí fólie i jako filtr rozptýleného záření a zvyšují očekávaný kontrast při prozařování. Rozeznávají se tyto druhy fólií:

- kovové
- fluorescenční
- fluorometalické

- 5) Označení prozařovaných částí a použití měrek** – každá část prozařovaného objektu musí být před provedením zkoušky opatřena značkami (olověná písmena nebo číslice), aby byla zajištěna jednoznačná identifikace zkoušené části na radiogramu. Radiografické měrky (drátkové, otvorové, stupňové) se přikládají na povrch prozařovaného objektu a slouží k ověření jakosti radiogramu, tj. stupně rozlišitelnosti detailu. Při použití drátkových měrek se dosažená jakost určuje nejmenším průměrem drátku, který je ještě vidět. Přibližná hloubka vady se určuje pomocí speciálních měrek (defektometrů). Měrky jsou vyrobeny ze stejného materiálu jako zkoušený předmět, obsahují stejně široké vyfrézované drážky o různé hloubce. Hloubka vady se odhadne podle zčernání obrazu defektometru na snímku.
- 6) Prozáření objektu** – z ohniska zdroje záření (rentgenka, gamazářič, betatron) je vysílán na zkoušený objekt svazek záření. Toto záření prochází zkoušeným objektem a s příslušným reliéfem kontrastu dopadá na radiografický film.
- 7) Zpracování filmu** – působením záření, které prošlo zkoušeným objektem, vzniká v citlivé vrstvě filmu latentní (neviditelný) obraz. Pomocí fotochemického zpracování, tzv. negativního procesu, se tento obraz zviditelní. Negativní proces zahrnuje vyvolání, mezipraní, ustálení, konečné praní a sušení.
- 8) Vyhodnocení radiogramu** – předpokladem pro hodnocení radiogramu je znalost dosažené rozlišitelnosti (jakosti) radiogramu. Pro stanovení jakosti radiogramu se

používají drátkové měrky, které byly popsány v kroku č.5. Prohlížení a vyhodnocování radiogramů se provádí pomocí negatoskopů. Jedná se o zařízení převádějící rozdíly v optické hustotě (zčernání) radiogramu na rozdíly jasu. Negatoskop tvoří regulovaný světelný zdroj (halogen), který je uložen v neprůsvitné skříni a je překryt opálovou matnicí, aby světlo dopadající na radiogram bylo difúzně rozptýlené. Vyhodnocení provádí pracovník vizuálně v místnosti, v níž je šero a spočívá ve stanovení druhu, velikosti, četnosti a vzájemné polohy případných vad a jejich porovnáním s platnými normami nebo směrnici. Vyhodnocenému radiogramu je přidělen jakostní stupeň nebo je stav zkoušeného objektu popsán.

2.5 Ultrazvuková metoda

Ultrazvuková metoda patří mezi nejvýznamnější nedestruktivní zkoušky a slouží ke zjišťování vnitřních necelistvostí. Tato metoda umožňuje nejen zjištění přítomnosti vady, ale určuje i její polohu a velikost. Výhodou metody je velká citlivost na vnitřní necelistvosti, možnost testování většiny materiálů, minimální příprava zkoušeného objektu, okamžité výsledky zkoušky. Mezi nevýhody patří nutnost zajištění hladkého povrchu pro umístění sondy, citlivost metody závisí na orientaci vady vůči ultrazvukové vlně, požadavek velké zkušenosti pro nastavení ultrazvukového přístroje a vyhodnocení výsledků. [2, 5]

2.5.1 Princip ultrazvukových zkoušek

Ultrazvukové zkoušky jsou založeny na šíření akustického vlnění zkoušeným objektem a registraci jeho změn, vyvolaných ve zkoušené prostředí jeho interakcí na rozhraní mezi dvěma prostředími, které mají rozdílné akustické vlastnosti, tj. homogenním prostředím a nehomogenitou (vadou). [6]

2.5.2 Fyzikální základy

Podstatou akustických metod jsou obecně akustické vlny, což jsou elastické kmity částic prostředí. Vlivem soudržných sil působících mezi částicemi se postupně tento pohyb přenáší z jedné částice na všechny okolní částice, což se navenek projevuje

jako vlna (vlnění), jenž se šíří prostorem určitou rychlostí, závislou na mechanických vlastnostech prostředí.

Hlavní charakteristickou veličinou vlnění je délka vlny λ . Je to vzdálenost, kterou urazí vlna za dobu jedné periody T (obr. 2.20). [1, 7]

$$\lambda = c \cdot T = c / f \quad (2.1)$$

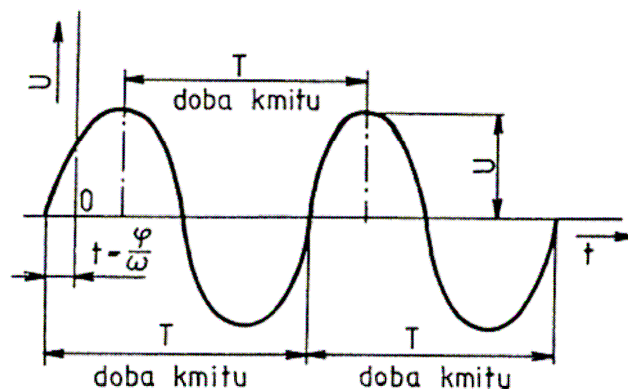
kde:

λ je vlnová délka

c je rychlost šíření vln

T je perioda (doba kmitu)

f je frekvence



Obr. 2.20 – Průběh kmitavého pohybu [7]

T – perioda, U – amplituda, t – čas, φ – fázový úhel, ω – úhlová rychlost

Ultrazvuk je kmitavý pohyb částic prostředí kolem jejich rovnovážných poloh, jejichž frekvence (kmitočty) je vyšší než 20 kHz. Kmitočtová hranice slyšitelnosti zvuku leží v rozmezí od 16 Hz do 20 kHz. Pod kmitočtovou hranicí 16 Hz se jedná o infrazvuk.

Pro účely nedestruktivního zkoušení se využívá ultrazvuk ve frekvenčním rozsahu od 100 kHz do 50 MHz.

Pro zkoušení materiálu ultrazvukem je podstatný akustický tlak p , který vyvolává vlnění v prostředí a je úměrný elektrickému napětí na elektrodách piezoelektrické sondy. [2, 7]

$$p = z \cdot v \quad (2.2)$$

kde:

p je akustický tlak

z je akustická impedance prostředí

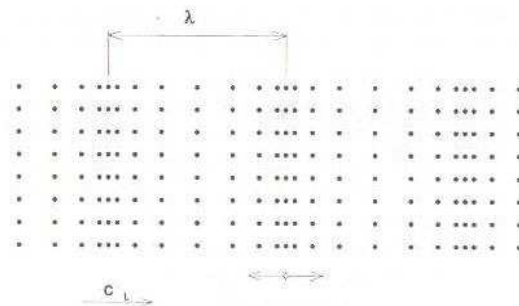
v je rychlost kmitání částic okolo jejich rovnovážné polohy

2.5.3 Druhy ultrazvukových vln [1, 2]

Podle způsobu, jakým částice prostředí kmitají vzhledem ke směru šíření ultrazvukové vlny, se mohou v pevných látkách šířit ultrazvukové vlny ve čtyřech základních režimech:

1) Podélné (longitudinální) ultrazvukové vlny

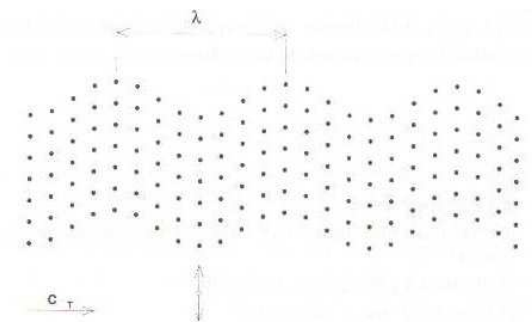
U podélných ultrazvukových vln kmitají částice prostředí ve směru šíření vlny (obr. 2.21). Tyto vlny se mohou šířit pevným, kapalným i plynným prostředím. Rychlost šíření podélných vln se označuje c_L .



Obr. 2.21 – Podélné vlny [1]

2) Příčné (transverzální) ultrazvukové vlny

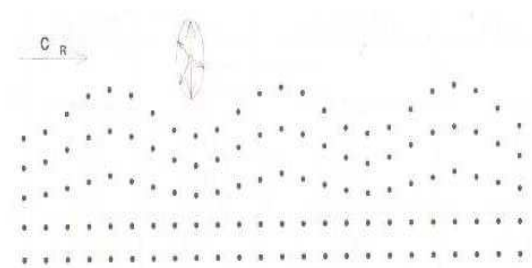
U příčných ultrazvukových vln kmitají částice prostředí kolmo na směr šíření vlny (obr. 2.22). Tyto vlny se mohou šířit jen prostředím, které umožňuje přenášet smykové síly, tedy jen tuhými látkami. Rychlost šíření příčné vlny se označuje c_T a její hodnota je vždy menší než rychlost podélné vlny.



Obr. 2.22 – Příčné vlny [1]

3) Povrchové (Rayleighovy) ultrazvukové vlny

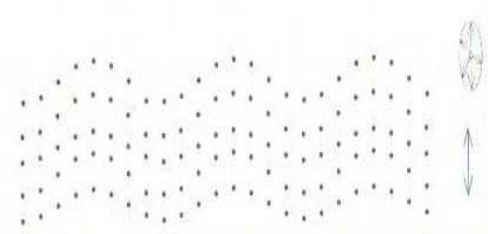
U povrchových vln kmitají částice prostředí po eliptické dráze (obr. 2.23). Tyto vlny se šíří na povrchu a těsně pod ním a to do hloubky jedné vlnové délky. Rychlost šíření povrchové vlny se označuje c_R a její hodnota je 0,8 až 0,9 krát menší než rychlost podélné vlny.



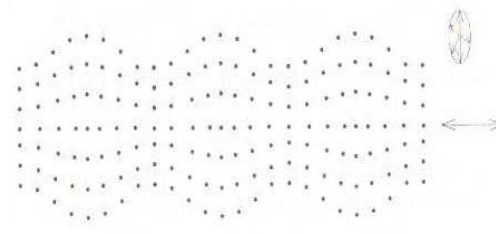
Obr. 2.23 – Povrchové vlny [1]

4) Deskové (Lambovy) ultrazvukové vlny

V materiálech, jejichž tloušťka je srovnatelná s délkou vlny, mohou vznikat tzv. deskové vlny. Rozlišují se deskové vlny ohybové (obr. 2.24) a dilatační (obr. 2.25). U obou druhů vln kmitají částice na povrchu stejně jako u povrchových vln. Rozdílné je kmitání částic uprostřed tloušťky. Při ohybových vlnách kmitají jako u příčných vln, kdežto u dilatačních jako u vln podélných.



Obr. 2.24 – Deskové (ohybové) vlny [1]



Obr. 2.25 – Deskové (dilatační) vlny [1]

2.5.4 Zdroje ultrazvuku [1, 2, 7]

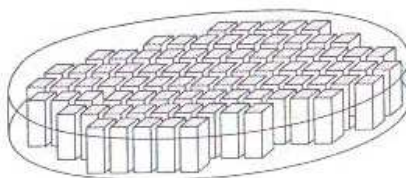
Jako zdroj, kterým je do zkoušeného materiálu vysíláno ultrazvukové vlnění, se používají ultrazvukové sondy. Jedná se o elektroakustické zařízení obsahující jeden nebo více měničů, které transformují elektrickou energii na energii mechanickou (ultrazvukovou) a naopak (vysílací sonda/přijímací sonda).

Pro účely defektoskopie jsou nejčastěji používány sondy s piezoelektrickým měničem a v některých případech také sondy s magnetostrikčním měničem.

Piezoelektrické měniče

Piezoelektrické měniče jsou založeny na principu přímého a nepřímého piezoelektrického jevu. Přímý jev popisuje vznik elektrického napětí na elektrodách měniče při jeho mechanické deformaci. Destička je deformována tlakem vlivem dopadajících ultrazvukových vln. Nepřímý jev popisuje vznik deformace destičky měniče při přivedení elektrického napětí na jeho elektrody.

Piezoelektrický měnič (obr. 2.26) tvoří tenká kruhová nebo obdélníková destička, vytvořená z malých pravoúhlých elementů z piezoelektrického materiálu (nejčastěji piezokeramika). Tato destička je opatřena elektrodami. Po přivedení elektrického napětí na elektrody dochází k deformaci destičky (k jejímu kmitnutí) ve směru její tloušťky, čímž dochází ke generování ultrazvukových vln. V opačné situaci při mechanickém rozkmitání destičky vlivem dopadajících ultrazvukových vln, vzniká na elektrodách měniče elektrické napětí.



Obr. 2.26 – Schématické piezoelektrického měniče [1]

Druhy ultrazvukových sond

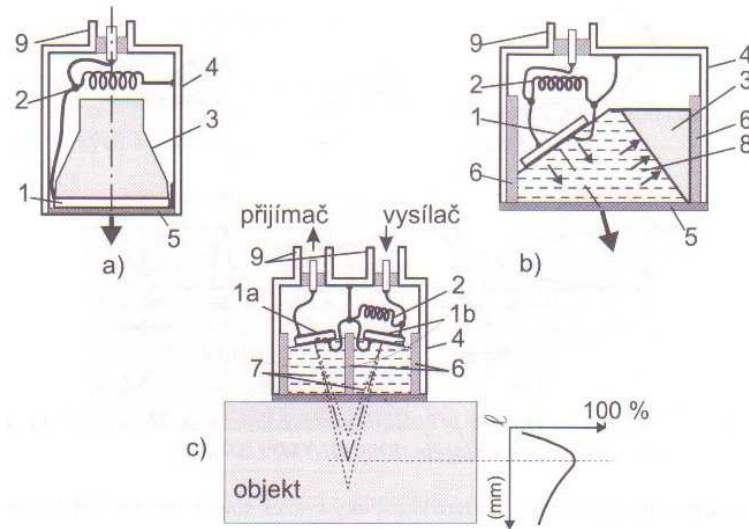
Podle stupně tlumení a citlivosti se rozlišují sondy širokopásmové a úzkopásmové. Širokopásmové sondy mají velký stupeň tlumení, tzn. že jsou velmi tlumené a tím mají horší citlivost. Kromě toho se vyznačují dobrou hloubkovou rozlišovací schopností. Úzkopásmové sondy mají menší stupeň tlumení, lepší citlivost, ale naproti tomu mají horší rozlišovací schopnost.

Podle konstrukčního provedení se rozlišují tři základní typy sond:

- a) **přímé** – vysílají ultrazvukové (obvykle podélné) vlny kolmo k povrchu zkoušeného materiálu. Tyto sondy (obr. 2.27a) jsou vhodné na zkoušení objektů s dostatečně rovným povrchem pro umístění sondy a s vadami rovnoběžnými vzhledem k povrchu.
- b) **úhlové** – vysílají příčné ultrazvukové vlny do zkoušeného materiálu pod určitým úhlem. Obsahují lomový klín, jehož dosedací plocha tvoří s povrchem zkoušeného materiálu akustické rozhraní, na kterém dochází k lomu ultrazvukových vln. Úhlové sondy (obr. 2.27b) se vyrábějí s úhly lomu 35° , 45° , 60° a 70° . Používají se především na zkoušení svarových spojů.

Přímé i úhlové sondy mohou být konstruovány buď jako jednoměničové nebo dvojité. Společnou nevýhodou obou typů jednoměničových sond je, že mají značné tzv. mrtvé pásmo. To je vzdálenost od sondy, ve které nelze zjistit výskyt vady.

- c) **dvojitě** – jsou tvořeny dvěma akusticky oddělenými měniči (obr. 2.27c), které jsou uloženy v jednom tělese. Jeden měnič slouží jako vysílač a druhý jako přijímač ultrazvukových vln. Výhodou dvojitých sond je, že mají teoreticky nulové mrtvé pásmo. Proto se používají na zjišťování vad nacházejících se blízko pod povrchem zkoušeného materiálu a na měření tloušťky materiálu.



Obr. 2.27 – Ultrazvukové piezoelektrické sondy [2]

a) přímá sonda, b) úhlová sonda, c) dvojitá sonda,

1 – piezoelektrický měnič, 1a – přijímací měnič, 1b – vysílací měnič,

2 – přizpůsobovací cívka, 3 – tlumící těleso, 4 – pouzdro sondy, 5 – ochranná vrstva,

6 – akustická izolace, 7 – předsádka, 8 – lomový klín, 9 - konektor

Kromě uvedených základních typů sond existují ještě speciální typy sond. Mezi ně patří např. fokusující sondy, sondy s proměnlivým úhlem, odvalovací sondy, skupinové sondy aj.

2.5.5 Metody ultrazvukové defektoskopie

Pro zjišťování vad v materiálu nebo výrobku se používají dvě základní zkušební metody a to:

- odrazová metoda
- průchodová metoda

Odrazová metoda

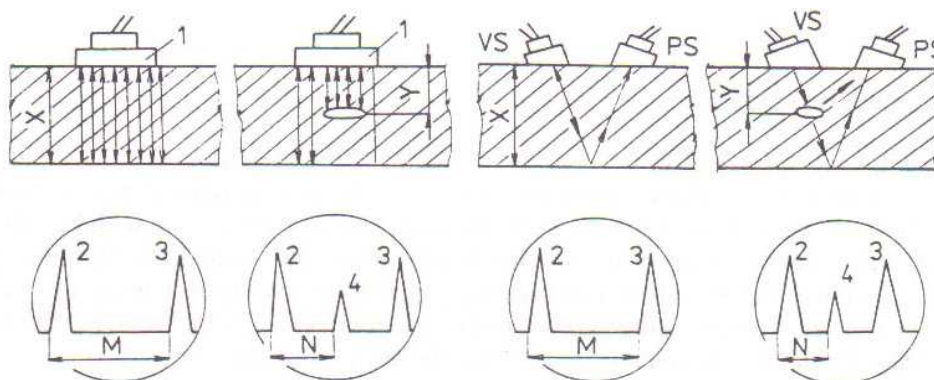
Principem odrazové metody (obr. 2.28) je zjišťování odrazů ultrazvukových impulsů (tzv. ech), které jsou způsobeny vadami materiálu. Vysílací sondou vyslané krátké ultrazvukové impulsy se odrážejí od protilehlého povrchu zkoušeného objektu a vracejí se zpět do vysílací sondy, jenž je současně i přijímačem (provoz jednosondový), nebo do samostatné přijímací sondy (provoz dvousondový), kde vytváří echo o rozteči M , která je úměrná tloušťce zkoušeného objektu X . Jestliže zkoušený objekt obsahuje vadu, objeví se mezi počátečním (2) a koncovým (3) echem echo poruchové (4). Vzdálenost vady od povrchu (Y) zkoušeného objektu se určuje z doby příchodu echa

po vyslání ultrazvukového impulsu a je tedy úměrná vzdálenosti (N) mezi počátečním (2) a poruchovým echem (4). Velikost vady se určuje z velikosti amplitudy echa.

Nevýhodou odrazové metody je omezené zjišťování vad nacházejících se v blízkosti povrchu zkoušeného materiálu. To je způsobeno mrtvým pásmem. Proto není tato metoda vhodná pro kontrolu tenkých materiálů. V případě použití dvojité sondy lze dosáhnout zlepšení zjistitelnosti vad nacházejících se v blízkosti povrchu materiálu, protože teoreticky nezjišťuje mrtvé pásmo způsobené vysílacím impulsem.

Výhodou odrazové metody je její značná citlivost, dále poměrně přesné určení místa vady materiálu. Další výhodou je, že pro provedení zkoušky stačí přístupnost pouze z jedné strany objektu.

Odrazová metoda je vhodná pro kontrolu materiálů o tloušťce více jak 10 mm, dále k měření tlouštěk. [1, 3, 7]



Obr. 2.28 – Princip odrazové metody [3]

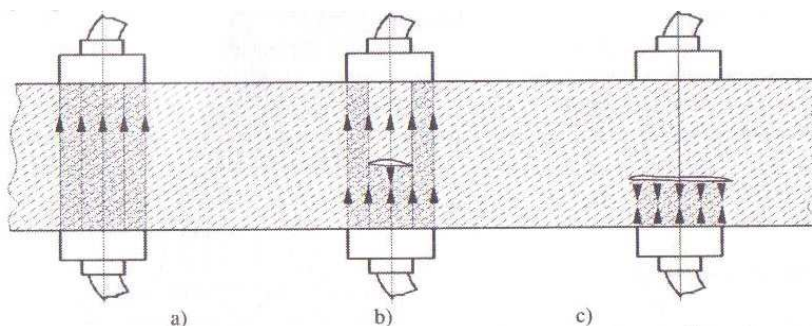
Průchodová metoda

Základem této metody je měření hodnoty ultrazvukové energie, která projde zkoušeným objektem. Při měření se pracuje se dvěma sondami umístěnými souose na protilehlých stranách zkoušeného objektu. Jedna sonda vysílá ultrazvukové vlnění a druhá sonda přijímá jeho část prošlou materiálem (obr. 2.29). Vyskytne-li se v materiálu vada, dochází na její ploše k odrazu vysílaných ultrazvukových vln a za vadou vzniká stín. Do přijímací sondy pak přichází menší hodnota energie. Výskyt vady se zjišťuje porovnáním hodnot energie prošlé neporušeným materiálem a materiálem s vadou.

Použitelnost této metody je omezená pouze na součásti s vhodnými protilehlými povrchy. Další nevýhodou je menší rozlišovací schopnost. Rozeznání vady je závislé na

její hloubce a na ohybu ultrazvukových vln za vadou. V případě, že se vada nachází ve větší vzdálenosti od přijímací sondy a její průřez je menší než průřez svazku ultrazvukových vln, potom dochází následkem ohybu vlnění v určité vzdálenosti za vadou k uzavření akustického stínu a přijímací sonda zaznamená stejnou hodnotu energie jako v místě bez vady.

Výhodou průchodové metody je, že ultrazvuk v porovnání s odrazovou metodou prochází poloviční dráhu a tím se tedy méně zeslabuje. Proto je tato metoda vhodná pro zkoušení těžko prozvučitelných materiálů, jako je například pryž. Dále se používá při kontrole materiálů menších tloušťek (tenkých plechů, plátovaných materiálů, ložiskových pánví apod.). [1, 3, 7]



Obr. 2.29 – Identifikace vady průchodovou metodou [4]
a) materiál bez vady, b) materiál s vadou menší než je svazek ultrazvukových vln,
c) materiál s vadou menší než je svazek ultrazvukových vln

2.5.6 Postup při ultrazvukové zkoušce

V této části budou obecně uvedeny základní kroky, které jsou prováděny při ultrazvukové zkoušce a podrobnější popis bude uveden v praktické části této bakalářské práce.

Postup zkoušky se skládá z těchto kroků:

- 1) úprava povrchu zkoušeného objektu
- 2) volba způsobu zkoušky
- 3) volba typu sondy
- 4) kalibrace ultrazvukového přístroje
- 5) vlastní měření
- 6) vyhodnocení

3 TYPY VAD ZJISTITELNÉ NEDESTRUKTIVNÍMI ZKOUŠKAMI

3.1 Pojem vady a základní dělení vad [1, 7]

Vada (necelistvost, nehomogenita, diskontinuita apod.) materiálu nebo výrobku je každá odchylka rozměrů, tvaru, hmotnosti, vzhledu, makrostruktury, mikrostruktury a jiných veličin od vlastností předepsaných technickými normami, technickými podmínkami, případně smluvním vzorem.

Vady materiálů a výrobků lze třídit podle různých hledisek: druhu vad, příčin vzniku, způsobu a stádia jejich zjišťování a dalších kritérií.

Zde je použito třídění vad podle jejich druhu, protože tento způsob třídění lze považovat za přehledný a v technické dokumentaci za obvyklý (tab. 3.1).

Charakteristiky vad jednotlivých výrobků jsou uváděny v příslušných státních, evropských a světových normách.

Tab. 3.1 – Základní třídění vad do skupin a jejich všeobecný popis [1]

Skupina vad		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 požadavku na předepsané hodnoty mechanických, technologických a fyzikálních vlastností výrobku, nedodržení předepsané makrostruktury, mikrostruktury apod.

3.2 Vady jako anomálie fyzikálního prostředí [1]

Jednotlivé metody nedestruktivního testování indikují vady materiálů a výrobků jako definované odchylky od dohodnutých standardů. Z věcného hlediska vděčí nedestruktivní testování za svou schopnost rozpoznávat vady tomu, že představují jakousi anomálii materiálu jako fyzikálního prostředí, kterou daná metoda zkoumá (určuje) pro ni specifickým způsobem (např. ultrazvukem, rentgenovým zářením apod.).

3.2.1 Prvkové složení

Z hlediska prvkového složení je anomálií heterogenita, odlišnost od prvkového složení nebo odlišnost od nominálního složení. Ultrazvuk reaguje na heterogenitu prvkového složení v důsledku toho, že prvkové složení ovlivňuje hustotu a elastické vlastnosti, a tím i rychlost šíření ultrazvukových vln, jenž se šíří daným materiálem a v důsledku toho také jejich rozptyl odrazem i lomem a stejně tak i koeficient jejich absorpce. Radiografie na takovou to různorodost reaguje proto, že prvkové složení určuje koeficient absorpce (rozptylu) rentgenového záření i gama záření. Anomálie prvkového složení způsobuje také změny elektrického odporu a magnetické indukce a v důsledku toho i změny vířivých proudů a rozptylových magnetických polí.

Nejvýraznější indikace samozřejmě způsobují vady celistvosti, které neobsahují žádný materiál, takže rozdíly hustoty, rychlosti šíření a koeficientu absorpce oproti matici jsou tady maximální.

3.2.2 Heterogenita

Heterogenita materiálu vzniká již při jeho výrobě (litím, tvářením či svařováním nebo jakoukoliv jinou technologií) a je tedy v podstatě všudypřítomná. Ne každá heterogenita je však vadou a v mnohých případech je to právě nestejnorodost materiálu, která je podmínkou požadovaných parametrů jeho užitných vlastností.

Významným zdrojem strukturní heterogenity je plastická deformace. Takto vyvolaná strukturní heterogenita se dále prohlubuje a rozvíjí rekrystalizací, jenž záleží na stupni deformace. Je-li deformace v různých oblastech různá, pak i rekrystalizace v těchto oblastech proběhne různě a výsledkem bude nestejnorodá struktura.

Nestejnorodost materiálu, tedy jeho složení a struktura, se v daném výrobku liší místo od místa a postihuje ve větší či menší míře celý jeho objem. A jako taková se heterogenita studuje různými tomografickými metodami.

3.2.3 Drsnost

Povrch materiálu, tedy vnější rozhraní mezi ním a jeho okolím, je extrémní anomálií hmotného prostředí. Povrchem materiál „končí“, následuje (z hlediska materiálu) prostředí (ať už pevné, kapalně nebo plynné), ve kterém se materiál nachází a které na něj působí. Toto působení a stejně tak příslušná odezva materiálu závisí na mikrogeometrii, drsnosti jeho povrchu, nebo jak se někdy uvádí, na povrchovém reliéfu.

Žádný povrch materiálu není nikdy úplně rovný. Jsou na něm různě velké a všelijak rozmístěné „výstupky“ a „důlky“. Tyto „důlky“ figurují jako vruby, které ovlivňují rozložení deformace a napětí ve svém okolí. Vruby, jakožto koncentrátory napětí, mají velký vliv na některé mechanické vlastnosti materiálu, a to zejména na jeho životnost a mez únavy při cyklickém namáhání. Materiál samozřejmě obsahuje i celou řadu vnitřních koncentrátů napětí (např. vměstky, dutiny apod.). Mnohem více vrubů je však na povrchu součásti než uvnitř a únavové trhliny, jenž z nich vycházejí, jsou příčinou 90 % všech poruch strojních částí. Drsnost povrchu hraje také významnou roli při jeho poškozování erozí, abrazí, kavitací, vibracemi, kontaktem a korozí.

Drsnost povrchu, jako významná charakteristika této anomálie fyzikálního prostředí materiálu, citlivě reaguje na jeho změny a také na změny jeho okolí. Mění se následkem vzájemného působení funkčních povrchů, účinky okolního prostředí anebo deformačními procesy, jenž probíhají uvnitř materiálu, aby následně vytvořily na povrchu skluzové pásy. Změnou povrchového reliéfu dochází také ke změně vlastností materiálu a jeho odezvy na různé vnější podněty, což dále ovlivňuje změny povrchového reliéfu při dalším provozování atd.

Drsnost povrchu, jeho nerovnost a různé povrchové vady lze zkoumat vizuální metodou, kapilární metodou nebo metodami založenými na magnetické a elektrické indukci. Další možností je měření drsnosti pomocí dotykových sond.

3.3 Charakteristika necelistvostí a makroskopických vad [1]

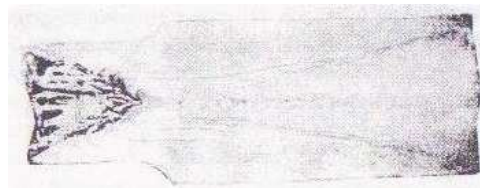
Bývají příčinou řady vad strojních a hutních výrobků a dají se spolehlivě zjistit v kterékoliv fázi výroby.

Typickými představiteli jsou vycezeniny, vločkové trhliny, makroskopické vměstky. Dále také vady, které mají na výrobku stejný konečný vzhled, ale mohou mít řadu odlišných prvotních příčin. Platí to hlavně o vadách povrchových, trhlinách, plenách, do jisté míry i o dutinách a dvojnostech, které často mění svůj charakter tvářením za tepla i za studena.

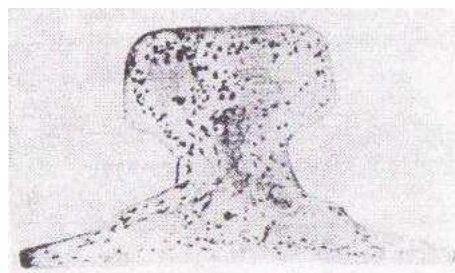
3.3.1 Vycezeniny (segregace)

Charakteristika

Vycezeniny jsou makroskopické oblasti se zvýšeným obsahem vměstků, síry, fosforu, uhlíku, případně dalších prvků, způsobené segregací při tuhnutí oceli. Různé způsoby uspořádání vycezenin jsou zobrazeny na obr.3.1 a obr.3.2.



Obr. 3.1 – Rozložení V-vycezenin v ocelovém ingotu [1]



Obr. 3.2 – Rozložení segregací jako jednotlivé body ve výkovku [1]

Způsob zjišťování nedestruktivními zkouškami

Pro kontrolu materiálu z hlediska přítomnosti vycezenin se používá ultrazvuková zkouška. Výraznější vycezeniny se při ultrazvukové kontrole projevují zpravidla členitými vadovými echy, které při pohybu sondy podél vývalku plynule mění polohu a intenzitu.

3.3.2 Dutiny

Mezi dutiny se patří zejména:

- staženiny
- bubliny

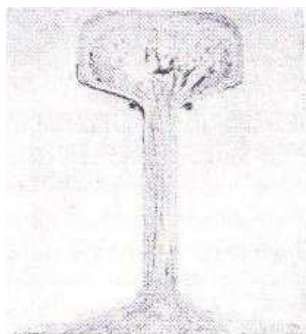
Staženiny

Charakteristika

Staženiny vznikají při tuhnutí ocele v kokilách vlivem zmenšování objemu. Ve válcových výrobkách mají tvar rozsáhlé necelistvosti, probíhající obvykle v osové oblasti vývalku v podélném směru. Na příčném řezu vývalkem mají vzhled nepravidelné dutiny (u vývalků velkých průřezů) nebo nepravidelně rozvětvené i tvarované trhliny (u vývalků malých průřezů jako jsou tyče a dráty). U ploché oceli a tlustých plechů se staženiny projevují jako rozdvojení. Na lomové ploše lze staženinu rozeznat podle výstupkovité nepravidelnosti lomové plochy v osové oblasti, někdy také dochází k podélnému rozštěpení lámavé tyče. U tvarových vývalků dochází následkem staženiny k jejich vyboulení nebo jiné deformaci. Staženiny mohou být zcela i z části vyplněny struskou (obr. 3.3, 3.4).



Obr. 3.3 – Soustředná staženina a plynové bubliny v ocelovém ingotu [1]

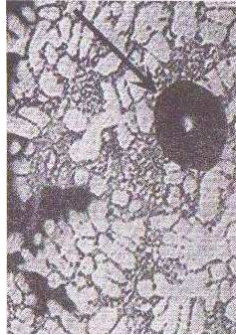


Obr. 3.4 – Makrovýbrus příčného řezu kolejnicí se stopami staženiny [1]

Bubliny

Charakteristika

Bubliny jsou dutiny různých tvarů a velikostí, které vznikají přítomností plynu (např. vzduch, vodík apod.) v odlitcích. Bublina plynu se nestačí uvolnit z taveniny a zůstane ve ztuhlém odlitku (obr. 3.5). [8]



Obr. 3.5 – Vodíková bublina (označena šipkou) v odlitku ze slitiny AlSi10 [8]

Způsob zjišťování nedestruktivními zkouškami

Zasahuje-li vada až do čelní plochy vývalku, je zjistitelná zrakem, tedy vizuální metodou. Lze ji také zjistit při dělení vývalku na úpichy nebo přířezy. U kompaktních vývalků, které se nedělí, jsou staženiny zjistitelné prozařovacími nebo ultrazvukovými metodami.

3.3.3 Trhliny

Rozeznávají se tyto druhy trhli:

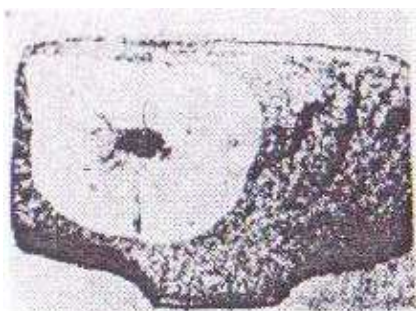
- vložkové
- podélné
- příčné

Vložkové trhliny

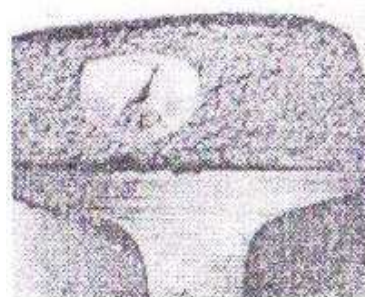
Charakteristika

Vložkové trhliny - vločky - jsou vnitřní plošné nečistosti o tloušťce jen několik desetin milimetru. Na lomové ploše mají vločky vzhled stříbrně lesklých

plošek obvykle eliptického nebo kruhového obrysu, ostře ohraničených od okolní plochy lomu. Příklady vzhledu vločkových trhlin jsou na obr. 3.6 a obr. 3.7.



Obr. 3.6 – Vločková trhlina v hlavě kolejnice [1]



Obr. 3.7 – Vločky v kolejnici [1]

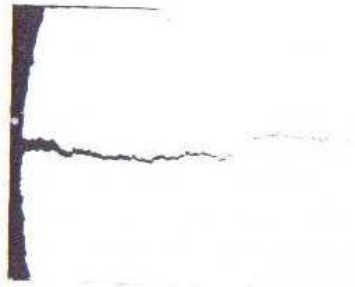
Způsob zjišťování nedestruktivními zkouškami

Vločky jako plošné necelistvosti se spolehlivě detekují ultrazvukovými zkouškami pomocí impulsních defektoskopů. Na obrazovce defektoskopu se vločky projevují jako výrazná vadová echa ve středové oblasti materiálu, pro něž je typická ostře ohraničená plocha. Při pohybu zkušební sondou (nejčastěji se používají dvojité čelní sondy) podél vývalku se objevují i mizí skokově. Tím se odlišují od povrchových ech staženin, vycezenin nebo tvářecích trhlin, jenž mají na obrazovce defektoskopu při pohybu sondou delší trvání.

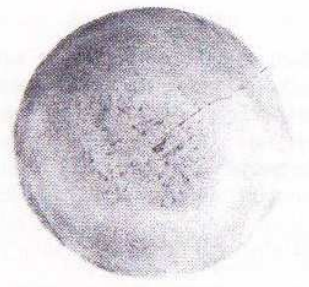
Podélné trhliny (praskliny)

Charakteristika

Podélné trhliny jsou povrchové necelistvosti výrobků probíhající přímočaře a rovnoběžně s podélnou osou vývalku. Mohou se vyskytovat v nejrůznějších rozměrech, od vlasových až po široce rozevřené, s hloubkou od setin do desítek milimetrů. Ve většině případů jsou orientovány kolmo nebo šikmo k povrchu. Vyskytují se na stěnách i hranách vývalků. Ukázky trhlin, které vznikly následkem materiálového pnutí, jsou na obr. 3.8 a obr. 3.9.



Obr. 3.8 – Podélná trhlina, která vznikla pnutím v drátu



Obr. 3.9 – Podélná prasklina z pnutí na železniční nápravě

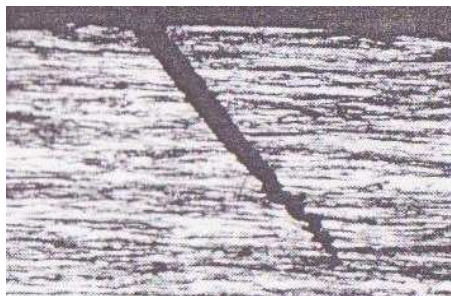
Způsoby zjišťování nedestruktivními zkouškami

Podle rozměrů je možné trhliny (praskliny) odhalit vizuální kontrolou a rozevřené trhliny i kapilárními metodami. Nejčastěji se přítomnost trhlín zjišťuje magnetickými a indukčními metodami. Magnetické metody se používají pouze na feromagnetický materiál.

Příčné trhliny (praskliny)

Charakteristika

Příčné trhliny jsou povrchové necelistvosti různého rozsahu a hloubky, jenž mají boky vláknité, zrnité i složitěji členěné, a které jsou orientované kolmo na směr tváření (vláken). Vyskytují se stejně jako podélné trhliny na hranách i stěnách výrobků. Typický vzhled příčné trhliny je zobrazen na obr. 3.10.



Obr. 3.10 – Příčná trhlina, která vznikla pnutím v pružinovém drátu [1]

Způsoby zjišťování nedestruktivními zkouškami

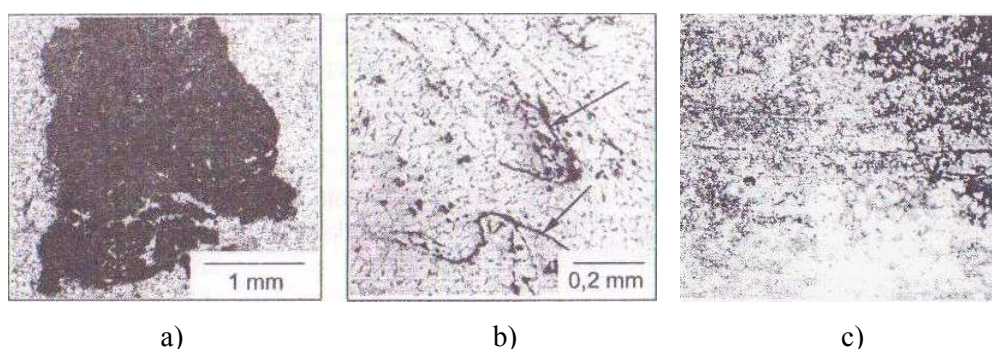
Příčné trhliny se zjišťují stejnými metodami jako trhliny podélné.

3.3.4 Makroskopické nekovové vměstky

Charakteristika

Za makroskopické nekovové vměstky se označují nežádoucí cizorodé nekovové částice, shluky, žíly nebo řetězce částic, které jsou viditelné pouhým okem. V průřezu se vyskytují na různých místech a to jednotlivě i hromadně. Jsou bělavé, žlutavé, šedé až černé.

Na obr. 3.11a, b jsou uvedeny příklady vměstků v hliníkových slitinách, na obr. 3.11c je vzhled podpovrchových vměstků.



Obr. 3.11 – Příklady vměstků: a) keramický vměstek (tmavý) ve slitině AlSi10, b) oxidické vměstky (označeny šipkami) ve slitině AlSi7, c) podpovrchové vměstky (vady vzniklé z povrchových vměstků na povrchu plechů [1, 8])

Způsoby zjišťování nedestruktivními zkouškami

Makroskopické vměstky větších rozměrů na povrchu výrobku jsou viditelné pouhým okem a pro jejich zjištění se tedy používá vizuální kontrola. Vměstky uvnitř materiálu se zjišťují pomocí ultrazvukových zkoušek.

3.4 Vady mikrostruktury [1]

3.4.1 Způsoby zjišťování nedestruktivními zkouškami

Rozvojem ultrazvukových metod lze v dnešní době detekovat vady mikrostruktury využitím útlumu ultrazvukových vln. Je možné zjišťovat velikost zrna v tvářené feriticko-perlitické oceli, výskyt Widmannstättenovy struktury, řádkovité struktury, u některých ocelí dokonce mezilamelární vzdálenost perlitu.

Strukturální anomálie je rovněž možné detekovat pomocí metody vířivých proudů.

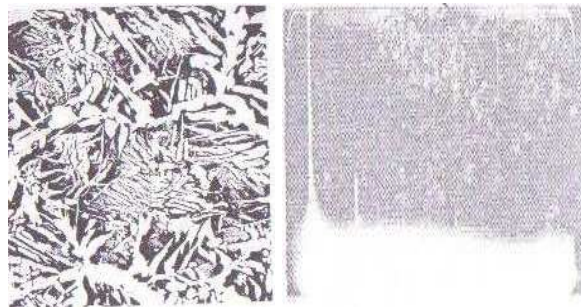
3.4.2 Strukturní vady

Zde budou uvedeny vybrané vady mikrostruktury, které se nejčastěji vyskytují v ocelových tvářených hutních výrobcích ve stavu přírodním, žíhaném normalizačně nebo na měkko tak, jak se obvykle dodávají z hutí.

Widmannstättenova struktura

Charakteristika

Widmannstättenova struktura je vedle karbidického síťoví vyloučeného po hranicích austenitických zrn charakteristická deskovitými a pilovitými útvary, vyrůstajícími především z hranic zrn nebo síťoví, ale tvořící se uvnitř zrna austenitu. V rovině výbrusu se deskovité útvary jeví jako jehlice, pilovité útvary pak mají trojúhelníkový průřez. Vzhled Widmannstättenovy struktury v materiálu železniční nápravy je na obr. 3.12. Hlavními předpoklady pro vznik této struktury je přehřátí (hrubé zrno austenitu), současně vhodný obsah uhlíku a příznivé přechlazení austenitu. Důsledkem Widmannstättenovy struktury je u ocelí používaných jen v normalizovaném stavu zhoršení obrobiteľnosti a nižší houževnatost.



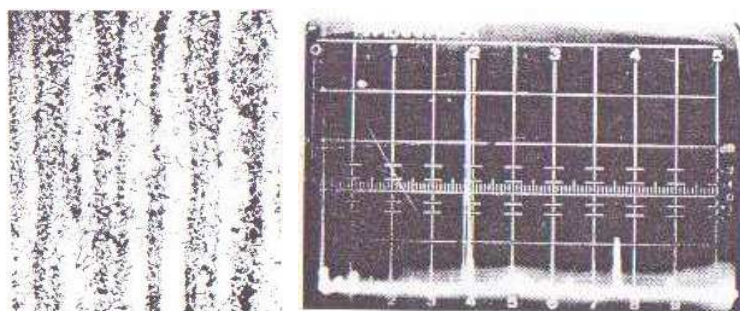
Obr. 3.12 – Widmannstättenova struktura v materiálu železniční nápravy a vzhled oscilogramu při zkoušení ultrazvukem [1]

Řádkovitá struktura (řádovitost)

Charakteristika

Řádkovitá struktura je charakterizována celkem nepravidelným uspořádáním přítomných strukturních částí do výrazných řádků. Příklad řádkovité struktury je uveden na obr. 3.13, kdy se ve struktuře střídají různě široké řádky feritu a perlitu. Základní

příčinou vzniku řádkovitosti je chemická nestejnorodost, jenž vzniká při tuhnutí oceli v ingotu, a která poté podmiňuje vznik oblastí s více či méně odlišným chemickým složením, protažených do pruhů ve směru toku materiálu při tváření za tepla. Řádkovitost vytváří podmínky pro vznik trhlin při kalení a nestejnorodé struktury po kalení. Dále řádkovitost nepříznivě ovlivňuje obrobiteľnosť hotových výrobku a zhoršuje jejich vlastnosti v příčném směru.

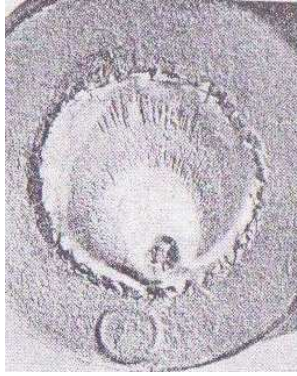


Obr. 3.13 – Řádkovitá struktura v materiálu železniční nápravy a vzhled oscilogramu při zkoušení ultrazvukem [1]

3.5 Únavový lom [1]

Charakteristika

Rotující strojní součásti, jako osy, hřídele a nápravy, jsou za provozu vystaveny cyklicky opakovanému namáhání, které vzniká při každé otáčce, dosahuje maximálních a poté opět minimálních hodnot, přičemž dochází ke změně napětí z tahového na tlakové a naopak. Spodní vlákna zatížené nápravy jsou natahována, horní vlákna jsou stlačována a tato napětí se mění v průběhu každé otáčky. Při cyklickém namáhání dochází po určité době v důsledku koncentrace napětí k porušení součásti. Příčinou porušení je únava materiálu. Charakteristickým důsledkem únavy materiálu je vznik únavového lomu (obr. 3.14).



Obr. 3.14 – Typický vzhled únavového lomu hřídle [1]

Způsoby zjišťování nedestruktivními zkouškami

Únavové lomy se zjišťují různými ultrazvukovými metodami, např. podle předepsaných předpisů a metodik.

4 POUŽITÍ ULTRAZVUKOVÉHO DEFEKTOSKOPU

Náplní této části bakalářské práce je seznámení s univerzálním ultrazvukovým defektoskopem DIO 562, změření zkušebních vzorků a vytvoření laboratorní úlohy, kterou by bylo možné využít při výuce.

4.1 Univerzální ultrazvukový defektoskop DIO 562 [9]

Defektoskop DIO 562 (obr. 4.1) je lehký a kompaktní ultrazvukový zkušební přístroj, který je určen pro:

- lokalizaci vady v materiálu a určení její velikosti
- měření tloušťky stěny
- možné použití pro mechanizované či poloautomatizované zkušební zařízení
- zkoušení spojení materiálů



Obr. 4.1 – Univerzální ultrazvukový defektoskop DIO 562

Základní technická data

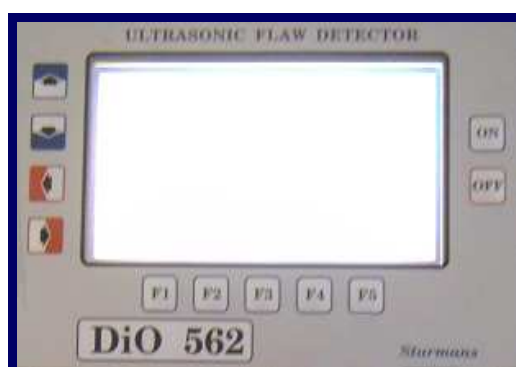
Tab. 4.1 – Základní technická data

Specifikace	Hodnota
Rozměry	235 x 145 x 55 mm
Hmotnost (s akumulátorem)	2,4 kg
Napájení	akumulátor 12 V, síťový napáječ 220 V
Teplotní rozsah	- 20° C až + 40° C
Rozlišení měření	0,01 mm
Rozsah nastavení rychlosti šíření UZ vln	1000 m/s až 9999 m/s

4.1.1 Stručný popis defektoskopu

Čelní panel

Na čelním panelu (obr. 4.2) jsou kromě displeje umístěna jednotlivá membránová ovládací tlačítka. Po pravé straně displeje jsou umístěna tlačítka, kterými se přístroj zapíná („**ON**“) a vypíná („**OFF**“). Na opačné straně přístroje jsou směrová tlačítka pro ovládnání pohybu kurzoru a pro práci s Menu.



Obr. 4.2 – Čelní panel ultrazvukového defektoskopu DIO 562

Tlačítko „↑“ (šipka nahoru)

Membránové tlačítko „šipka nahoru“ (dále bude používáno označení „↑“) slouží pro pohyb kurzoru směrem nahoru (a v některých případech také doleva).

Tlačítko „↓“ (šipka dolů)

Membránové tlačítko „šipka dolů“ (dále bude používáno označení „↓“) slouží pro pohyb kurzoru směrem dolů (a v některých případech také doprava).

Tlačítko „←“ (šipka doleva)

Membránové tlačítko „šipka doleva“ (dále jen „←“) slouží:

- pro přepínání menu v případě, že je kurzor v pravém horním rohu
- pro snižování zobrazené hodnoty
- jako tlačítko „OFF“ (vypínání nastavené funkce)

Tlačítko „→“ (šipka doprava)

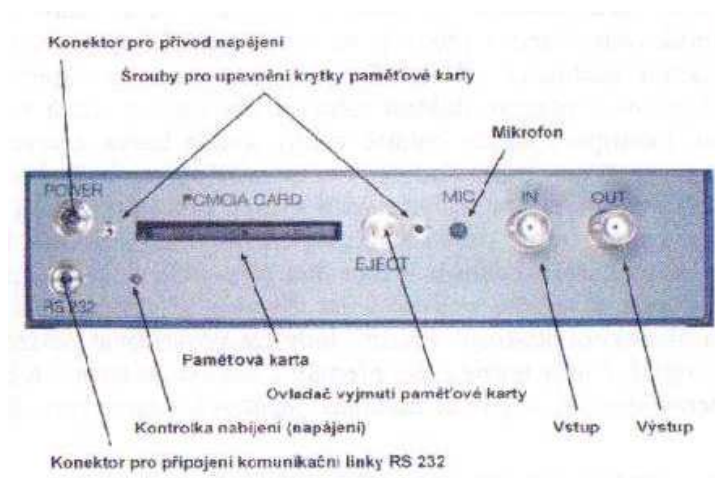
Membránové tlačítko „šipka doprava“ (dále jen „→“) slouží:

- pro přepínání menu v případě, že je kurzor v pravém horním rohu
- pro zvyšování zobrazené hodnoty
- jako tlačítko „ON“ (zapínání nastavené funkce)

Pod displejem jsou umístěna funkční tlačítka („F1“ až „F5“), která jsou uživatelsky programovatelná pro urychlení nastavování přístroje. Tlačítko přemístí kurzor na předem naprogramovanou polohu jedním stiskem nebo dvojitiskem.

Horní panel

Na horním panelu (obr. 4.3) jsou kromě otvoru pro paměťovou kartu umístěny BNC konektory pro připojení ultrazvukových sond, konektor pro napájení a pro připojení komunikační linky RS 232.



Obr. 4.3 – Horní panel ultrazvukového defektoskopu DIO 562 [9]

Připojení ultrazvukových sond

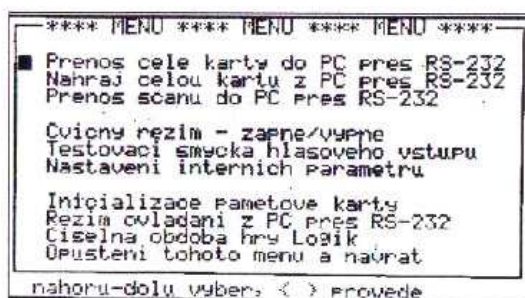
Jednoduché přímé a úhlové sondy (obecně sondy s jedním měničem) se připojují na konektor označený „IN“. Dvojité sondy se připojují na konektory „OUT“ a „IN“.

4.1.2 Menu přístroje – přehled

Ultrazvukový přístroj DIO 52 obsahuje „Konfigurační menu přístroje“, „Vstupní menu přístroje“ a čtyři „Pracovní menu přístroje“ pro ovládání jednotlivých parametrů či nastavení.

Konfigurační menu přístroje

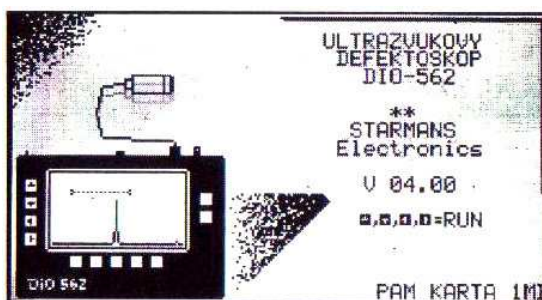
Do „Konfiguračního menu přístroje“ (obr. 4.4) je možné se dostat pouze při zapnutí přístroje při současném stisknutí tlačítka „↑“ a tlačítka „ON“.



Obr. 4.4 – Konfigurační menu přístroje [9]

Vstupní menu přístroje

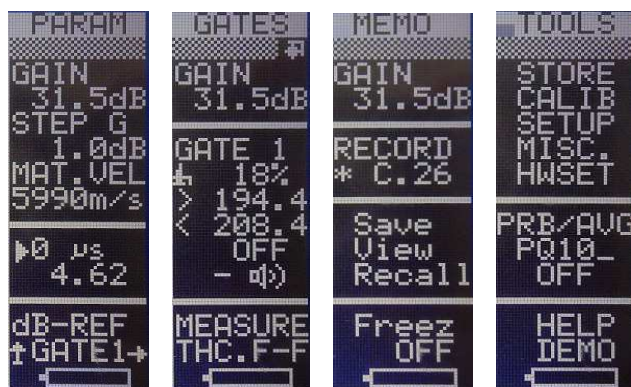
Po zapnutí přístroje se na displeji objeví „Vstupní menu přístroje“ (obr. 4.5). Zde jsou uvedeny základní informace o použité paměťové kartě a jaký je nainstalován software.



Obr. 4.5 – Vstupní menu přístroje [9]

Pracovní menu

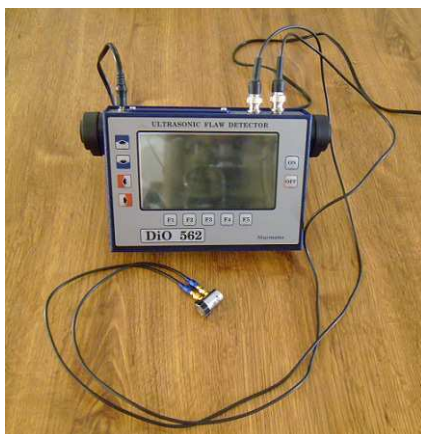
Po přechodu ze „Vstupního menu přístroje“ se na displeji objeví „Základní pracovní menu přístroje“ („PARAM“) (obr. 4.6). Kromě tohoto menu má přístroj ještě další 3 pracovní menu („GATES“, „MEMO“, „TOOLS“) (obr. 4.6). Pracovním menu a Podmenu (Submenu) se rozumí nabídka, která je zobrazena v pravé části displeje.



Obr. 4.6 – Jednotlivá pracovní menu

4.2 Postup měření

Měření bylo prováděno ultrazvukovým defektoskopem DIO 562 s dvojitou (dvouměničovou) čelní ultrazvukovou sondou PQ10-4C (obr. 4.7). Tato sonda byla použita z důvodu, že má teoreticky nulové mrtvé pásmo a umožňuje tedy zjišťování vad ležících blízko pod povrchem zkoušeného objektu.



Obr. 4.7 – Univerzální ultrazvukový defektoskop DIO 562 s dvojitou čelní sondou PQ10-4C

Postup měření se skládá z následujících kroků:

1) Připojení ultrazvukové sondy a kabelu napájení k defektoskopu

Dvojitá sonda se připojuje na BNC konektory „IN“ a „OUT“. Přívod napájení se připojuje na konektor „POWER“.

2) Zapnutí přístroje

Přístroj se zapíná tlačítkem „ON“. Poté je nutno vyčkat, až se na displeji vpravo dole objeví nápis RAM KARTA 1MB, následně se stiskne libovolné tlačítko se

symbolem šipky. Po stisknutí tlačítka je přístroj připraven k měření či zkoušení a je zobrazeno základní menu (nabídka) s názvem „PARAM“.

3) Nastavení přístroje

a) nastavení pro měření s příslušnou sondou

Podle typu použité sondy se musí vyvolat příslušný „Setup“, neboli „nastavení uložené v paměti“. To se provede v menu „TOOLS“ výběrem položky „SETUP“ pomocí tlačítek „↓“ nebo „↑“ a následným stiskem tlačítka „→“.

Pomocí tlačítek „↓“ a „↑“ se přesune kurzor na položku čísla paměti („# “), kde se tlačítkem „→“ nebo „←“ vybere položka „# 0“, pod kterou je uloženo nastavení sondy PQ10.

Následně se kurzor přesune na položku „LOAD“ a provede se vyvolání nastavení tlačítkem „→“. Správné vyvolání se potvrdí zobrazení názvu „PQ10“ v pravé horní části displeje.

b) nastavení rychlosti šíření ultrazvukových vln

Rychlost šíření ultrazvukových vln se nastavuje v menu „PARAM“ na položce „MAT.VEL“, respektive přímo na položce „xxx m/s“. Rychlost šíření se pomocí tlačítek „→“ nebo „←“ nastaví na hodnotu **5926 m/s**.

4) Ověření přesnosti měření

Pro zajištění přesnosti měření se ultrazvukové přístroje a ultrazvukové sondy ověřují prostřednictvím kalibračních měrek. Tyto měrky mají definovanou geometrii, materiál, jakost povrchu v souladu s příslušnými normami ČSN EN nebo ANSI/AWS.

Pro účely daného měření byla použita stupňová měrka (obr. 4.8), tj. měrka s odstupňovanou tloušťkou (měrka je odstupňována po 5 mm). Stupňová měrka je vhodná pro ověřování dvojité sondy a pro ověřování přesnosti při měření tloušťky materiálu.



Obr. 4.8 – Ověřování přesnosti měření na stupňové měrce

Postup při ověřování přesnosti měření:

a) nanesení prostředku akustické vazby na povrch měrky

Prostředek akustické vazby umožňuje bezprostřední styk ultrazvukové sondy se zkoušeným předmětem. Vrstva akustické vazby má být vždy nanášena rovnoměrně a o stejné tloušťce. Jako prostředek akustické vazby byla použita vazelína.

b) přiložení měřicí sondy na stupňovou měrku

Měřicí sonda se přikládá na nanesený vazební prostředek a jemně se přitlačí. Na měřicí sondu se musí působit vždy stejným přtlakem.

c) nastavení rozsahu časové základny přístroje

Rozsah časové základny se nastavuje na položce se symbolem „▶“ pod časovou základnou (časovou osou) tlačítka „→“ nebo „←“. Rozsah se nastavuje vždy větší než jsou rozměry zkoušeného objektu.

Symbol „◀“ na opačné straně časové základny umožňuje ovládat posun celého echogramu a tedy vyhledání vhodných ech.

d) nastavení zesílení nebo zeslabení přístroje

Z důvodu vhodného zobrazení velikosti ech se provádí jejich zesílení nebo zeslabení. To se nastavuje v menu „GATES“ nebo „PARAM“ na položce „xx.x dB“. Tlačítkem „→“ zvyšujeme a tlačítkem „←“ snižujeme hodnotu zesílení.

e) nastavení defektoskopu na režim měření „BOK – BOK“

Měření „BOK – BOK“, je měření „hrana – hrana“ a odměřuje se vždy od přední hrany prvního echa protínajícího první monitor k přední hraně echa protínajícího druhý monitor. Při nastavení tohoto měření se na displeji automaticky objeví dva monitory.

V menu „GATES“ se režim měření nastavuje pod položkou „MEASURE“. Pomocí tlačítek „→“ nebo „←“ se nastaví položka „THC.F–F“ („BOK – BOK“).

f) naměření hodnoty

První monitor „GATE 1“ se nastaví do oblasti druhého odraženého echa od měřky, druhý monitor „GATE 2“ se nastaví do oblasti prvního odraženého echa od měřky. Monitory se přepínají v menu „GATES“ na položce „GATE X“ (X je označení čísla monitoru).

Oblast monitoru se nastavuje v menu „GATES“ pomocí položek „>“ (nastavení začátku monitoru) a „<“ (nastavení konce monitoru). Položka s údajem „xx%“ slouží pro nastavení spínací úrovně (vertikální polohy) monitoru. Všechny položky se opět ovládají tlačítky „→“ a „←“. Vše je pro názornost ještě ukázáno na obrázku 4.9.

Údaj o změřené hodnotě je zobrazen v levém horním rohu displeje za symbolem měření S(F–F).

Pokud hodnota zobrazená na displeji neodpovídá rozměrům stupňové měřky, nastaví se pomocí položky „▶ 0 μs“ (zpoždění, kterým se eliminuje předdráha ultrazvuku v krytí sondy, předsázce nebo v plexiklínu u úhlových sond) hodnota zpoždění tak, aby hodnota na displeji odpovídala daným rozměrům měřky.



Obr. 4.9 – Nastavení oblasti monitorů

5) Vlastní měření

Vlastní měření se provádí ve stejných krocích, kromě nastavování režimu měření (protože to zůstává nastaveno), které jsou uvedeny v postupu ověřování přesnosti měření. Z tohoto důvodu zde budou uvedeny pouze jednotlivé kroky bez jejich popisu.

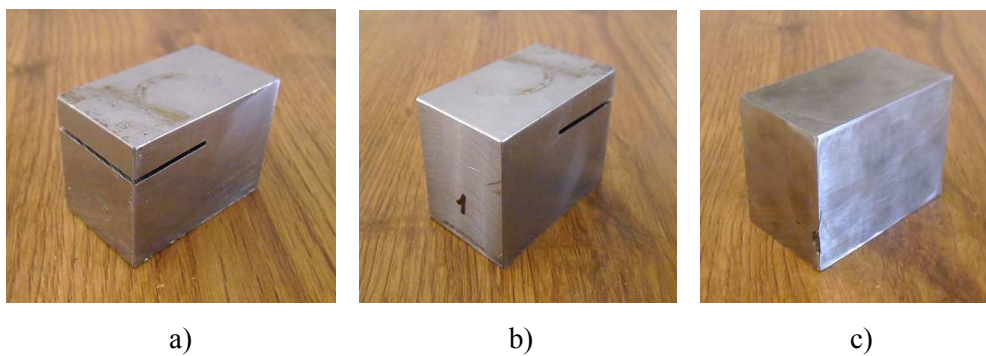
Poustup:

- a) nanesení prostředku akustické vazby na očištěný povrch vzorku
- b) přiložení měřicí sondy na povrch vzorku
- c) nastavení rozsahu časové základny přístroje
- d) nastavení zesílení nebo zeslabení přístroje
- e) naměření hodnot

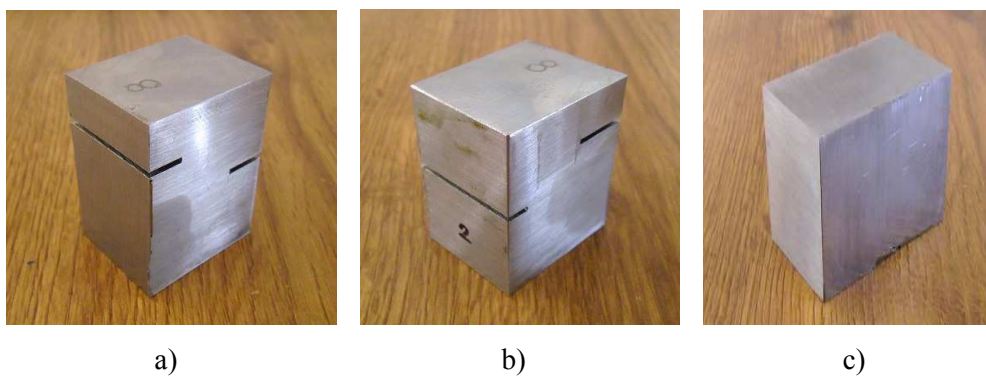
4.3 Zkušební vzorky

Zkušební vzorky tvoří výrobky z ocelolitin, do kterých byly udělány zářezy pomocí pásové pily. Rozměry takto upravených vzorků byly změřeny posuvným měřidlem a zapsány do příslušných tabulek (tab. 4.2, 4.3, 4.4 a 4.5). Pro potřeby zkušební úlohy byly poté vytvořené zářezy skryty pomocí svarů, jenž se následně obrousily na pásové brusce.

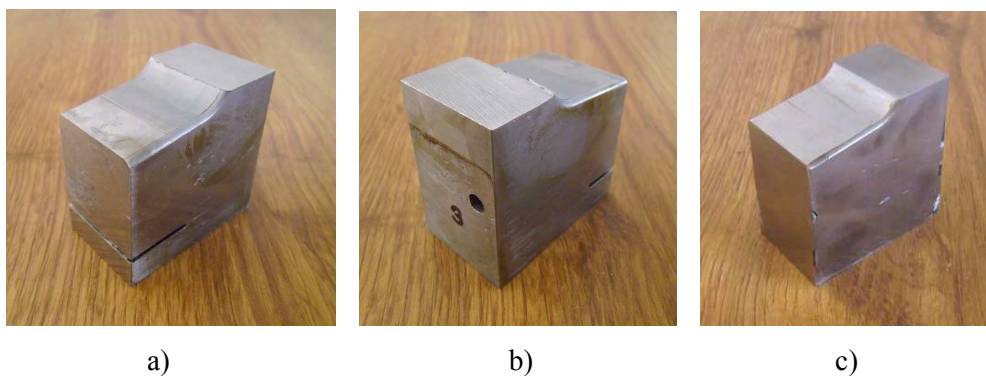
Zkušební vzorky se zářezy a jejich konečné podoby jsou zobrazeny na následujících obrázcích (obr. 4.10, 4.11, 4.12 a 4.13).



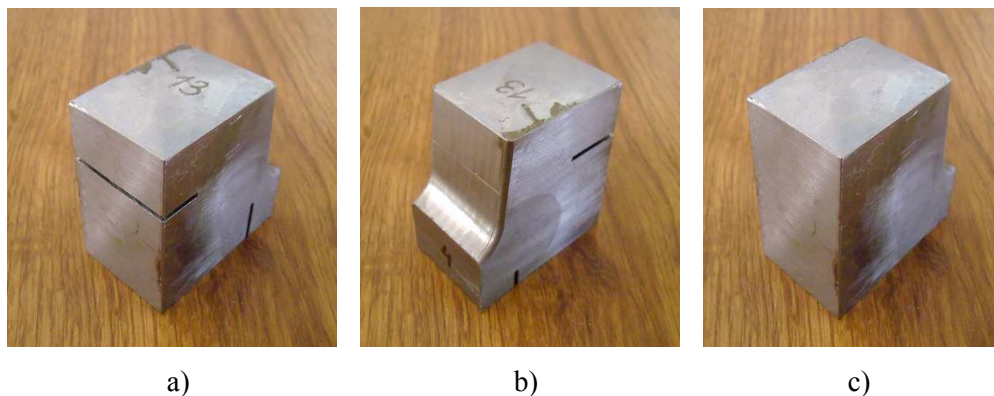
Obr. 4.10 – Zkušební vzorek č. 1
a) čelní pohled, b) zadní pohled, c) konečný vzorek



Obr. 4.11 – Zkušební vzorek č. 2
a) čelní pohled, b) zadní pohled, c) konečný vzorek



Obr. 4.12 – Zkušební vzorek č. 3
a) čelní pohled, b) zadní pohled, c) konečný vzorek



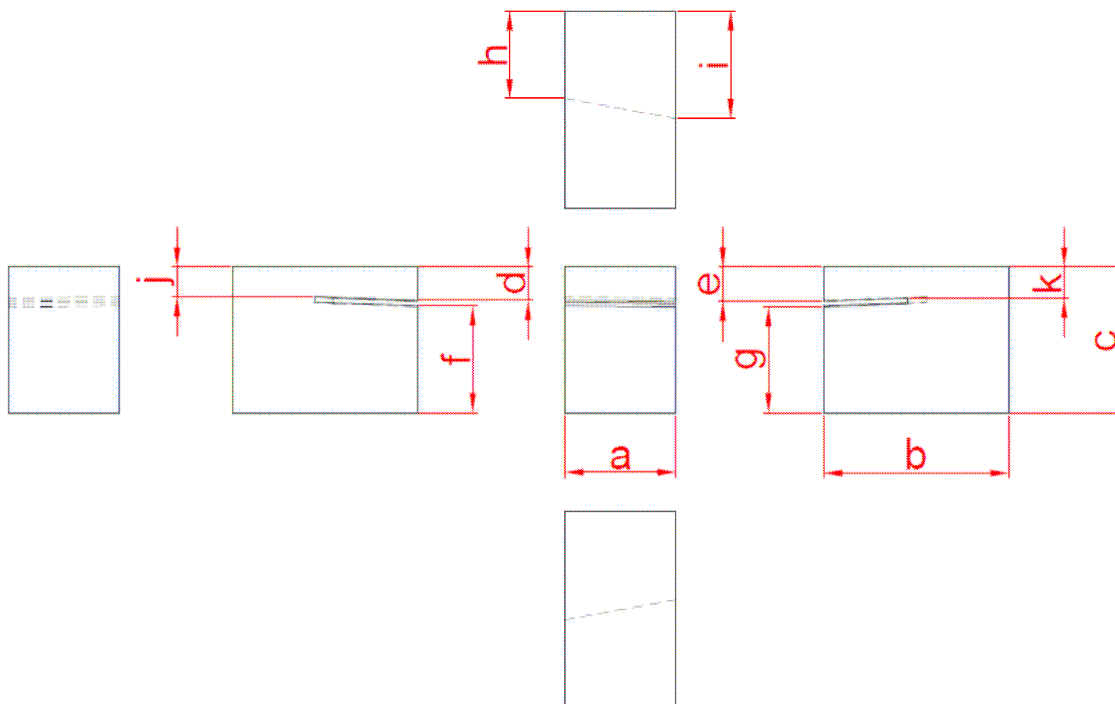
Obr. 4.13 – Zkušební vzorek č. 4
a) čelní pohled, b) zadní pohled, c) konečný vzorek

4.3.1 Naměřené rozměry

V této části jsou jednotlivé vzorky zobrazeny v rozložení sdružených obrazů podle metody promítání 3 a pomocí kót jsou vyznačeny měřené rozměry, které byly změřeny posuvným měřidlem a následně ultrazvukovým defektoskopem (obr. 4.14, 4.16, 4.18 a 4.20).

Měření rozměrů posuvným měřidlem bylo provedeno u každého rozměru třikrát, a to z důvodu zajištění co nejpřesnějšího zjištění rozměrů a eliminace možných chyb měření.

Zkušební vzorek č. 1

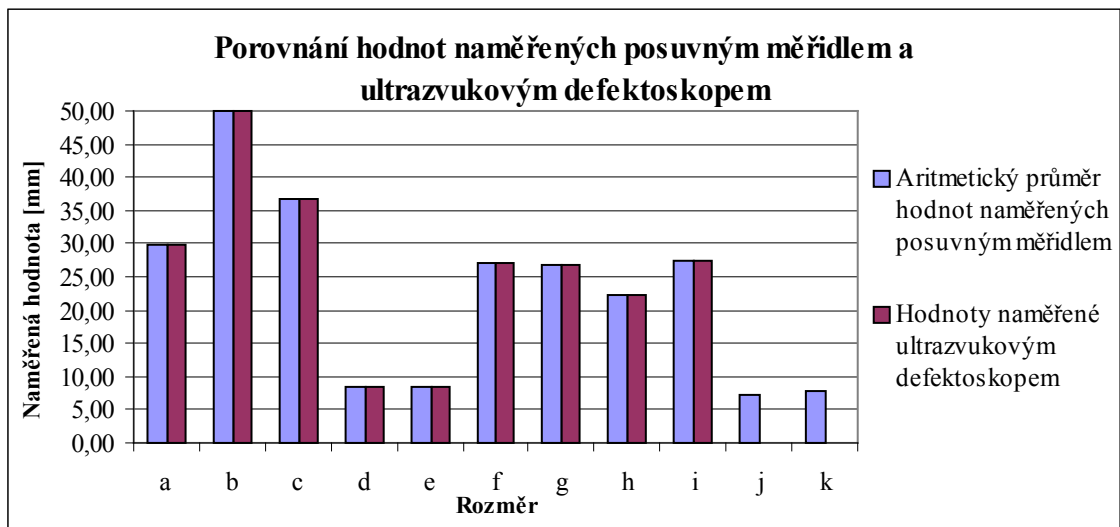


Obr. 4.14 – Zkušební vzorek č. 1 zobrazený podle metody promítání 3

Tab. 4.2 – Naměřené hodnoty rozměrů u zkušebního vzorku č. 1

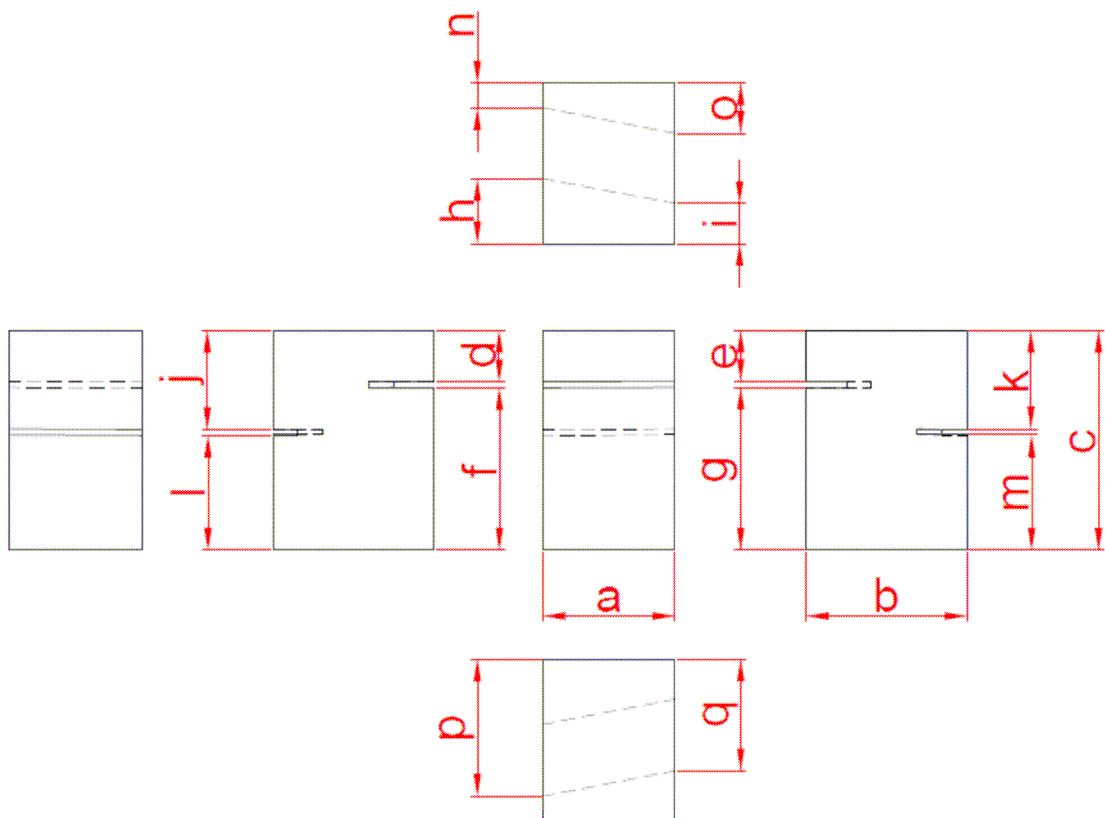
Rozměr	Hodnota naměřená posuvným měřidlem [mm]			Aritmetický průměr hodnot naměřených posuvným měřidlem [mm]	Hodnota naměřená UZ defektoskopem [mm]
a	29,80	29,80	29,82	29,81	29,792
b	49,90	49,90	49,90	49,90	49,895
c	36,86	36,84	36,84	36,85	36,854
d	8,30	8,32	8,30	8,31	8,319
e	8,58	8,58	8,58	8,58	8,570
f	27,14	27,12	27,14	27,13	27,129
g	26,86	26,86	26,85	26,86	26,848
h	22,28	22,22	22,24	22,25	22,230
i	27,30	27,28	27,30	27,29	27,300
j	7,36	7,34	7,36	7,35	nenaměřeno
k	7,76	7,76	7,74	7,75	nenaměřeno

Nezměření rozměrů „j“ a „k“ mohlo být způsobeno zhoršenou schopností ultrazvukové sondy rozeznat vady nacházejících se v blízkosti povrchu nebo nezkušeností při odečítání hodnot z ultrazvukového defektoskopu.



Obr. 4.15 – Graf porovnání naměřených hodnot u zkušební vzorku č. 1

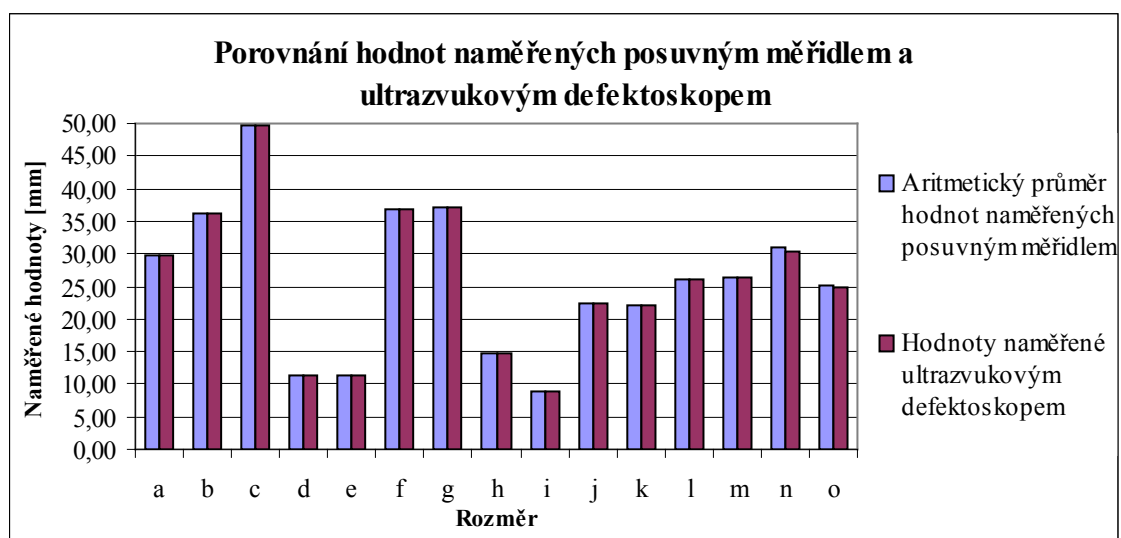
Zkušební vzorek č. 2



Obr. 4.16 – Zkušební vzorek č. 2 zobrazený podle metody promítání 3

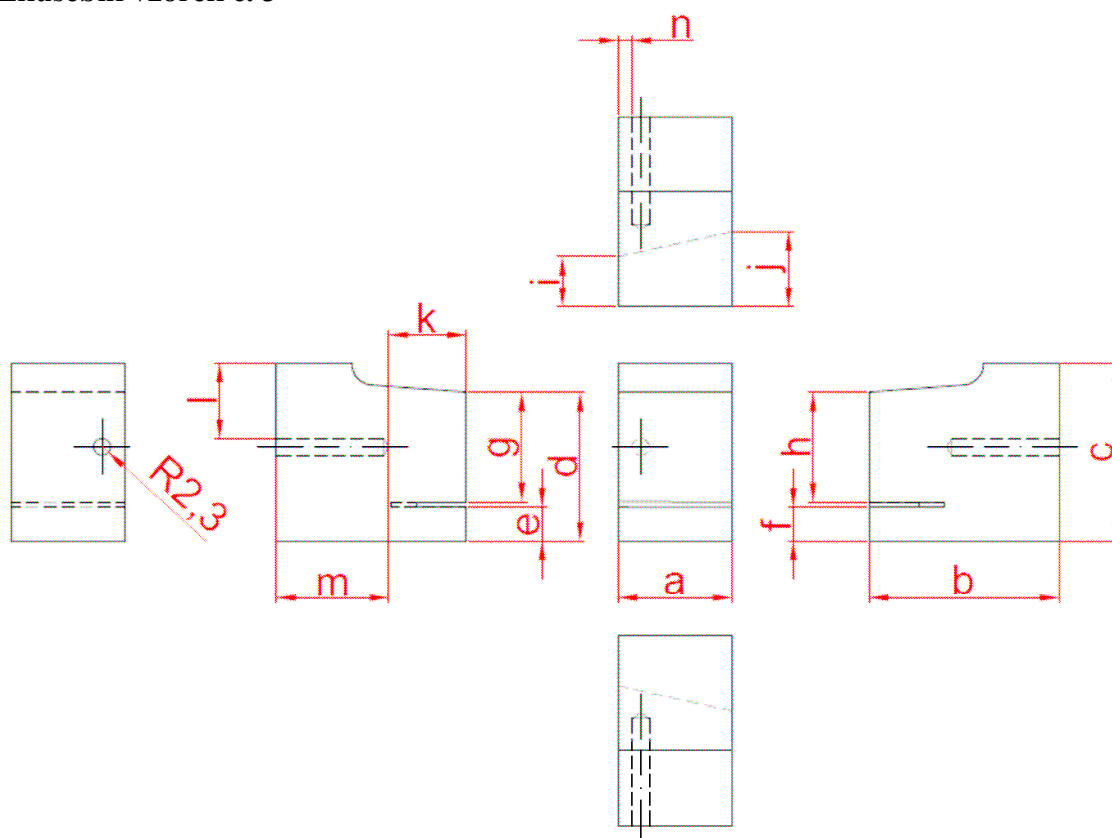
Tab. 4.3 – Naměřené hodnoty rozměrů u zkušebního vzorku č. 2

Rozměr	Hodnota naměřená posuvným měřidlem [mm]			Aritmetický průměr hodnot naměřených posuvným měřidlem [mm]	Hodnota naměřená UZ defektoskopem [mm]
a	29,80	29,78	29,78	29,79	29,783
b	36,34	36,30	36,30	36,31	36,314
c	49,80	49,80	49,82	49,81	49,805
d	11,50	11,50	11,48	11,49	11,418
e	11,38	11,40	11,38	11,39	11,402
f	36,90	36,90	36,92	36,91	36,917
g	37,02	37,00	37,02	37,01	37,108
h	14,60	14,60	14,62	14,61	14,588
i	9,00	8,98	9,00	8,99	8,897
j	22,28	22,30	22,30	22,29	22,324
k	22,14	22,14	22,16	22,15	22,197
l	26,10	26,08	26,10	26,09	26,143
m	26,26	26,26	26,28	26,27	26,300
n	30,86	30,86	30,88	30,87	30,455
o	25,08	25,10	25,06	25,08	24,800



Obr. 4.17 – Graf porovnání naměřených hodnot u zkušebního vzorku č. 2

Zkušební vzorek č. 3

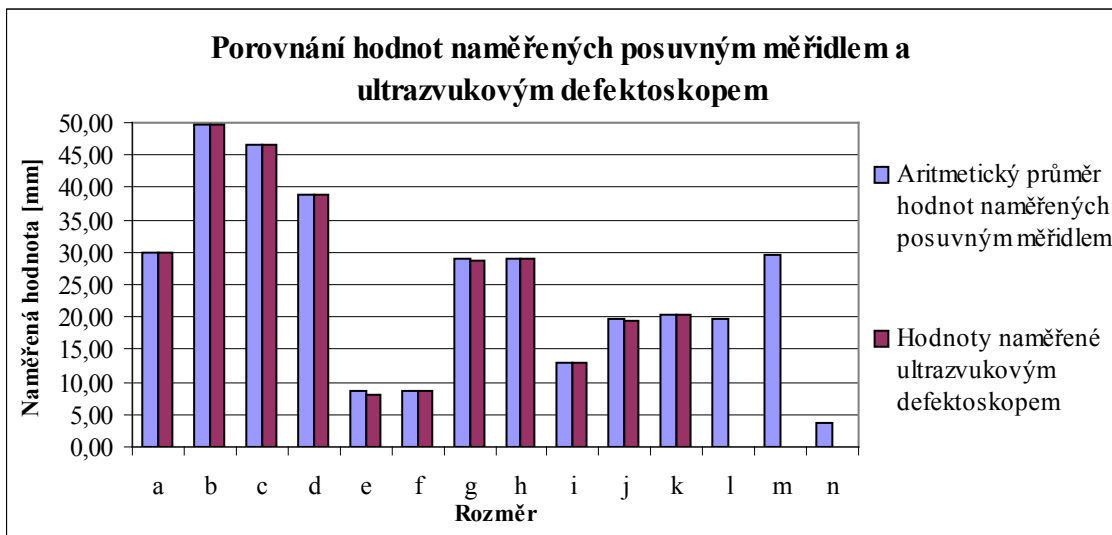


Obr. 4.18 – Zkušební vzorek č. 3 zobrazený podle metody promítání 3

Tab. 4.4 – Naměřené hodnoty rozměrů u zkušebního vzorku č. 3

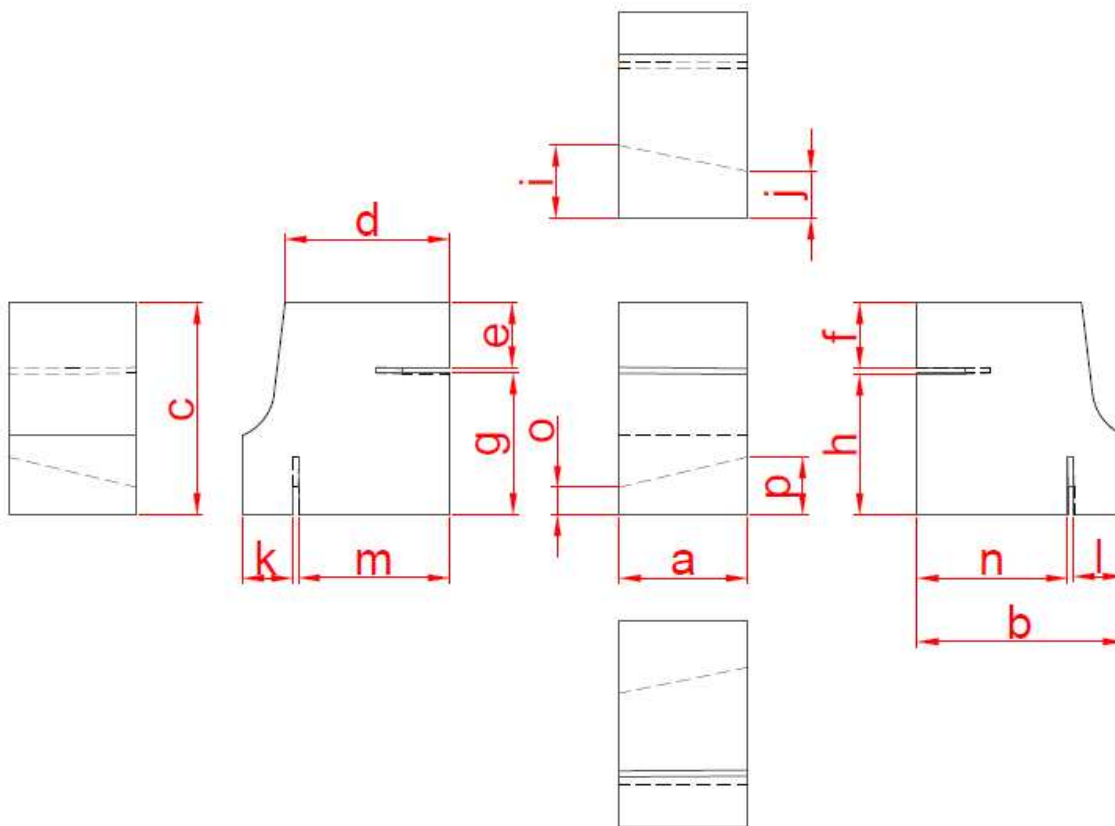
Rozměr	Hodnota naměřená posuvným měřidlem [mm]			Aritmetický průměr hodnot naměřených posuvným měřidlem [mm]	Hodnota naměřená UZ defektoskopem [mm]
a	29,82	29,80	29,82	29,81	29,809
b	49,80	49,80	49,80	49,80	49,791
c	46,66	46,62	46,62	46,63	46,620
d	39,00	39,00	39,00	39,00	39,020
e	8,72	8,70	8,70	8,71	8,078
f	8,64	8,66	8,66	8,65	8,661
g	28,88	28,86	28,86	28,87	28,795
h	28,96	28,98	28,96	28,97	28,990
i	13,00	13,04	13,02	13,02	13,103
j	19,66	19,60	19,60	19,62	19,487
k	20,28	20,28	20,26	20,27	20,271
l	19,68	19,66	19,68	19,67	nelze zjistit
m	29,52	29,52	29,50	29,51	nezjištěno
n	3,70	3,70	3,68	3,69	nelze zjistit

Rozměry „l“ a „n“ není možné změřit z důvodu rozptylu ultrazvukových, které se odrážejí od zaobleného povrchu „otvoru“. Příčinou nezměření rozměru „m“ mohl být tvar dna „otvoru“, který mohl způsobit rozptyl odražených ultrazvukových vln.



Obr. 4.19 – Graf porovnání naměřených hodnot u zkušební vzorku č. 3

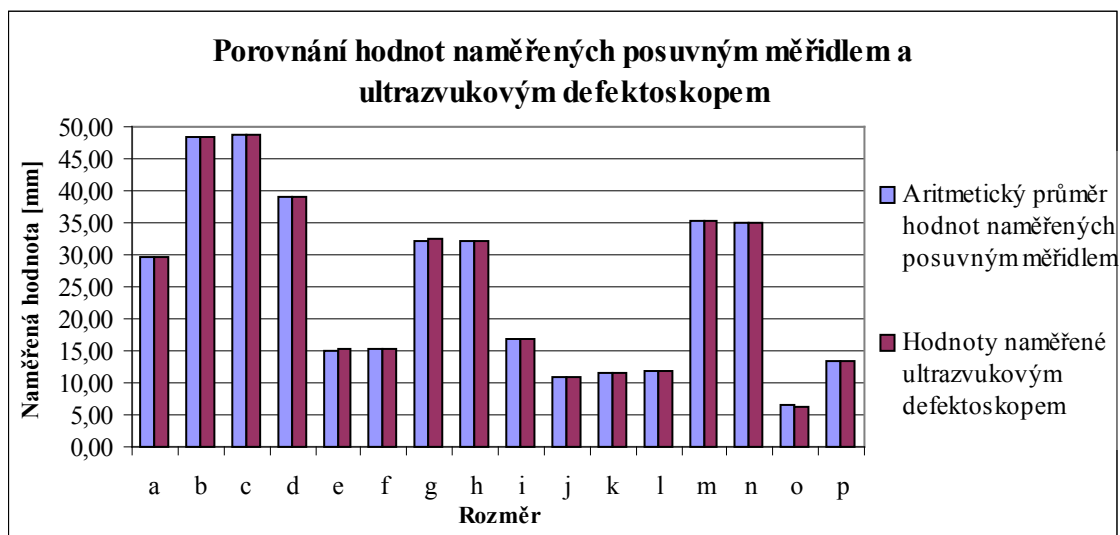
Zkušební vzorek č. 4



Obr. 4.20 – Zkušební vzorek č. 4 zobrazený podle metody promítání 3

Tab. 4.5 – Naměřené hodnoty rozměrů u zkušebního vzorku č. 4

Rozměr	Hodnota naměřená posuvným měřidlem [mm]			Aritmetický průměr hodnot naměřených posuvným měřidlem [mm]	Hodnota naměřená UZ defektoskopem [mm]
a	29,90	29,80	29,80	29,83	29,793
b	48,34	48,32	48,32	48,33	48,419
c	48,84	48,84	48,82	48,83	48,791
d	39,00	39,00	39,00	39,00	39,023
e	15,14	15,16	15,14	15,15	15,162
f	15,38	15,40	15,40	15,39	15,377
g	32,30	32,40	32,30	32,33	32,352
h	32,04	32,06	32,06	32,05	32,084
i	17,00	16,98	17,00	16,99	16,728
j	10,92	10,90	10,90	10,91	10,856
k	11,60	11,58	11,62	11,60	11,678
l	11,78	11,78	11,80	11,79	11,792
m	35,32	35,34	35,34	35,33	35,335
n	35,16	35,14	35,12	35,14	35,098
o	6,40	6,42	6,42	6,41	6,270
p	13,50	13,52	13,50	13,51	13,477



Obr. 4.21 – Graf porovnání naměřených hodnot u zkušebního vzorku č. 4

4.3.2 Zhodnocení měření

Z tabulek a grafů je patrné, že se hodnoty naměřené posuvným měřidlem a ultrazvukovým defektoskopem liší maximálně v řádu desetin milimetrů. Tento rozdíl mohl být způsoben na straně posuvného měřidla nepřesným odečítáním hodnot ze stupnice měřidla nebo nepřesným přikládáním měřících ramen na zkušební vzorky. Na straně ultrazvukového defektoskopu mohlo být příčinou nepřesného měření použití méně kvalitního prostředí akustické vazby, neznalost přesné rychlosti šíření ultrazvukových vln v materiálu z ocelolity nebo nezkušenost při odečítání hodnot z ultrazvukového defektoskopu.

4.4 Návrh úlohy pro měření ultrazvukovým defektoskopem

Pomocí univerzálního ultrazvukového defektoskopu DIO 562 určete rozměry zkušebních vzorků a polohu jejich skrytých vad (zářezů). Při práci postupujte podle následujících bodů:

- do protokolu uveďte typ (značku) použitého ultrazvukového defektoskopu a sondy
- připravte defektoskop k měření
- ověřte přesnost měření na přiložené stupňové měrce
- zjistěte rozměry daného vzorku, polohu jeho skrytých vad (zářezů) a zakreslete je do protokolu

5 ZÁVĚR

Jedním z cílů bakalářské práce bylo popsat metody nedestruktivního testování, které se v dnešní době používají. Dalším cílem bylo popsat typy vad, jenž jsou těmito nedestruktivními metodami zjistitelné. A nakonec posledním a také hlavním cílem této bakalářské práce bylo popsání měření s univerzálním ultrazvukovým defektoskopem DIO 562 a vytvoření laboratorní úlohy, ve které by si ostatní studenti mohli vyzkoušet práci s tímto přístrojem.

Pro účely laboratorní úlohy byly vytvořeny zkušební vzorky z ocelolitin, ve kterých se zhotovily zářezy pomocí pásové pily. Takto vytvořené zářezy byly následně skryty svarem, jenž se poté obrousil na pásové brusce k nerozeznání od okolních ploch. Rozměry takto zhotovených zkušebních vzorků byly pro porovnání změřeny posuvným měřidlem a následně ultrazvukovým defektoskopem. Porovnáním hodnot změřených posuvným měřidlem a ultrazvukovým defektoskopem byly zjištěny minimální rozdíly pohybující se maximálně v řádech desetin milimetrů a tudíž vhodnost ultrazvukového měření pro potřeby laboratorní úlohy.

Výsledkem práce je laboratorní úloha na měření s ultrazvukovým defektoskopem, která bude využívána při výuce.

Použité zdroje

- [1] KOPEC, B. a kol. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Brno : CERM, 2008. 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4
- [2] KREDL, M.; ŠMÍD, R. *Technická diagnostika*. 1. vyd. Praha : BEN – technická literatura, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-6
- [3] MACHEK, V.; SODOMKA, J. *Nauka o materiálu: Kovy a kovové materiály*. 2. část. 1. vyd. Praha : ČVUT, 2002. 213 s. ISBN 80-01-02568-3
- [4] MACHEK, V. *Zpracování a zkoušení kovových materiálů*. Praha : ČVUT, 2011. 157 s. ISBN 978-80-01-04683-8
- [5] VĚCHET, M.; KESL, J.; ŠPIKA, L.; EDER, V. *Defektoskopie v otázkách a odpovědích*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1989. 328 s. ISBN 80-03-00100-5
- [6] STRNADOVÁ, M. *Možnosti nedestruktivního zkoušení svarových spojů s ohledem na typ porušení* [online]. Pardubice, 2008 [cit. 2012-04-11]. Dostupné z WWW: < <http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/29517/1/text.pdf> >
- [7] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu I*. Brno : CERM, s.r.o. 2001. 505 s. ISBN 80-7204-193-2
- [8] VOJTĚCH, D. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha : VŠCHT, 2006. 185 s. ISBN 80-7080-600-1
- [9] STARMANS, *Technická příručka a návod k obsluze univerzálního ultrazvukového defektoskopu DIO 562*

Seznam obrázků

- Obr. 2.1 – Pevný endoskop (boroskop) [1]
Obr. 2.2 – Ohebný endoskop (fibroskop) [6]
Obr. 2.3 – Kapilární zkouška: a) povrch po očištění, b) povrch po nanesení kapaliny, c) povrch po otření, d) povrch po nanesení vývojky [4]
Obr. 2.4 – Identifikace vady práškovou metodou [4]
Obr. 2.5 – Magnetování magnetizačním jhem [1]
Obr. 2.6 – Magnetizace cívkou [1]
Obr. 2.7 – Cirkulární (příčná) magnetizace [2, 5]: a) průchodem proudu, b) pomocným vodičem, c) indukci proudu
Obr. 2.8 – Kombinovaná magnetizace pomocným vodičem a indukci proudu v součásti [1]
Obr. 2.9 – Schéma metody pohyblivé sondy [7]
Obr. 2.10 – Hallova sonda [5]
Obr. 2.11 – Magnetografická metoda [5]
Obr. 2.12 – Princip metody vířivých proudů [1]
Obr. 2.13 – Oddělené uspořádání snímače [5]
Obr. 2.14 – Společné uspořádání snímače [5]
Obr. 2.15 – Princip příložné cívky [1]
Obr. 2.16 – Schéma radiografie [7]
Obr. 2.17 – Fluorescenční stínítko [7]
Obr. 2.18 – Rentgenotelevizní systém [2]
Obr. 2.19 – Radiometrická metoda [7]
Obr. 2.20 – Průběh kmitavého pohybu [7]
Obr. 2.21 – Podélné vlny [1]
Obr. 2.22 – Příčné vlny [1]
Obr. 2.23 – Povrchové vlny [1]
Obr. 2.24 – Deskové (ohybové) vlny [1]
Obr. 2.25 – Deskové (dilatační) vlny [1]
Obr. 2.26 – Schématické piezoelektrického měniče [1]
Obr. 2.27 – Ultrazvukové piezoelektrické sondy: a) přímá sonda, b) úhlová sonda, c) dvojitá sonda [2]
Obr. 2.28 – Princip odrazové metody [3]
Obr. 2.29 – Identifikace vady průchodovou metodou: a) materiál bez vady, b) materiál s vadou menší než je svazek ultrazvukových vln, c) materiál s vadou menší než je svazek ultrazvukových vln [4]
Obr. 3.1 – Rozložení V-vycezenin v ocelovém ingotu [1]
Obr. 3.2 – Rozložení segregací jako jednotlivé body ve výkovku [1]
Obr. 3.3 – Soustředná staženina a plynové bubliny v ocelovém ingotu [1]
Obr. 3.4 – Makrovýbrus příčného řezu kolejnici se stopami staženiny [1]
Obr. 3.5 – Vodíková bublina (označena šipkou) v odlitku ze slitiny AlSi10 [8]
Obr. 3.6 – Vločková trhлина v hlavě kolejnice [1]
Obr. 3.7 – Vločky v kolejnici [1]
Obr. 3.8 – Podélná trhлина, která vznikla pnutím v drátu [1]
Obr. 3.9 – Podélná prasklina z pnutí na železniční nápravě [1]
Obr. 3.10 – Příčná trhлина, která vznikla pnutím v pružinovém drátu [1]
Obr. 3.11 – Příklady vměstků: a) keramický vměstek (tmavý) ve slitině AlSi10, b) oxidické vměstky (označeny šipkami) ve slitině AlSi7, c) podpovrchové vměstky (vady vzniklé z povrchových vměstků na povrchu plechů [1, 8]
Obr. 3.12 – Widmannstättenova struktura v materiálu železniční nápravy a vzhled oscilogramu při zkoušení ultrazvukem [1]
Obr. 3.13 – Řádkovitá struktura v materiálu železniční nápravy a vzhled oscilogramu při zkoušení ultrazvukem [1]

- Obr. 3.14 – Typický vzhled únavového lomu hřídele [1]
- Obr. 4.1 – Univerzální ultrazvukový defektoskop DIO 562
- Obr. 4.2 – Čelní panel ultrazvukového defektoskopu DIO 562
- Obr. 4.3 – Horní panel ultrazvukového defektoskopu DIO 562 [9]
- Obr. 4.4 – Konfigurační menu přístroje [9]
- Obr. 4.5 – Vstupní menu přístroje [9]
- Obr. 4.6 – Jednotlivá pracovní menu
- Obr. 4.7 – Univerzální ultrazvukový defektoskop DIO 562 s dvojitou čelní sondou PQ10-4C
- Obr. 4.8 – Ověřování přesnosti měření na stupňové měrce
- Obr. 4.9 – Nastavení oblasti monitorů
- Obr. 4.10 – Zkušební vzorek č. 1: a) čelní pohled, b) zadní pohled, c) konečný vzorek
- Obr. 4.11 – Zkušební vzorek č. 2: a) čelní pohled, b) zadní pohled, c) konečný vzorek
- Obr. 4.12 – Zkušební vzorek č. 3: a) čelní pohled, b) zadní pohled, c) konečný vzorek
- Obr. 4.13 – Zkušební vzorek č. 4: a) čelní pohled, b) zadní pohled, c) konečný vzorek
- Obr. 4.14 – Zkušební vzorek č. 1 zobrazený podle metody promítání 3
- Obr. 4.15 – Graf porovnání naměřených hodnot u zkušební vzorku č. 1
- Obr. 4.16 – Zkušební vzorek č. 2 zobrazený podle metody promítání 3
- Obr. 4.17 – Graf porovnání naměřených hodnot u zkušební vzorku č. 2
- Obr. 4.18 – Zkušební vzorek č. 3 zobrazený podle metody promítání 3
- Obr. 4.19 – Graf porovnání naměřených hodnot u zkušební vzorku č. 3
- Obr. 4.20 – Zkušební vzorek č. 4 zobrazený podle metody promítání 3
- Obr. 4.21 – Graf porovnání naměřených hodnot u zkušební vzorku č. 4

Seznam tabulek

Tab. 2.1 – Přehled a použitelnost defektoskopických metod [7]

Tab. 2.2 – Typy filmů podle ASTM E-94 [1]

Tab. 3.1 – Základní třídění vad do skupin a jejich všeobecný popis [1]

Tab. 4.1 – Základní technická data

Tab. 4.2 – Naměřené hodnoty rozměrů u zkušebního vzorku č. 1

Tab. 4.3 – Naměřené hodnoty rozměrů u zkušebního vzorku č. 2

Tab. 4.4 – Naměřené hodnoty rozměrů u zkušebního vzorku č. 3

Tab. 4.5 – Naměřené hodnoty rozměrů u zkušebního vzorku č. 4

Seznam příloh

Příloha č. 1 – Návrh protokolu na laboratorní úlohu k měření ultrazvukovým defektoskopem

Příloha č. 1 – Návrh protokolu na laboratorní úlohu k měření ultrazvukovým defektoskopem

Datum	St. skupina	Jméno a příjmení	Hodnocení	Kontroloval
-------	-------------	------------------	-----------	-------------

MĚŘENÍ ULTRAZVUKOVÝM DEFEKTOSKOPEM

Zadání:

Pomocí univerzálního ultrazvukového defektoskopu určete rozměry zkušebních vzorků a polohu jejich skrytých vad (zářezů). Při práci postupujte podle následujících bodů:

- do protokolu uveďte typ (značku) použitého ultrazvukového defektoskopu a sondy
- připravte defektoskop k měření
- ověřte přesnost měření na přiložené stupňové měrce
- zjistěte rozměry daného vzorku, polohu jeho skrytých vad (zářezů) a zakreslete je do protokolu

Pomůcky:

- ultrazvukový defektoskop:
- ultrazvuková sonda:
- zkušební vzorek č.:

Nákres vzorku včetně zjištěných rozměrů: