



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## METODY NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ A VÝROBKŮ

METHODS OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF MATERIALS AND PRODUCTS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Vontor

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Prokeš

BRNO 2018

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Jakub Vontor</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Tomáš Prokeš</b>
Akademický rok:	2017/18

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

## **Metody nedestruktivního zkoušení materiálů a výrobků**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

V rešeršní studii budou popsány hlavní metody nedestruktivních zkoušek materiálů a výrobků s komplexním porovnáním výhod a nevýhod. Na základě porovnání vybraných metod nedestruktivní analýzy materiálů bude sestavena matice doporučení pro praxi.

Při sestavování matice budou zohledněny jak kvalitativní, tak ekonomické předpoklady. V experimentální části práce bude použita vybraná nedestruktivní zkouška na určeném vzorku. Výsledky budou vyhodnoceny pomocí analýzy systému měření (MSA).

### **Cíle bakalářské práce:**

- vypracovat rešerši na téma nedestruktivních zkoušek s výsledným porovnáním výhod a nevýhod jednotlivých zkoušek.
- z porovnání vyhodnotit doporučení pro praxi.
- v experimentální části ověřit pomocí metodiky MSA vybranou nedestruktivní zkoušku.

### **Seznam doporučené literatury:**

KOPEC, B. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí (nauka o materiálu IV). Akademické nakladatelství CERM, 2008.

VOLUME, A. H. Nondestructive evaluation and quality control. ASM International, 1989. 795 s.

KHARKOVSKY, S. a ZOUGHI, R. Microwave and millimeter wave nondestructive testing and evaluation - Overview and recent advances. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2007, 10(2), 26-38 s.

WANG, Z. D., GU, Y. a WANG, Y. S. A review of three magnetic NDT technologies. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2012, 324(4), 382-388 s.

ZHU, Y. K., TIAN, G. Y., LU, R. S. a ZHANG, H. A review of optical NDT technologies. Sensors. 2011, 11(8), 7773-7798.

ZHANG, H., GAO, B., TIAN, G. Y., WOO, W. L. a BAI, L. Metal defects sizing and detection under thick coating using microwave NDT. NDT & E International. 2013, 60, 52-61.

KESSLER, S. S., SPEARING, S. M., ATALLA, M. J., CESNIK, C. E. a SOUTIS, C. Damage detection in composite materials using frequency response methods. Composites Part B: Engineering. 2002, 33(1), 87-95.

USAMENTIAGA, R., VENEGAS, P., GUEREDIAGA, J., VEGA, L., MOLLEDA, J. a BULNES, F. G. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. Sensors. 2014, 14(7), 12305-12348.

TIAN, G. Y. a SOPHIAN, A. Defect classification using a new feature for pulsed eddy current sensors. Ndt & E International. 2005, 38(1), 77-82.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

**ABSTRAKT**

Cílem bakalářské práce je vytvořit rešerši metod nedestruktivního zkoušení materiálu a následně vhodnou metodu experimentálně použít na zkušební vzorek. Práce je zaměřena hlavně na metody nedestruktivního zkoušení používané při kontrole svaru. Výsledek provedené experimentální nedestruktivní zkoušky je třeba ověřit pomocí zkoušky destruktivní.

**Klíčová slova**

Nedestruktivní zkoušení, vady materiálu, metody nedestruktivního zkoušení, zkoušky svaru, rentgenové zkoušení

**ABSTRACT**

The aim of this bachelor thesis is to perform a search of methods of non-destructive testing and to choose a right method for experimental test of sample. Bachelor thesis is mainly focused on the methods which are used for inspection of welds. Result of experimental non-destructive test is important to verify by destructive inspection.

**Key words**

Non-destructive testing, material defects, methods of non-destructive testing, testing of welds, x-ray testing

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

VONTOR, J. Metody nedestruktivního zkoušení materiálů a výrobků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Prokeš.



## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Metody nedestruktivního zkoušení materiálů a výrobků vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů u vedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25.5.2018

.....  
Jakub Vontor

## **PODĚKOVÁNÍ**

Touto cestou bych chtěl poděkovat Ing. Tomášovi Prokešovi za cenné rady a připomínky při vypracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl vyjádřit velký dík společnosti NDtest s.r.o. za zapůjčení zkušební techniky pro řešení experimentální části práce a hlavně za možnost získávat v této společnosti velmi cenné zkušenosti.

Část práce byla provedena za podpory výzkumné infrastruktury CEITEC Nano (ID LM2015041, MŠMT, 2016–2019), CEITEC Vysoké učení technické v Brně.

---

**OBSAH**

ABSTRAKT.....	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ.....	10
2 VADY MATERIÁLU A VÝROBKŮ.....	11
2.1 Necelistvosti materiálů.....	11
2.1.1 Staženiny.....	11
2.1.2 Vycezeniny.....	12
2.1.3 Vměstky.....	12
2.1.4 Dutiny.....	13
2.1.5 Broky.....	13
2.1.6 Podélné trhliny.....	14
2.1.7 Příčné trhliny.....	14
2.1.8 Kráterové trhliny.....	15
2.1.9 Studené spoje a neprůvary.....	15
3 METODY ZKOUŠENÍ.....	16
3.1 Vizualní metoda (VT).....	16
3.1.1 Princip přímé a nepřímé vizualní kontroly.....	17
3.1.2 Všeobecná vizualní kontrola.....	18
3.1.3 Místní vizualní kontrola.....	18
3.1.4 Vizualní kontrola svarů.....	18
3.1.5 Vizualní kontrola odlitků.....	19
3.2 Kapilární metody (PT).....	19
3.2.1 Princip kapilárních metod.....	19
3.2.2 Rozdělení kapilárních metod.....	20
3.2.3 Prostředky.....	20
3.2.4 Vyhodnocení kapilárních metod.....	22
3.3 Magnetická prášková metoda (MT).....	22
3.3.1 Princip magnetické metody práškové.....	23
3.3.2 Magnetizace a nástroje.....	24
3.3.3 Druhy proudu pro magnetizaci.....	25

---

3.3.4	Přístrojová technika.....	26
3.3.5	Zkušební prostředky.....	26
3.3.6	Měrky.....	27
3.4	Zkoušení ultrazvukem (UT).....	28
3.4.1	Princip ultrazvukového zkoušení.....	28
3.4.2	Druhy ultrazvukových vln.....	29
3.4.3	Zdroje ultrazvukového vlnění.....	29
3.4.4	Ultrazvukové sondy.....	30
3.4.5	Metody ultrazvukového zkoušení.....	31
3.4.6	Speciální techniky.....	31
3.4.7	Požadavky pro provedení zkoušky.....	32
3.5	Zkoušení prozařováním (RT).....	33
3.5.1	Princip zkoušení prozařováním.....	33
3.5.2	Druhy záření.....	33
3.5.3	Radiografický film.....	34
3.5.4	Fólie.....	35
3.5.5	Vyvolávání filmů.....	35
3.5.6	Měrky.....	35
4	EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY SVARU.....	37
4.1	Vizuální zkouška.....	37
4.2	Kapilární zkouška.....	38
4.3	Zkouška prozařováním.....	40
4.4	Destrukční zkouška svaru.....	42
4.5	Optický mikroskop.....	43
4.6	Elektronový mikroskop.....	44
4.7	Zkouška tvrdosti.....	45
	ZÁVĚR.....	47
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	48
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	51
	SEZNAM PŘÍLOH.....	52

---

## ÚVOD

Metody nedestruktivního zkoušení materiálu a výrobků jsou celosvětově používané technologie, pomocí kterých se sjednocuje a kontroluje kvalita a korektnost výroby. Hlavní předností nedestruktivního zkoušení je kontrola správnosti výroby bez porušení funkčnosti a celistvosti zkoušené součásti. Postupy a předpisy těchto metod jsou kontrolovány mezinárodními normami, kterými se musí pracovníci oboru defektoskopie bezprostředně řídit.

Historie tohoto oboru sahá až do 19. století, kdy se objevují první zmínky o používání magnetismu ke kontrole svarů [1]. Od této doby se technologie nedestruktivního zkoušení nepředstavitelně vyvinuly a staly se ve výrobě mnohem rozšířenějšími a využívanějšími.

Metod nedestruktivního zkoušení je mnoho, využívají určité fyzikální i chemické zákonitosti a velké množství přístrojové a zkoušecí techniky, která napomáhá ke zjednodušení zkoušek a zdokonalení jejich výsledku. Defektoskopické metody se liší podle použité technologie zkoušení a také podle vhodnosti použití pro konkrétní typy vad. Cílem této práce je metody popsat, vysvětlit a určit jejich vhodnost pro kontrolu konkrétní technologie výroby.

## 1 NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ

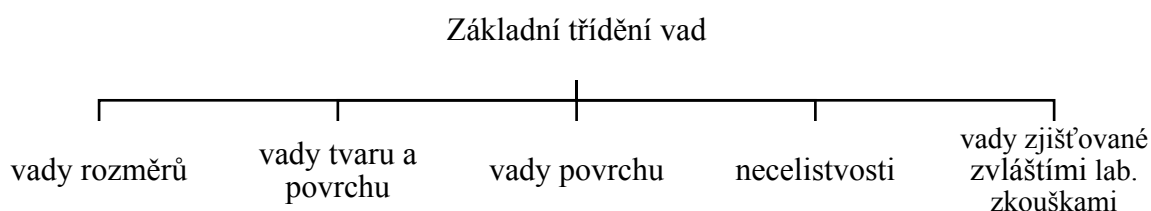
Obor nedestruktivního zkoušení se nazývá defektoskopie a zabývá se zkoušením materiálů nebo výrobků bez poškození struktury a hlavně bez narušení následné použitelnosti a tím zabráněním plnění předpokládané funkce produktu. Hlavním cílem NDT je indikování přítomnosti materiálových diskontinuit - tzv. vad. K plnění tohoto účelu disponuje obor NDT řadou technologických metod, z nichž každá má určité specifické využití a parametry. Nedestruktivní zkoušení nezamezí vzniku vad materiálu nebo produktu při výrobě, jen je odhaluje a specifikuje, případně v daných situacích navrhuje postup pro opravení této vady. Produkt, který prošel nedestruktivními zkouškami má zajištěnou celistvost a garantovanou spolehlivost, tím tyto zkoušky předchází selhání výrobku vlivem vnějších faktorů.

Zkoušení předmětu, aniž by došlo k jeho zničení, se postupem času rozvinulo v nepostradatelné měřítko kvality výroby. Celosvětové užívání NDT v průmyslové výrobě vytváří jakousi mez kvality a stanovuje řadu charakteristik materiálových i výrobních. Důležité je však zdůraznit, že žádná metoda nedestruktivního zkoušení neodhalí všechno, proto je nutné, aby pracovníci NDT byli srozuměni s funkčností metod a byli schopni posoudit, kterou metodu využít pro zkoumání povrchových vad a kterou pro zkoumání vad vnitřních. Pro kompletní nedestruktivní zkoušku předmětu je třeba využít řadu zkušebních metod, aby byla zaručena stoprocentní absence vad.

## 2 VADY MATERIÁLU A VÝROBKŮ

Definice pojmu "vada" je v defektoskopii vcelku jednoduchá, mluvíme-li o vadě v oboru NDT, mluvíme o jakékoliv odchylce provedení výrobku od vlastností předepsaných v technických normách nebo v jiných technických dokumentech, podle nichž se daný výrobek vyrábí nebo prodává [1].

Vady lze v základu dělit na opravitelné a neopravitelné, další podrobnější dělení je zobrazeno na obr. 2.1. Výrobek postižený neopravitelnou vadou není možné nijak opravit, tudíž ani prohlásit za správně vyrobený a způsobilý k prodeji. Vada opravitelná je vada výrobku, kterou lze opravit vhodně zvoleným způsobem, tento způsob opravy musí opět odpovídat technickým normám a nesmí být v rozporu s dalším výrobním procesem.



Obr. 2.1: Základní třídění vad [1].

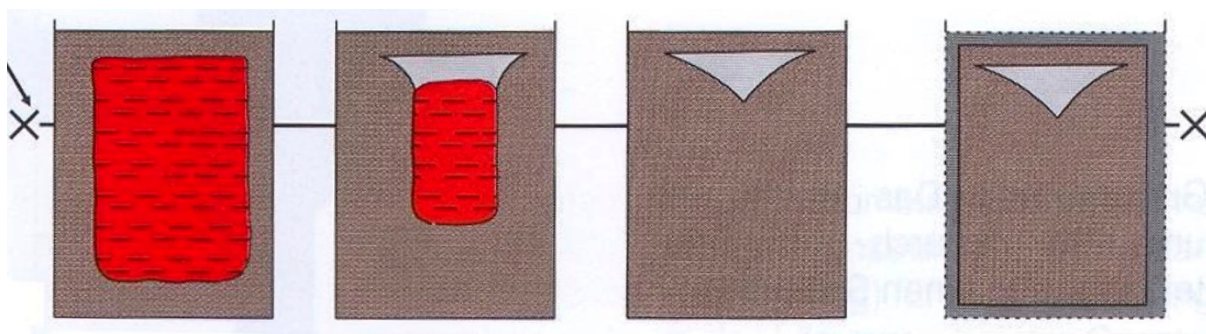
### 2.1 Necelistvosti materiálů

Hlavní skupinou vad, jimiž se obor NDT zabývá jsou necelistvosti materiálu, které mohou mít řadu příčin, některé z nich jsou jednoznačné a lze spolehlivě zjistit, ve které z výrobních fází vznikly, některé tak jednoznačné nejsou a mohou mít mnoho odlišných prvotních příčin. Necelistvosti materiálů se rozdělují na [1,2]:

- staženiny,
- vycezeniny,
- vměstky,
- dutiny,
- broky,
- podélné trhliny,
- příčné trhliny,
- kráterové trhliny,
- a studené spoje.

#### 2.1.1 Staženiny

Staženina je vada (obr. 2.2), která vzniká v zásadě při tuhnutí kovů v kokilách vlivem zmenšování jeho objemu [1]. Ve válcových výrobcích se obvykle projevuje v osové oblasti v podélném směru, v příčném směru vypadá jako nepravidelná dutina, často pak bývá staženina vyplněna struskou. Speciálním případem staženiny je ředina, která se definuje jako vada ve formě nahromadění malých staženin v průřezu odlitku [2]. Staženina je vada, která nejvíce ohrožuje výrobky namáhané dynamicky nebo cyklicky. Při tomto namáhání může dojít nejdříve k šíření deformace, a nakonec až k lomu.

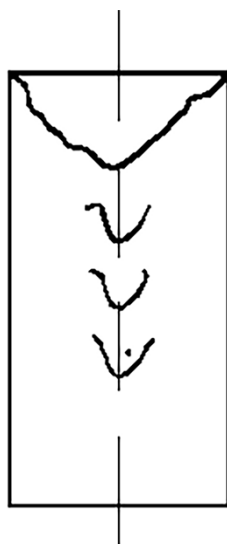


Obr. 2.2: Vznik vnitřní staženiny při tuhnutí kovu v kokile [3].

Staženina je zjistitelná mnoha způsoby, pokud zasahuje do čelní plochy výrobku, je někdy viditelná i pouhým zrakem, když tomu tak není, je třeba využít prozařovací nebo ultrazvukovou metodu.

### 2.1.2 Vycezeniny

Vycezeniny (obr. 2.3) jsou makroskopické oblasti se zvýšeným obsahem vměstků fosforu, síry, uhlíku, a jiných prvků [1]. Tyto vměstky vznikají vlivem segregace při tuhnutí oceli. Vycezeniny se podle druhu oceli rozpínají buď po celém průřezu nebo zaujímají středovou oblast a jsou obaleny ve vrstvě čistého kovu. Při velké koncentraci těchto vad se zhoršuje tvárnost za tepla, svařitelnost a při válcování za studena se indukují množství vnitřních příčných trhlin. U cyklicky namáhaných výrobků snižují vycezeniny také mez únavy.



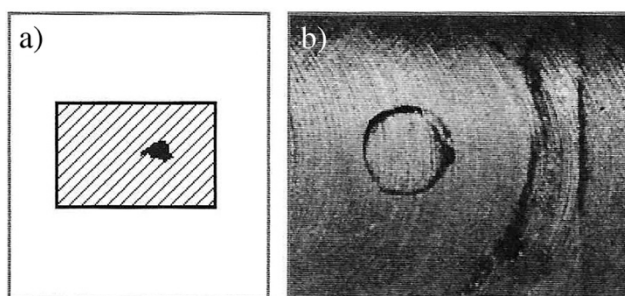
Obr. 2.3: Vycezenina v ocelovém ingotu [4].

Zjištění přítomnosti vycezenin se provádí mnoha destruktivních zkoušek, při využití zkoušek nedestruktivních se pro indikaci těchto vad používá metoda ultrazvuková.

### 2.1.3 Vměstky

Vměstky jsou makroskopické kovové i nekovové částice (obr. 2.4), které jsou vůči základnímu kovu nehomogenní. Vznikají při výrobě nebo odlévání oceli díky žáruvzdorným hmotám, které přijdou s ocelí do styku. Při odlévání mohou být vměstky vyloučeny do kovu ze strusky. Vměstky ve struktuře mají menší plasticitu než okolní kov, kvůli tomu způsobují vážné narušení celistvosti výrobku a zapříčiňují vznik únavových trhlin a následného lomu.





Obr. 2.4: Nehomogenní částice v kovu [2], a) schéma řezu materiálu s vadou, b) zvětšený pohled na vměstek.

Makroskopické vměstky na povrchu jsou viditelné pouhým okem, přítomnost vměstků pod povrchem materiálu je zjistitelná pomocí ultrazvukové nebo prozařovací zkoušky.

#### 2.1.4 Dutiny

Dutiny jsou povrchovými nebo vnitřními vadami ve stěnách odlitků nebo ve svarech, vyskytují se samostatně nebo ve shlucích (obr. 2.5). Hlavní příčinou vzniku dutin v odlitcích je klesající rozpustnost plynu v kovu se snižující se teplotou, což znamená, že při chladnutí taveniny se z ní vylučují plyny, které vytvářejí bubliny nebo póry. Plyn podporující vznik dutin může být do odlitku vnesen ve strusce nebo v proudu odlévané taveniny [2]. Příčinou vzniku dutin u svaru může být použití vlhkých elektrod pro svařování.

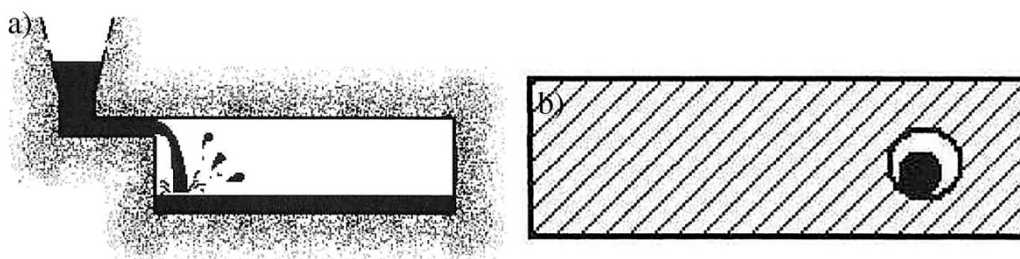


Obr. 2.5: Dutina ve svaru indikovaná magnetickou práškovou metodou.

Dutiny pod povrchem jsou zjistitelné pomocí prozařovacích metod, díky kterým se určí množství i velikost těchto vad. Jsou-li dutiny na povrchu nebo těsně pod ním, jsou pro jejich zjištění využitelné také metody magnetické.

#### 2.1.5 Broky

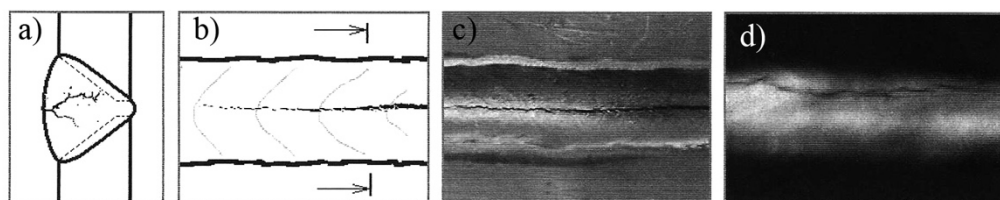
Broky jsou vady odlitků, které vznikají při odlévání (schéma odlévání do formy na obr. 2.6 a)). Vznikají kvůli rozstříku kovu v dutině formy a tuhnou jako malé kovové kuličky ohraničené plynovou bublinou (obr. 2.6 b)).



Obr. 2.6: Broky vznikající při odlévání [2], a) rozstřík kovů při odlévání do formy, b) vzniklý brok uzavřený v plynné dutině.

### 2.1.6 Podélné trhliny

Podélné trhliny jsou nejčastějšími vadami na výrobcích z válcované oceli, vznikají již při tuhnutí ingotu, hlavní příčinou jejich vzniku jsou podpovrchové bublinky, které se nacházejí v licí kůře ingotu vlivem nedokonalé desoxidace oceli nebo reakcí s nečistou stěnou kokily. Při válcování oceli se z bublinek tvoří krátké a četné podélné trhliny. V hotových výrobcích také vznikají trhliny v důsledku materiálového pnutí a namáhání. Tento typ vad se nejvíce projevuje u výrobků tvářených pýchováním a již zmíněným válcováním [1]. Podélné trhliny jsou také častými vadami u svaru (obr. 2.7), kde se vyskytují rovnoběžně s osou svaru. Nejhorší vliv mají praskliny na součástech kalených, jelikož se trhliny při kalení zvětšují, a v důsledku toho dochází k lomu.

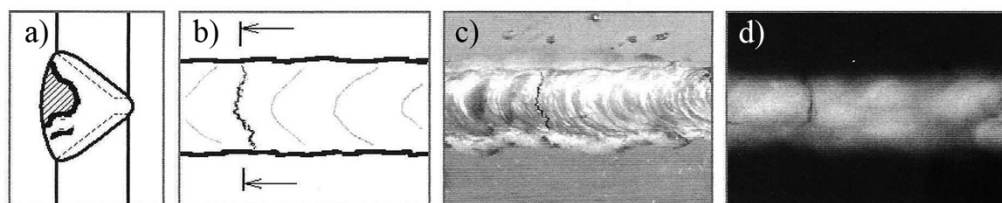


Obr. 2.7: Podélná trhlina ve svaru [2], a) schéma příčného řezu svaru, b) podélné schéma svaru, c) snímek svaru s podélnou trhlinou, d) rentgenový snímek svaru s podélnou trhlinou.

Povrchové trhliny jsou viditelné pouhým okem, v případě podpovrchových trhlín je pro jejich zjištění možné provést řadu destruktivních zkoušek, případně zkoušek metalurgických. Obor NDT tyto vady odhaluje pomocí metod magnetických, využívající příčnou magnetizaci, metody ultrazvukové a rentgenové jsou také použitelné, vhodnější a méně náročnější pro zkoušení povrchu je však právě zmiňovaná metoda magnetická. V určitých případech, jako například u staticky zatížených součástí, jsou povrchové podélné trhliny malé hloubky přípustné, povolené rozměry takových trhlín popisují příslušné technické normy.

### 2.1.7 Příčné trhliny

O příčných trhlínách se dá mluvit jako o povrchových prasklinách, které mohou být jednoduchého i členitějšího tvaru. Vznikají ve výrobcích při tváření, konkrétně při válcování nebo kování, při následném opětovném tváření se již rozvírají a protahují do různých podob, do tzv. rozvětvených trhlín. Mezi hlavní příčiny vzniku příčných trhlín patří přílišný ohřev před tvářením ingotu a křehkost za tepla, která je způsobena vysokým obsahem kyslíku nebo síry v kovu. Opět i příčné trhliny se často vyskytují jako vady svaru, kde se vyskytují kolmo na osu svaru (obr. 2.8).

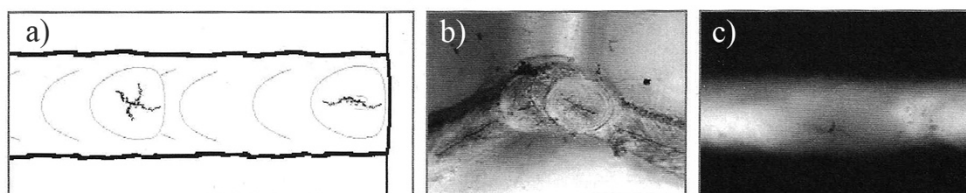


Obr. 2.8: Příčná trhlina ve svaru [2], a) schéma příčného řezu svaru, b) podélné schéma svaru, c) snímek svaru s příčnou trhlinou, d) rentgenový snímek svaru s příčnou trhlinou.

Přítomnost příčných trhlín v materiálu nebo v hotové součásti se zjišťují stejnými metodami a způsoby jako tomu je u trhlín podélných, je třeba pouze pozměnit nastavení přístrojů, případně typ ultrazvukové sondy.

### 2.1.8 Kráterové trhliny

Kráterové trhliny jsou vady specifické výhradně pro svary, kde tyto diskontinuity vznikají na koncích svarových housenek. Vznikají kvůli nedostatečnému průvaru celého průřezu svaru (obr. 2.9).

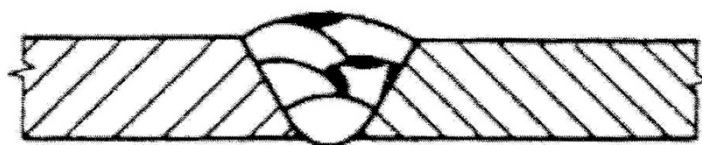


Obr. 2.9: Kráterová trhlina ve svaru [2], a) schéma svaru, b) snímek kráterových trhlín v rohovém svaru, c) rentgenový snímek svaru s kráterovou trhlinou.

Tyto necelistvosti jsou zjistitelné buď pouhým okem nebo pomocí magnetických metod NDT.

### 2.1.9 Studené spoje a neprůvary

Studené spoje a neprůvary jsou specifické vady svarů a vznikají při nedokonalém procesu svařování (nedokonale provařený svar na obr. 2.10), například nepřiměřenou rychlostí nebo špatně zvolenou teplotou. Jedná se vlastně o nedokonalé spojení části svaru se svařovanou součástí.



Obr. 2.10: Schéma studených spojů [5].

Studené spoje jsou jednoduše zjistitelné pomocí magnetických metod NDT.

### 3 METODY ZKOUŠENÍ

Defektoskopických metod zkoušení je rozsáhlá řada (viz tab. 1), každá z nich má své určité využití na specifický druh vad, každá z nich má své výhody, nevýhody, určité podmínky a také svá omezení. Principiálně se metody značně liší a využívají různé chemické i fyzikální zákonitosti.

Tab 1.: Technologické využití defektoskopických vad [2].

Symbol	Název metody	Detekce vad/technologická vhodnost									
		Povrchové	Vnitřní	Objemové	Plošné	Svary	Odlitky	Výkovky	Obrobky	Vývalky	Koroze
VT	Vizuální metoda	•	-	•	•	√	√	√	√	√	√
PT	Kapilární metoda	•	-	•	•	√	√	√	√	-	-
MT	Magnetická metoda prášková	•	!	•	•	√	√	√	√	-	-
RT	Radiografická metoda	!	•	•	!	√	√	-	-	-	√
UT	Ultrazvuková metoda	!	•	•	•	√	√	√	-	√	-
ET	Metoda vířivých proudů	•	!	•	•	√	-	√	√	√	-
LT	Zkoušení netěsností	Vhodné pro detekci vad, procházejících skrze celou tloušťku stěny (plošné i objemové). Detekován je únik medií z daného prostoru.									
<p>• = metoda detekuje tento typ vad</p> <p>! = metoda ne vždy detekuje tento typ vad</p> <p>- = nevhodné pro detekci těchto vad a pro tyto výrobky</p> <p>√ = vhodná vada pro tento typ výrobků</p>											

#### 3.1 Vizuální metoda (VT)

Vizuální zkouška je základní a nejpoužívanější kontrolní defektoskopická metoda, využívaná pro zjištění povrchových vad a odchylek od předepsaného tvaru výrobku. Vizuální kontrola se provádí jako první z nedestruktivních zkoušek, a to pouhým okem, případně pomocí zobrazovací techniky, jako jsou čočky, optická vlákna, endoskopy, infrakamery a jiné.

Provedení vizuální kontroly a všeobecné postupy jsou dány v technické normě ČSN EN 13018 [6].

Podle optické dráhy mezi okem a kontrolovanou plochou výrobku se vizuální metody rozdělují na přímé a nepřímé.

### 3.1.1 Princip přímé a nepřímé vizuální kontroly

Přímá vizuální kontrola (obr. 3.1) je metoda, při níž není přerušena optická dráha mezi okem a kontrolovanou plochou, provádí se pouhým okem nebo pomocí optických pomůcek, jako jsou již zmiňované lupy, zrcadla a endoskopy [2].



Obr. 3.1: Přímá vizuální kontrola svaru nosného dílu jeřábu po nehodě – dle VT je svar nepřijatelný.

Nepřímá vizuální kontrola je druhá z vizuálních metod, používá v případě, kdy není možné provést přímou vizuální kontrolu, a to díky nepřístupnosti ke kontrolované ploše, při této kontrole dochází k přerušení optické dráhy mezi očima pracovníka a kontrolovanou plochou. Pro zobrazení této plochy se používá řada pomůcek, jako jsou videoscopy (nepřístupná trhlina odlitku odhalena videoskopem na obr. 3.2), přístroje s optickými vlákny, dále také přístroje pro vytvoření fotografií nebo videa.



Obr. 3.2: Trhlina zjištěná pomocí videoskopu při nepřímé vizuální kontrole [7].

### 3.1.2 Všeobecná vizuální kontrola

Všeobecné VT slouží k získání celkového přehledu o stavu posuzovaného výrobku, proto se provádí jako přímá kontrola a je zaměřena na [2]:

- nánosy a usazeniny,
- korozní napadení,
- mechanické poškození povrchu,
- tvarové odchylky,
- kompletnost celku,
- ověření, zda je povrch připraven pro místní zkoušku.

Všeobecná vizuální zkouška probíhá na větší vzdálenost mezi očima pracovníka a pozorovanou součástí, také požadavky na osvětlení nejsou tak vysoké, jelikož po všeobecné zkoušce přichází kontrola místní, která je mnohem detailnější.

### 3.1.3 Místní vizuální kontrola

Místní vizuální kontrola slouží k detailnímu prozkoumání povrchu součásti za přísnějších podmínek na osvětlení a vzdálenost od pozorovaného povrchu součásti. Konkrétní vzdálenost od povrchu podle všeobecné normy je maximálně 600 mm, a to pod minimálním úhlem pohledu 30°. Požadavek na intenzitu osvětlení je 350 až 500 luxů, ta se měří pomocí luxmetru [6].

### 3.1.4 Vizuální kontrola svarů

Vizuální kontrola svarů se provádí jako vizuální kontrola přímá – místní [1]. U svarových spojů se posuzují povrchové vady na krycí housence a na tepelně ovlivněné oblasti (TOO), která bývá podle velikosti svarové housenky většinou 10 mm po stranách. Svarové spoje se většinou hodnotí na dvou úrovních – nominální a metrické. Podle nominálního hodnocení se hodnotí kritické vady jako trhliny, studené spoje a neprůvary. Hodnocení metrické hodnotí tvarové a rozměrové odchylky.

Pro hodnocení geometrických vad svarů se používají měřidla, mezi hlavní z nich patří řada normovaných měrek (dle normy ČSN EN ISO 17637 [8]), pomocí kterých lze změřit jmenovitá velikost, převýšení koutového svaru a úhel návarových ploch (pro měření úhlu slouží měrka na obr. 3.3) [8].



Obr. 3.3: Měrka pro měření koutových svarů [9].



### 3.1.5 Vizuální kontrola odlitků

Vizuální kontrola odlitků se zaměřuje buď na kontrolu drsnosti povrchu nebo na povrchové vady odlitku (dle normy ČSN EN 1370 [10]). Při vizuální kontrole odlitků se používají fotografie replik vad ve skutečném měřítku nebo sady srovnávacích etalonů - tzv. komparátorů, které obsahují opravdové povrchové vady odlitků a jsou vyrobeny ve tvaru malé destičky z plastu [10].

Mezi nejběžněji používané patří sada komparátorů SCRATA (Steel Castings Research and Trade Association – UK). Sada SCRATA (viz obr. 3.4) obsahuje devět kategorií destiček o rozměrech 100 x 150 mm a každá z kategorií má dva až čtyři stupně jakosti vady. Kategorie se dělí podle druhu vad od A do J, příkladem vad, které tyto komparátory obsahují jsou povrchová struktura, kovové vměstky, trhliny, apod. [2].



Obr. 3.4: Sada SCRATA [11].

## 3.2 Kapilární metody (PT)

Kapilární metody jsou na poli defektoskopie jedny z nejstarších, kdysi se při zkoušení těsnosti spojů železničních součástí používala tzv. "petrolejová zkouška", která se vykonávala pomocí petroleje a vápenného mléka. Dnešní kapilární metody jsou využívány hlavně díky jejich jednoduchosti, univerzálnosti a ekonomické nenáročnosti [1]. Základní zásady a postupy při kapilárních metodách jsou dány v normě ČSN EN ISO 3452 [12].

### 3.2.1 Princip kapilárních metod

Defektoskopické kapilární metody fungují na principu kapilárních jevů, které zahrnují vztlínavost a smáčivost kapalin (výsledek kapilárních jevů u PT viz obr. 3.5). Kapalína využívající se při kapilární zkoušce se nazývá penetrant. Penetrantem se při zkoušení pokrývá povrch zkoušené součásti, ten poté vniká do necelistvostí a po odstranění jeho přebytku vzlíná zbylý penetrant z vad na povrch a pomocí kontrastní vývojky se vytváří kontrastní nebo fluorescentní indikace vad, které se po sléze hodnotí vizuálně. Na penetrant jsou kladeny nároky na mnohé vlastnosti, proto aby byla metoda správně provedena, jsou to hlavně penetrační schopnost (schopnost rychle pronikat do necelistvostí), dále co nejmenší těkavost, bod vzplanutí nad 50 °C, a mnoho dalších.



Obr. 3.5: Indikace praskliny svaru po kapilární zkoušce metodou barevné indikace [13].

Metody kapilární jsou použitelné pro detekci vad povrchových, nikoliv vnitřních. Používají se hlavně u materiálů, u kterých není možné využít metodu magnetickou, jsou to materiály neferomagnetické, například austenitické oceli nebo lehké kovy a jejich slitiny. Zkoušení kapilárními metodami u nekovových materiálů je také využíváno, a to u plastických hmot, keramiky, skla apod. Detekovatelné vady pomocí kapilárních metod jsou plošné trhliny, studené spoje, zdvojeniny apod.

### 3.2.2 Rozdělení kapilárních metod

Metody se rozdělují podle druhu vytvořené indikace, jejího zobrazení a zhodnocení na [1]:

- metoda barevné indikace,
- metoda fluorescenční,
- metoda dvouúčelová.

#### Metoda barevné indikace

Při tomto typu kapilární metody se přítomnost necelistvostí projevuje vznikem kontrastní barevné indikace, a to díky barevnému penetrantu společně s bílou vývojkou, většinou to v praxi bývá červená a bílá.

#### Metoda fluorescenční

Metoda zjišťující přítomnost necelistvostí pomocí ultrafialového záření (UV). Vzniklá indikace potom žlutozeleně světélkuje.

#### Metoda dvouúčelová

Dvouúčelová metoda je vlastně průnik dvou dříve zmiňovaných metod, jelikož se indikace zobrazuje pomocí bílého světla nebo světla UV podle toho, které zvolíme.

### 3.2.3 Prostředky

Hlavní prostředky používané při kapilárních metodách jsou tzv. činidla, která se rozdělují na penetranty, vývojkou, emulgátory a čističe (obr. 3.6). Liší se různými vlastnostmi podle druhu kapilární metody. Pravidla o prostředcích používaných při kapilárních metodách a o tom, co musí splňovat, udává technická norma ČSN EN ISO 3452-2 [14].





Obr. 3.6: Prostředky pro PT vyráběné německou firmou Pfänder Chemie – zleva dvouúčelový červený penetrant, bílá kontrastní vývojka, čistič a emulgátor [15].

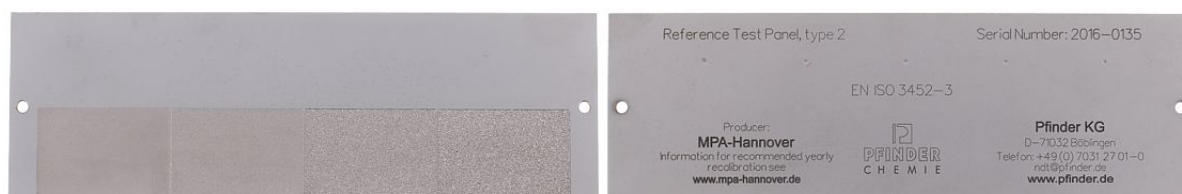
Penetranty se rozdělují podle typu indikace, kterou vytvářejí, dále podle smytelnosti vodou a podle toho, zdali obsahují emulgátor, či nikoliv. Penetranty se před začátkem zkoušení podrobí zkoušce pomocí měrky (obr. 3.7), která ukáže, jestli je penetrant dostatečně výkonný.

#### Rozdělení penetrantů podle typu indikace [1]:

- barevné,
- fluorescenční,
- dvouúčelové – obsahují luminosfór, což je barvivo, které dává možnost použít tento penetrant, buď jako barevný nebo fluorescenční.

#### Rozdělení penetrantů podle smytelnosti [1]:

- nesmytné,
- smytné,
- emulgační,
- postemulgační – emulgátor je nanášen až na přebytek penetrantu, takže necelistvost není emulgátorem zasažena.



Obr. 3.7: Kontrolní měrka typu 2 (výrobce: Pfänder Chemie) sloužící pro ověření činnosti penetračního prostředku (dle normy ČSN EN ISO 3452-3), obsahuje 5 vtisků s odstupňovanou velikostí [15].

#### Vývojky

Hlavními složkami vývojek pro kapilární metody je bílá práškovitá složka (oxidy zinku, hořčíku, vápníku apod.) a nosné prostředí. Podle nosného prostředí se vývojky dělí na [1]:

- suché vývojky – nosným prostředím je vzduch nebo plyn,
- mokré vývojky těkavé – prášek je rozpuštěný v těkavém rozpouštědle,
- mokré vývojky vodné – prášek je rozpuštěný ve vodě.

## Emulgátory

Emulgátory jsou látky, díky kterým je usnadněno rozptýlení pevných látek v kapalině. V kapilárních metodách usnadňují odstranění přebytku penetrantu ze zkoušeného povrchu. Emulgátory se dělí podle rozpustnosti na lipofilní (rozpustné v tucích) a hydrofilní (rozpustné ve vodě).

## Odmašťovače a čističe

Odmašťovače jsou látky odstraňující tuk nebo olej z povrchu, který bude zkoušen příslušnou kapilární metodou, a to před aplikací penetrantu. Většinou jsou to organická rozpouštědla jako benzin, aceton nebo ředilo.

Čističe jsou látky odstraňující zbytek penetrantu z povrchu již po jeho nanesení, opět jsou to organická rozpouštědla. Při aplikaci čističe je důležité nevymýt penetrant z indikovaných nečelistvostí.

### 3.2.4 Vyhodnocení kapilárních metod

Při vyhodnocování kapilárních metod se využívá řada pomůcek, pomocí kterých se srovnávají výsledky a indikace u provedené zkoušky. Tyto pomůcky slouží jako etalon a nazývají se kapilární měrky (obr. 3.8) a slouží tedy k analýze vady na zkoušeném výrobku. Měrky jsou popsány v technické normě ČSN EN ISO 3452-3 [16].



Obr. 3.8: Kontrolní měrka typu 1 pro kapilární zkoušku [15].

## 3.3 Magnetická prášková metoda (MT)

Princip magnetických metod je znám již od konce 19. století, kdy byly pomocí magnetismu zkoušeny oceli, které se poté používali na výrobu děl a pušek [1]. Na začátku století 20. se začaly pomocí magnetu a jím vyvolaných indikací zkoušet barely pro uskladnění střelného prachu. Ovšem nejvíce se magnetických zkoušek začalo využívat až v 30. letech 20. století, kdy byl sestaven první magnetický defektoskop, vynalezena magnetická zkouška prášková a zaveden střídavý proud do magnetické defektoskopie. Dnes je magnetická prášková metoda nedílnou součástí NDT a je využívána v mnoha odvětvích průmyslové výroby, ať už jsou to svary (obr. 3.9), odlitky nebo obrobky. Všeobecné metody a postupy při magnetické práškové metodě jsou dány v technické normě ČSN EN ISO 9934 [17].

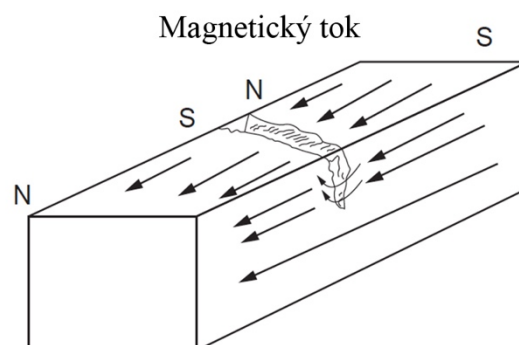


Obr. 3.9: Svar odzkoušený magnetickou práškovou metodou.

### 3.3.1 Princip magnetické metody práškové

Magnetická prášková metoda je zkouška, která se používá pro zjišťování povrchových nebo těsně podpovrchových vad u feromagnetických materiálů. Metoda využívá k rozpoznání necelistvostí magnetismus, konkrétně jeho rozptylový tok, který necelistvost vytvoří nad povrchem materiálu (viz obr. 3.10), a to díky rozdílné relativní permeabilitě, jelikož necelistvost obsahuje vzduch, který má mnohem větší magnetický odpor než feromagnetický materiál. Tento rozptylový tok je potom rozpoznatelný pomocí prášku naneseného na materiál [1].

Je všeobecně známo, že magnetismus úzce souvisí s elektrickým proudem, proto se při magnetické metodě indukuje magnetické pole, právě pomocí elektrického proudu, a to buď pomocí přímého vodiče nebo cívky.



Obr. 3.10: Průchod magnetického pole součásti a rozptylový tok kolem vady [18].

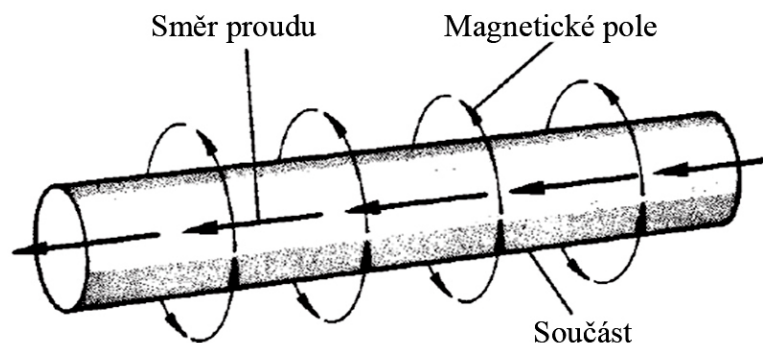
Magnetické metody jsou použitelné pouze na materiál neoslabující magnetické pole, ten se nazývá feromagnetický.

### 3.3.2 Magnetizace a nástroje

Magnetizace je děj, při kterém se v magnetované součásti vytváří magnetické pole. Magnetizace se dělí na cirkulární a podélnou. Cirkulární magnetizace je vyvolána na základě průchodu proudu přímým vodičem, podélná magnetizace je tvořena pomocí toku proudu cívkou. V obou případech se objevují indikace nejlépe kolmé na směr magnetického pole. Existuje ještě speciální případ podélné magnetizace a to tangenciální, která je vytvořena pomocí magnetického jha u kruhovitých součástí. Intenzita vytvořeného magnetického pole se kontroluje pomocí Hallové sondy [5].

#### Cirkulární magnetizace

Cirkulární magnetizace u součástí vyvolává přímým průchodem proudu (schéma zmagnetizované součásti pomocí průchodu proudem na obr. 3.11), to znamená, že se součást upne na koncích pomocí vodiče a nechá se jí protékat proud, v tomto případě se dá říct, že se ze součásti stává přímý vodič, kolem kterého se vytváří kruhové soustředné magnetické siločáry. S takto zmagnetizovanou součástí lze zjistit vady téměř rovnoběžné se směrem proudu. Pro cirkulární magnetizaci přímým průchodem proudu se používá proud o vysoké intenzitě – cca 500 A až 10000 A, napětí je ovšem nízké – cca 3 V až 15 V [5].



Obr. 3.11: Cirkulární magnetizace součásti pomocí průchodu proudu [19].

Cirkulární magnetizace pomocným vodičem stojí na stejném principu jako u přímého průchodu proudem. Pomocný vodič se používá u dutých součástí, kde se provleče dutinou a nechá se jím procházet proud, čímž dojde indukce magnetického pole a předmět se stane zmagnetizovaným. Výhodou pomocného vodiče je možnost zjišťování vad i na vnitřním povrchu dutých předmětů.

#### Podélná magnetizace

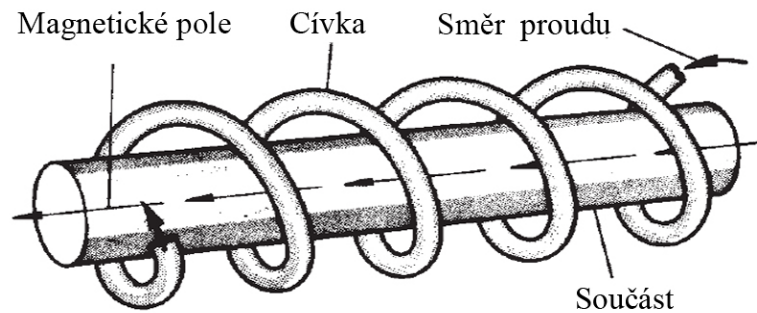
Podélná magnetizace se provádí pomocí cívky (schéma zmagnetizované součásti cívkou na obr. 3.12), kterou lze imitovat i omotáním proudového kabelu [5]. O tom, zdali použijeme cívku, nebo proudový kabel rozhoduje plnicí faktor. Pro vysoký plnicí faktor použijeme proudový kabel pro nízký cívku.

Výpočet plnicího faktoru je v rov. 3.1:

$$\eta = \frac{D_{\text{dílu}}^2}{D_{\text{cívky}}^2}, \quad (\text{rov 3.1})$$

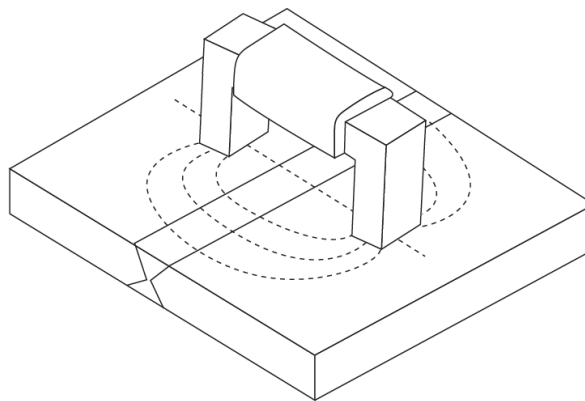
kde:  $\eta$  [%] je plnicí faktor cívky,  $D_{\text{dílu}}$  [mm] je vnější průměr dílu a  $D_{\text{cívky}}$  [mm] je vnitřní průměr cívky.

Předmětem takto zmagnetizovaným probíhají magnetické siločáry rovnoběžně s osou cívky.



Obr. 3.12: Podélná magnetizace součásti pomocí magnetické cívky [19].

Dále se pro podélnou magnetizaci používá magnetické jho (obr. 3.13), což je zkoušecí zařízení se zabudovanou cívkou, které se zkoušeným předmětem tvoří uzavřený magnetický obvod. Magnetický tok je opět v podélném směru, čímž se indukují téměř kolmé příčné vady.



Obr. 3.13: Podélná magnetizace pomocí ručního magnetu neboli jha [18].

### Kombinovaná magnetizace

Tento druh magnetizace kombinuje dva předešlé způsoby magnetizace, a to hlavně z časových a ekonomických důvodů, jelikož jsme takto zmagnetizovaný předmět schopni zkoušet na příčné i podélné vady v jedné operaci.

### 3.3.3 Druhy proudu pro magnetizaci

Při zkoušení výrobků pomocí magnetického pole se pro jeho vytvoření používají různé druhy elektrického proudu.

#### Stejnoseměrný proud (DC)

Stejnoseměrný proud se při magnetickém zkoušení téměř nepoužívá, jelikož je napětí i intenzita proudu časově neproměnná [5]. DC se používá pro zjišťování vad uložených hlouběji pod povrchem součástí, jelikož magnetické pole buzené stejnosměrným proudem prochází celým průřezem. Zdrojem DC je akumulátor.

#### Střídavý proud (AC)

Střídavý proud je v praxi mnohem používanější, jelikož se u něj neustále mění směr i velikost. Frekvence tohoto proudu v běžné rozvodné elektrické síti je 50 Hz a používá se téměř u všech druhů magnetizačních zařízení [1]. Nevýhodou je ovšem hloubka průniku magnetického pole pod povrch součástí, většinou to bývá kolem 2 mm, což znamená, že do této hloubky jsme schopni indikovat necelistvosti. Zdrojem AC je transformátor s nízkým napětím (3 až 15 V).

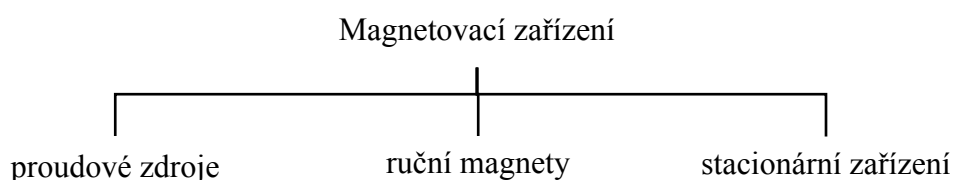


## Usměrněné proudy

Proudy se usměrňují pomocí usměrňovačů jako je například usměrňovací dioda. Proudů usměrněných je vícero druhů, mezi něž patří jednocestně usměrněný střídavý proud (half wave direct current – HWDC), který propouští pouze jednu půlvlnu střídavého proudu. Dále dvoucestně usměrněný střídavý proud (full wave alternating current – FWAC), u kterého se ponechá pouze horní vlna průběhu střídavého proudu. A v neposlední řadě vícefázový usměrněný střídavý proud, nejčastěji třífázový, který má podobný průběh jako DC.

### 3.3.4 Přístrojová technika

O předpisech a pokynech zabývající se přístrojovou technikou, využívanou při magnetické práškové metodě hovoří norma ČSN EN ISO 9934-3 [20]. Rozdělení zařízení pro magnetizaci na obr. 3.14.



Obr. 3.14: Rozdělení magnetovacích zařízení [5].

#### Proudové zdroje

Proudové zdroje jsou výkonné transformátory, jsou nejpoužívanější technikou pro magnetizaci průchodem proudu, a to jak přímým vodičem, tak pomocí cívky. Většinou jsou schopny vytvořit na výstupu střídavý i usměrněný proud.

#### Ruční magnety

Ruční magnet neboli magnetické jho je podkovovité jádro, na němž je navinuta jedna nebo dvě magnetizační cívky. Jho je napájeno střídavým proudem a magnetický tok prochází uzavřeným okruhem přes jádro a zkoušený předmět.

#### Stacionární zařízení

Tento typ zařízení je určený pro sériovou provozní kontrolu, tato kontrola bývá většinou kompletní, proto stacionární zařízení obsahují mnoho zařízení, která jsou schopna vyvolat cirkulární i podélnou magnetizaci. Také přísun detekční kapaliny bývá automatizován, stejně jako osvětlení.

### 3.3.5 Zkušební prostředky

Metoda magnetická prášková je založena na principu zviditelnění magnetických siločar, toho docílíme pomocí prostředků (příkladem jsou spreje na obr. 3.15), které obsahují například železný prach, který ulpí v místě, kde vyházejí siločáry z povrchu nad vadu, a tím ji zviditelní. Zkušební prostředky pro MT podléhají technické normě ČSN EN ISO 9934-2 [21].

Zkušební prostředky jsou rozlišovány podle barvy a způsobu nanášení. Mezi nejpoužívanější patří suspenze a suché prášky.



Obr. 3.15: Spreje pro magnetickou práškovou metodu vyráběné německou společností Pfinder Chemie s.r.o. [22].

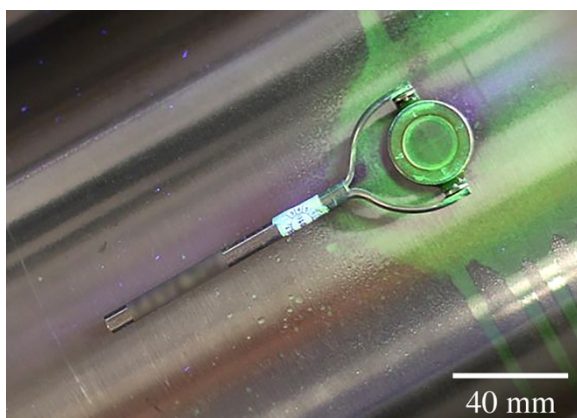
### 3.3.6 Měrky

Měrky jsou pomůcky při magnetizaci součásti sloužící k ověření zkušebních podmínek, jako jsou dostatečná intenzita magnetického pole nebo funkčnost magnetického prášku.

#### Kontrola intenzity magnetického pole

Nejpoužívanější měrka ke kontrole magnetizace je Bertholdova měrka (obr. 3.16), která kontroluje nejen intenzitu, ale také směr pole. Hlavní součástí je nízký ocelový váleček s vybráním, který je rozříznutý dvěma na sebe kolnými řezy [5].

Bertholdova měrka se používá přímo před zkoušením konkrétní součásti, a to položením na zkoušený povrch a zmagnetováním.

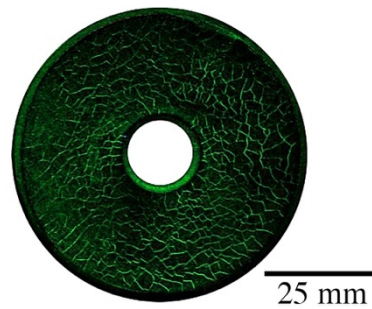


Obr. 3.16: Bertholdova měrka v praxi [22].

Obdobná Bertholdové měrce je ještě měrka ASTM, která funguje na stejném principu.

#### Kontrola funkčnosti magnetického prášku

Mezi ty nejpoužívanější měrky patří měrka MTU-3 (obr. 3.17), která je permanentně zmagnetizovaná a funguje na principu zviditelnění uměle vytvořených trhlinek tloušťek okolo 1 mm. Podle toho, kolik trhlinek se po polítku indikuje, zhodnotíme i funkčnost použité směsi.



Obr. 3.17: MTU-3 měrka [22].

### Kontrola množství magnetického prášku v suspenzi

Po přípravě a namíchání magnetické suspenze z koncentráту, případně ze suchého prášku, se musí zkontrolovat dostatečný obsah prášku v kapalině. K tomuto účelu slouží ASTM baňka, která se naplní 100 ml suspenze a po klesnutí usazeného prášku se na stupnici zkontroluje jeho obsah v mililitrech [21].

### 3.4 Zkoušení ultrazvukem (UT)

Zkoušení vývalků a výkovků ultrazvukem je používáno už od 30. let minulého století, kdy se hledaly vnitřní defekty pomocí poklesu amplitudy ultrazvuku [1]. Hlavní výhodou ultrazvuku byla možnost zkoušet vývalky a výkovky, bez nutnosti je rentgenovat, což nebylo zrovna jednoduché, vzhledem k jejich rozměrům.

Zkoušky materiálu ultrazvukem jsou vhodné pro indikování vnitřních vad různých druhů i velikostí. Technické postupy při zkoušení výrobků ultrazvukem udává technická norma ČSN EN ISO 16810 [23].

#### 3.4.1 Princip ultrazvukového zkoušení

Ultrazvukové zkoušení stojí na principu průchodu vlny materiálem, pokud je materiál bez vnitřních vad, amplituda vlny na výstupu z materiálu nebude nijak porušena. Ultrazvuk lze chápat jako zvukovou vlnu (viz obr. 3.18) o velmi vysoké frekvenci. Toto vlnění je kmitavý pohyb částic prostředí okolo jejich rovnovážných poloh [1]. Závislost výchylky vlny v čase na různých dalších elementech vyjadřuje vlnová rovnice.

Výpočet výchylky v čase je v rov. 3.2 [1]:

$$a(t) = A_0 \cdot \sin \omega \cdot \left(t - \frac{x}{c}\right), \quad (\text{rov } 3.2)$$

kde:  $a(t)$  [m] je výchylka z rovnovážné polohy v čase  $t$  [s],  $A_0$  [m] je amplituda,  $\omega$  [ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ] je úhlová rychlost,  $x$  [m] je vzdálenost kmitajícího bodu od počátku,  $c$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] je rychlost šíření vlny v materiálu.

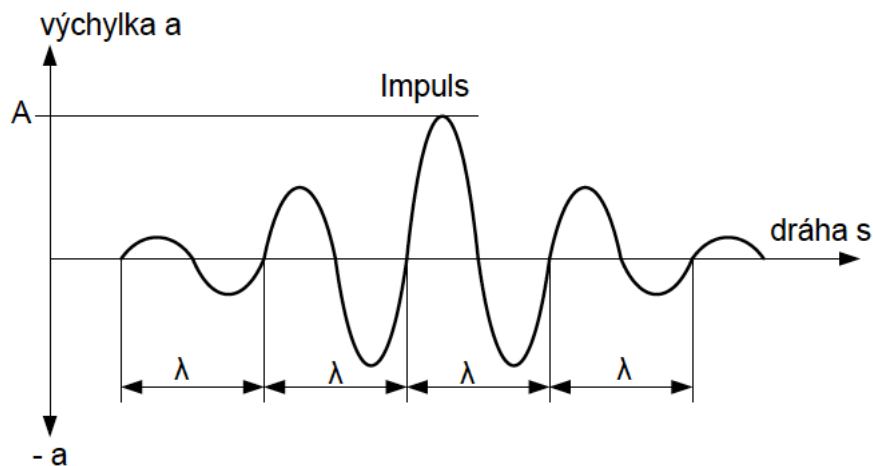
Další důležitou veličinou je vlnová délka  $\lambda$ , která nám udává vzdálenost mezi dvěma body, kmitajícími se stejnou fází.

Výpočet výchylky v čase je v rov. 3.3 [1]:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (\text{rov } 3.3)$$

kde:  $\lambda$  [m] je vlnová délka,  $c$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] je rychlost šíření vlny v materiálu,  $f$  [Hz] je frekvence vlnění.





Obr. 3.18: Amplituda (impuls), vlnová délka [24].

Z obou rovnic je zřejmé, že kmitání ultrazvukové vlny závisí velmi spjatě na rychlosti šíření vlny v materiálu ( $c$ ). Tato veličina je pro každý materiál rozdílná, je ovlivněna modulem pružnosti v tahu ( $E$ ), měrnou hmotností ( $m$ ) a Poissonovým číslem ( $\mu$ ) a také je rozdílná pro různé typy vlnění, jako je podélné a příčné.

### 3.4.2 Druhy ultrazvukových vln

Ultrazvukové vlnění a pohyb částice prostředím může být různého druhu. První z nich je, když částice kmitají ve směru šíření vlny, tomuto způsobu se říká podélné vlnění a vznikají při něm tahové a tlakové síly, neboť se částice vzájemně oddalují a přibližují. Podélné vlnění se šíří v prostředí kapalném a plynném, případně v prostředí dostatečně pružně tuhém.

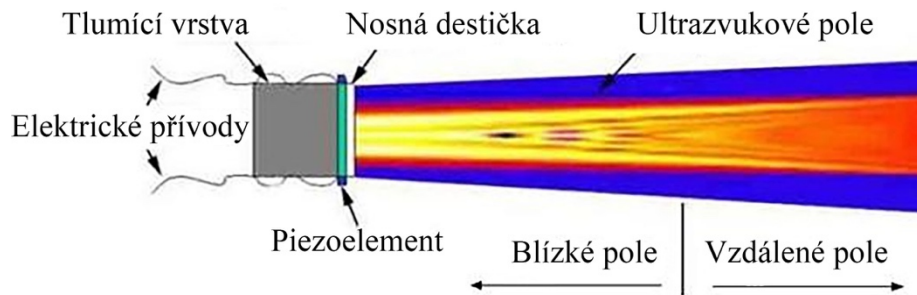
Druhým způsobem vlnění je vlnění příčné, při kterém částice kmitají kolmo na směr vlny, proto se může příčná vlna šířit pouze v určitém prostředí, a to takovém, které je schopno přenášet smykové síly, což jsou jen tuhé látky.

Vlnění, při kterém amplituda povrchové vlny s hloubkou pod povrch rychle klesá, se nazývá povrchové a stejně jako u příčného vlnění, kmitají částice kolmo na směr šíření vlny.

U vlnění se zavádí pojem interference vln, což je vlastně zjednodušeně řečeno sčítání vln, které jsou ve stejném směru. Při střetu dvou vln opačného směru je pak výsledná výchylka vektorovým součinem výchylek původních vln.

### 3.4.3 Zdroje ultrazvukového vlnění

Nejpoužívanějším zdrojem ultrazvukového vlnění na poli NDT je zdroj na principu plošného zdroje, jehož všechny částice kmitají se stejnou amplitudou a fází. Příkladem takového zdroje je piezoelektrický měnič tvaru tenké destičky vyřiznuté z křemene, která při stlačení elektrizuje. Tyto destičky jsou periodicky nabíjeny, tím dochází k jejich smršťování a rozpínání, čímž dochází k tvorbě ultrazvukových vln. V oboru NDT je využíváno impulzní vysílání vln, jelikož obsahuje široké spektrum frekvencí. Impulzové vysílání má za důsledek, že ve vyzařovacím diagramu (obr. 3.19) jsou méně výrazné postranní laloky a také jsou menší rozdíly mezi maximy a minimy akustického tlaku v blízkosti polí než u spojitého vysílání [1].



Obr. 3.19: Vyzařovací diagram vzniklého ultrazvukového pole [25].

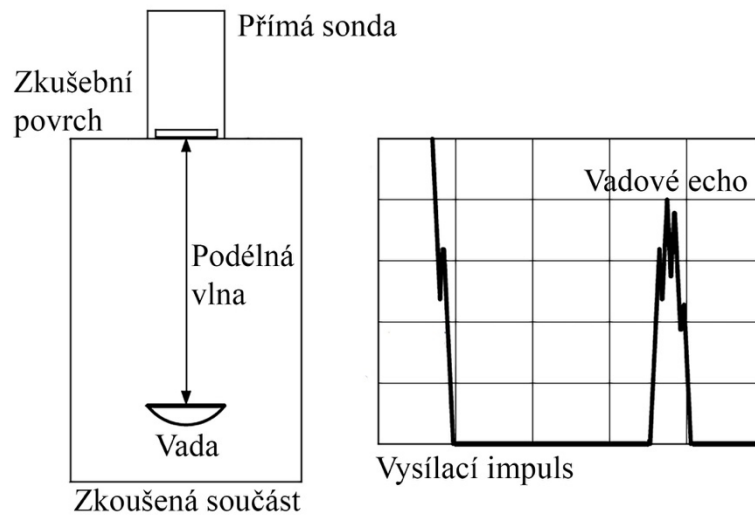
### 3.4.4 Ultrazvukové sondy

Ultrazvuková sonda (řada ultrazvukových sond na obr. 3.20) je zařízení, které vysílá vlnění do materiálu a následně přijímá zpětně echo. V NDT existuje pár požadavků, které musí ultrazvuková sonda splňovat. První z požadavků na UT sondu je schopnost vytvářet impulzy o velké amplitudě, aby se vlnění dostalo hluboko pod povrch materiálu, ten druhý je pak vysílání co nejkratšího impulzu, z důvodu dobré rozlišovací schopnosti.

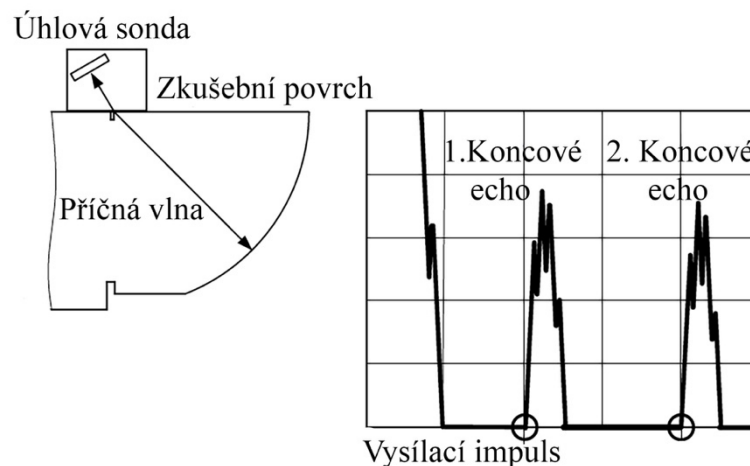


Obr. 3.20: Ultrazvukové sondy vyráběné společností PTS Josef Solnař s.r.o. [26].

UT sondy se rozdělují podle způsobu generování ultrazvukového vlnění, což znamená podle toho, jakým měničem sonda disponuje. Jsou to sondy s piezoelektrickým, magnetostrikčním a elektrodynamickým měničem, jak už bylo zmíněno v kap. 3.4.3., nejpoužívanější měniče jsou piezoelektrické. Dalším rozdělením sond je podle směru generování vlnění na přímé, úhlové a dvojité. Přímé sondy (obr. 3.21) se používají u výrobků, které mají dostatečně rovný a hlavně dobře přístupná povrch. Úhlové sondy (obr. 3.22) pak fungují na bázi pod úhlem například 35°, 45° a 60°, tyto sondy se přizpůsobují zakřivení povrchu. Úhlových sond se využívá například u zkoušení svarů. Dvojité sondy mají dva izolované měniče, přičemž jeden slouží na vysílání vlnění a druhý na přijímání ech z materiálu. Využívají se hlavně pro měření tloušťky materiálu a pro indikování vad těsně pod povrchem materiálu.



Obr. 3.21: Použití přímé ultrazvukové vady [24].



Obr. 3.22: Použití úhlové ultrazvukové sondy [24].

### 3.4.5 Metody ultrazvukového zkoušení

Ultrazvukové zkoušení využívá v praxi dvou metod, průchodové a odrazové. Průchodová metoda využívá dvě sondy umístěné proti sobě, přičemž jedna signál vysílá a druhá přijímá oslabený ultrazvuk vycházející z materiálu. Princip této metody stojí na oslabení ultrazvukového vlnění při průchodu materiálu s vadou. Druhá metoda, metoda odrazová využívá pouze jeden měnič, pomocí jehož se vlnění vysílá a jeho odraz i přijímá.

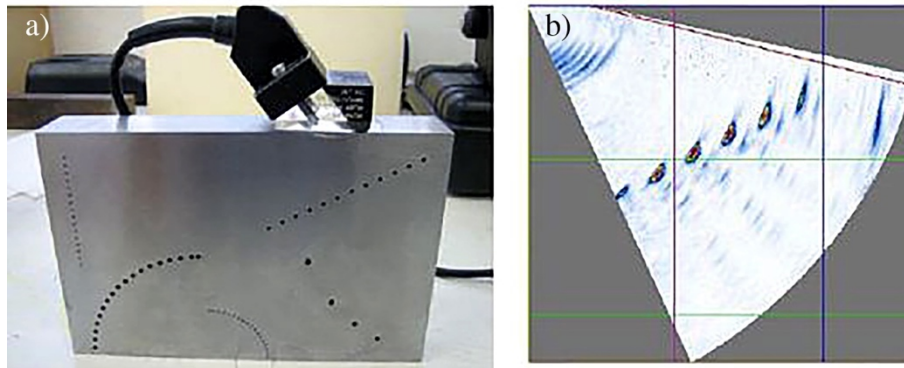
Při porovnání obou metod zjistíme, že u průchodové metody musí ultrazvuk překonat poloviční dráhu než u metody odrazové, pro zkoušení ale musí být připraven povrch na dvou místech. Velkou výhodou odrazové metody je možnost určit vzdálenost vady pod povrchem a v některých případech také její druh.

### 3.4.6 Speciální techniky

Pro zjednodušení a zvýšení efektivity práce při ultrazvukovém zkoušení tvarově složitých výrobků, svaru a tlustostěnných odlitků byly vyvinuty různé speciální techniky, které využívají specifický druh sond a přístrojů.

### Phased array

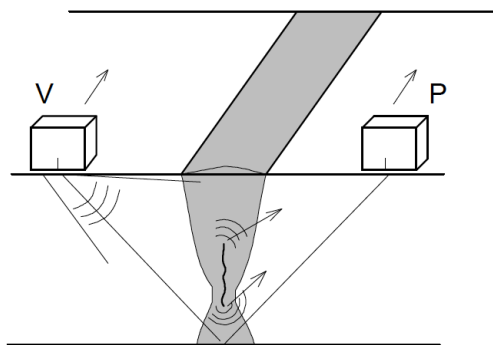
Technika phased array je specifický druh ultrazvukového zkoušení pomocí sondy obsahující soustavu malých lineárně uspořádaných měničů, z nichž každý je buzený samostatným generátorem a signály. Tento fakt dává této technice možnost zjišťovat různě orientované trhliny v různých vzdálenostech pod povrchem pomocí jedné sondy (obr. 3.23). Hlavní výhodou oproti klasické technice prozvučování je mnohem větší přesnost a úspěšnost odhalení vad u geometricky složitých součástí.



Obr. 3.23: Zkoušení vzorku technikou phased array [27], a) ultrazvuková sonda přiložena na zkoušený vzorek s umělými vadami, b) snímek nalezených vad na displeji přístroje.

### Technika TOFD

Time-of-flight diffraction (zkr. TOFD) technika je často používána jako způsob prozvučování svarů (obr. 3.24), při kterém se stejně jako u průchodové metody používají dvě sondy, jedna jako vysílač podélné vlny a druhá jako přijímač echa. TOFD je vždy prováděna za počítačové podpory, kde se z nasnímaných ech vytváří obraz materiálu, případně defektů, díky tomu lze zjistit i jejich přibližné rozměry a hloubku.



Obr. 3.24: Schéma zkoušení svaru pomocí techniky TOFD [28].

#### 3.4.7 Požadavky pro provedení zkoušky

Jeden z hlavních požadavků pro správné šíření vlnění ze sondy do materiálu je tzv. akustická vazba, která vzniká mezi sondou a povrchem materiálu. Akustickou vazbu nemůže tvořit vzduch, proto se na zkoušený povrch nanáší kapalina, která tuto vazbu vytvoří, její funkce je zvyšovat množství akustického tlaku, který přejde do materiálu. Jako vazebná média se nejčastěji používají voda nebo olej, při méně opracovaných površích pak vazelína nebo glycerín. Proto dalším z požadavků je kvalita zkoušeného povrchu, která má velký vliv na výsledek zkoušení. Drsný povrch při zkoušení zapříčiní ztrátu akustického tlaku a zamezí tak přechodu vlnění ze sondy do materiálu.

Kvalitě ultrazvukového prozvučení odpovídá i druh zkoušeného materiálu, který by měl mít polykrystalickou strukturu, ovšem i kovy s touto strukturou, při mnoha výrobních procesech mohou trpět anizotropií, což je vlastnost materiálu, která mu dává rozdílné vlastnosti v různých směrech. To znamená, že anizotropním materiálem prochází ultrazvukové vlnění jen v některých směrech. Dále ovlivňuje kvalitu zkoušky zrnitost materiálu, když má velká zrna, odráží se ultrazvuk od hranic těchto zrn a vznikají falešná echa. Falešná echa mohou vznikat i vlivem tvaru zkoušeného výrobku je tomu tak například u svarů nebo u výrobků s dírou.

### 3.5 Zkoušení prozařováním (RT)

Za vznikem metody zkoušení prozařováním stojí profesor W.C. Röntgen, který objevil záření nesoucí jeho jméno, stalo se tomu na přelomu 19. a 20. století. V této době byl vytvořen i první rentgenový snímek součásti, a to hlavně brokovnice profesora Röntgena [1]. Tento objev byl dále rozvíjen, až do podoby dnešní technické rentgenologie.

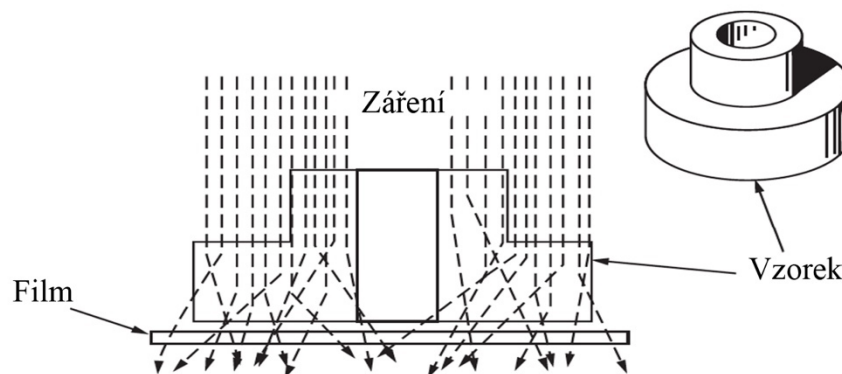
Rentgenová metoda se používá v dnešní době pro zkoušení svarů, odlitků a mnoha dalších součástí. Hlavní výhodou je možnost prozáření celého průřezu součásti, a tím odhalení téměř veškerých vnitřních vad. Předpisy a technické postupy při rentgenovém zkoušení jsou popsány pomocí mnoha technických norem, základní předpisy jsou však dány normou ČSN EN 5579 [29].

#### 3.5.1 Princip zkoušení prozařováním

Radiografická zkouška je založena na principu absorbování pronikajícího záření zkoušeným materiálem (obr. 3.25), toto záření lze definovat jako šíření energie prostorem, a to pomocí elektromagnetického vlnění [1,30]. Záření je dvojího druhu – rentgenové nebo záření gama.

Množství absorbovaného záření materiálu závisí na hustotě a jeho tloušťce. Procházející záření materiálem je zaznamenáno na radiografický film, který nám poskytuje vizuální obraz a informaci o velikosti a umístění vad [30]. Hlavním nositelem této informace je foton, což je vlastně částice elektromagnetického pole, který se při záření pohybuje rychlostí světla.

Po prozáření materiálu a vyvolání radiografického filmu se analyzují vady pomocí změny odstínu šedé barvy na snímku, citlivost pro zobrazení na snímku je závislá na její orientaci.



Obr. 3.25: Schéma prozařování zkoušené součásti pomocí rentgenového záření [31].

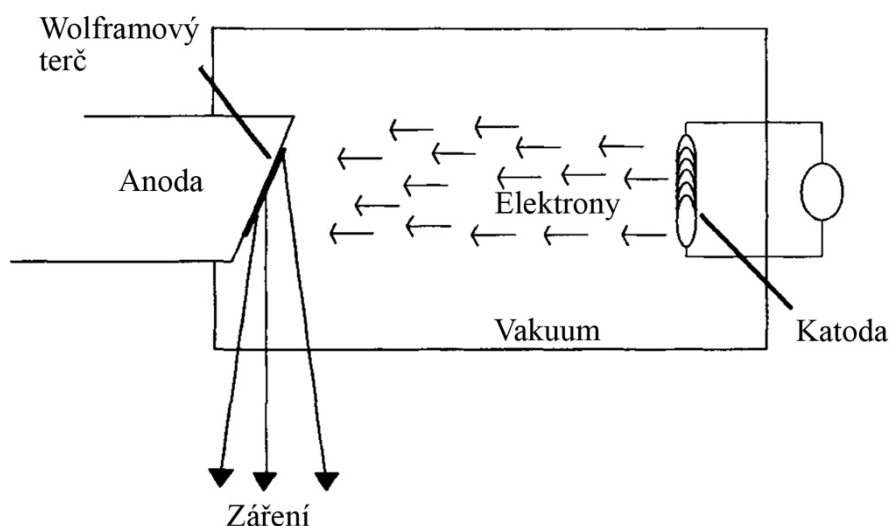
#### 3.5.2 Druhy záření

V technické radiografii jsou používány dva druhy záření – záření rentgenové a záření gama. Oba dva druhy jsou krátkovlnné fotonové záření, což znamená, že mají extrémně krátké vlnové délky a vyzařují velké množství energie [18]. Rentgenové záření vzniká v elektronovém obalu

atomu, zatímco vznik záření gama zapříčiňuje přechod atomového jádra z vyššího energetického stavu do nižšího.

### Vznik rentgenového záření

Rentgenové záření je generováno rentgenovým paprskem trubice z interakce mezi zrychlenými elektrony a materiálem. Rentgenová trubice (obr. 3.26) se skládá z katody obsahující vlákno a anody obsahující kovový wolframový terč, katoda i anoda se nacházejí ve vakuu. Vlákno je zahříváno elektrickým proudem a při žhavení jsou emitovány elektrony, které jsou zrychlovány mezi katodou a anodou. Elektrony pak naráží na malou oblast nazývanou ohnisko a jsou absorbovány materiálem. [30]



Obr. 3.26: Nákres rentgenová trubice – rentgenky [30].

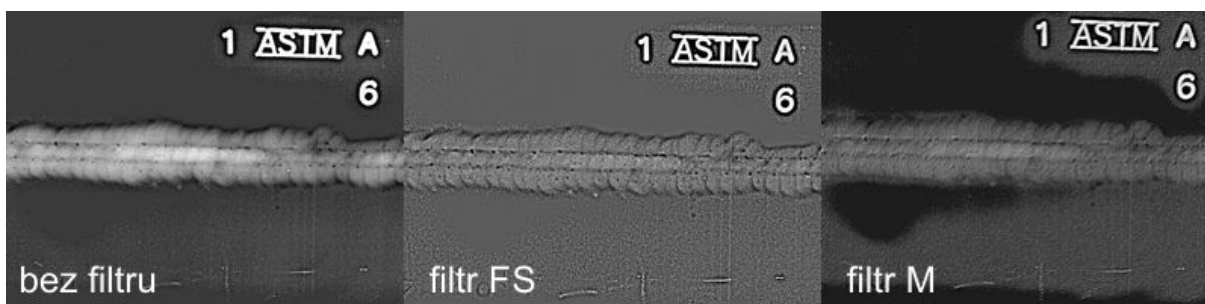
### Vznik gama záření

Gama záření je emitováno v průběhu radioaktivního rozpadu nestabilního izotopu, nejčastěji je to iridium-192 nebo kobalt-60 [30]. Gama záření je obvykle méně citlivé, než záření rentgenové a jeho doba použití je závislá na době rozpadu izotopového zdroje, také operace s izotopem v uzavřené jednotce je rizikovější než u rentgenového záření.

#### 3.5.3 Radiografický film

Snímání obrazu je důležitým aspektem průmyslové radiografie. Nejčastější metodou snímání je zachycování snímků na radiografický film (obr. 3.27). Radiografický film se skládá z nosné podložky o tloušťce cca 0,1 mm, dále z oboustranné emulsní a oboustranné ochranné vrstvy. Jako nosná podložka se používá polyetylenová fólie, která je transparentní pro světlo [1]. Emulsní vrstva je potřena želatinou a pokryta zrnky bromidu stříbrného. Ochranná vrstva je přítomna na filmu z důvodu ochrany želatinové vrstvy, která je měkká a při vyvolání filmu zajišťuje kontakt s roztoky chemikálií.

Radiografické filmy se rozdělují na ionizační (rentgenový film) a luminiscenční (fluorescenční film).



Obr. 3.27: Radiografický film svaru [31].

### 3.5.4 Fólie

Fólie v radiografii jsou pomůcky, mezi které se vkládá radiografický film. Fólie se rozdělují podle svého účinku na kovové, fluorescenční a fluorometalické.

Kovová fólie zvyšuje očekávaný kontrast a snižuje množství rozptýleného záření. Kromě filtrujícího účinku mají fólie také zesilující účinek [1]. Fluorescenční fólie má v sobě obsaženy chemické látky, které září viditelným světlem pod ionizujícím zářením, díky tomu dochází ke zvýšení zčernání, a tím zesílení filmu. Fólie fluorometalická je ve výsledku kombinací kovové a fluorescenční fólie.

### 3.5.5 Vyvolávání filmů

Vyvolávání radiografických filmů mokřým chemickým procesem stojí na principu zviditelnění zrn bromidu stříbrného na emulzní vrstvě filmu. Tato zrna se stávají pro oko viditelná po předchozím osvětlení viditelným nebo ionizujícím zářením. Před vyvoláním je film bez obrazu, pouze je na něm latentní obraz, který byl vytvořen ozářením. Pro zviditelnění tohoto obrazu je třeba provést proces vyvolání, který se skládá ze čtyř lázní – vývojka, přerušovací lázeň, ustalování a praní.

#### Vývojka

Vývojka jako první lázeň vyvolávacího procesu kombinuje dva druhy chemikálií akcelerátor a redukční prostředek. Akcelerátor odstraňuje ochrannou vrstvu filmu a vytvoří zásaditý roztok vývojky, redukční prostředek pak redukuje ozářená zrna bromidu stříbrného na stříbro, tím se zmenšuje kontrast filmu.

#### Přerušovací lázeň

Přerušovací lázeň zastavuje účinek vyvolávacích látek neutralizací a odstraňuje zbytkové alkálie před ustalováním, a tím chrání ustalovač [1].

#### Ustalovač

Ustalovač je třetí lázeň vyvolávacího procesu, jeho funkce je zprůhlednění filmu v místech, kde se nachází neozářená zrna bromidu stříbrného, tím že je rozpustí. Další funkcí je vytvrzení želatinové vrstvy, z důvodu ochrany před poškrábáním.

#### Praní

Konečná fáze vyvolávacího procesu se nazývá praní a provádí se v tekoucí vodě. Po praní už se film jen vysuší. Tím je proces mokřého chemického vyvolávání dokončen.

### 3.5.6 Měrky

Radiografické měrky slouží pro ověření dodržení zvolených podmínek prozařování, to znamená posouzení příslušné citlivosti metody.



### Otvorová měrka

Otvorová měrka (obr. 3.28) se skládá z destiček jednotné tloušťky a otvorů stejného, nebo různého průměru v závislosti na tloušťce destičky, která je volena podle tloušťky prozařované stěny [1]. Slouží pro stanovení jakosti obrazu na radiogramu.



Obr. 3.28: Otvorová měrka dle normy ASTM [32].

### Stupňová měrka

Stupňová měrka je jedna z používaných radiografických měrek, která má tvar stupňových klínů po 0,25 mm. Měrka udává tloušťkovou citlivost, což je tloušťka rozlišitelného stupně na radiogramu v závislosti na prozařované tloušťce.

### Drátkové radiografické měrky

Drátkové měrky (obr. 3.29) se skládají z řady paralelně seřazených drátků různého průměru [1]. Pro odstupňování drátků se používají po celém světě různé normy. Drátků je většinou šest a jsou odstupňovány od nejmenšího průměru 1 mm.

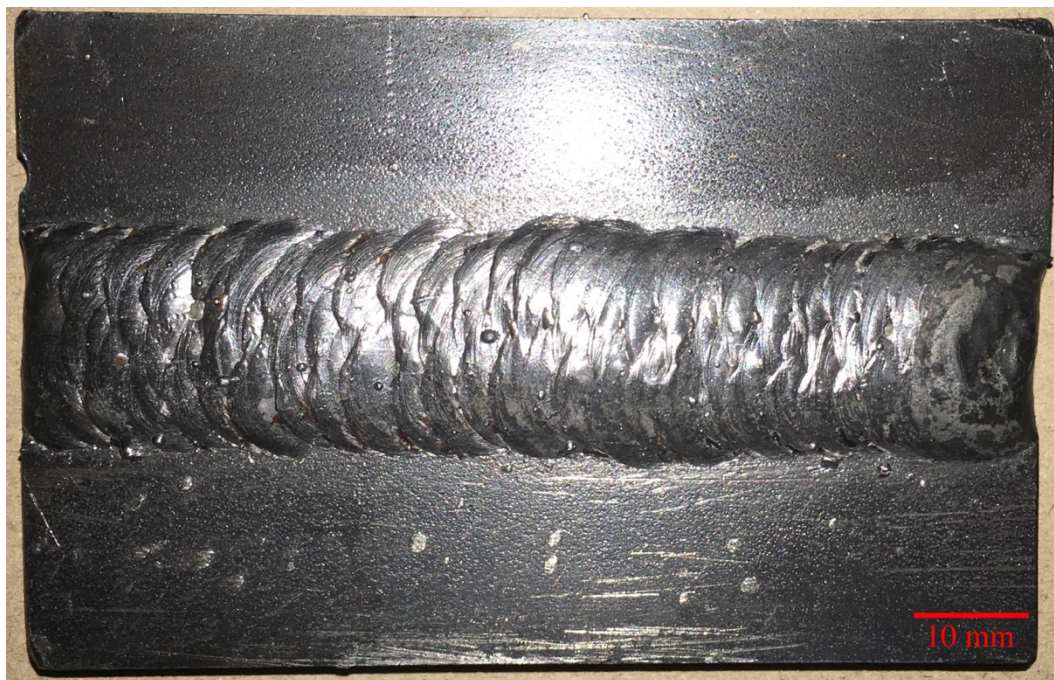


Obr. 3.29: Drátková měrka dle normy ASTM [33].



## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY SVARU

V experimentální části práce byly pro zvolený vzorek svaru (viz obr. 4.1) vybrány vzhledem k velikosti a technologii svařování tři nedestruktivní metody. Přítomnost vnitřních vad svaru je indikována pomocí metody prozařovací – rentgenové, vady povrchové či těsně podpovrchové zobrazí zkouška kapilární a kontrola povrchu svaru a oblastí kolem něj je provedena dle pravidel a postupů vizuální metoda.

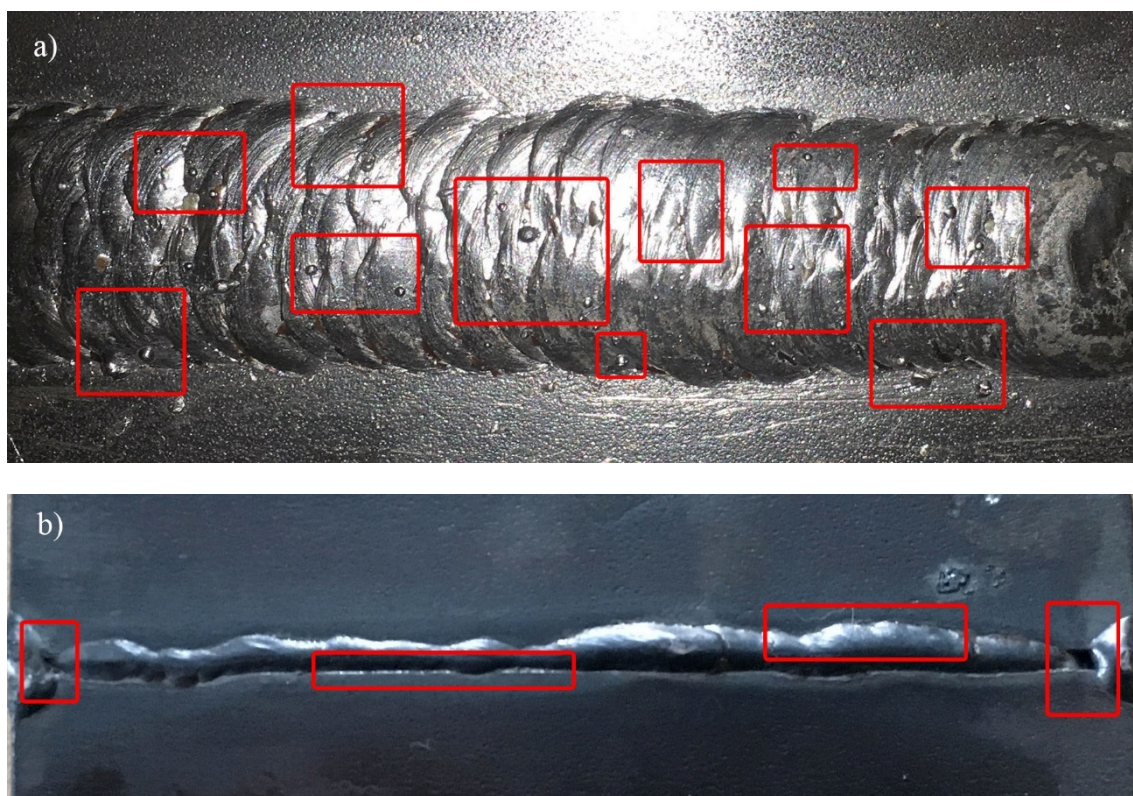


Obr. 4.1: Zkušební vzorek – svar.

Vzorek se skládá ze dvou svařených ocelových desek, které jsou vyrobeny z konstrukční uhlíkové oceli S235JR. Pro vytvoření svaru byla použita metoda MIG s inertním plynem Ar+CO<sub>2</sub> a elektroda o průměru 1,6 mm. Další materiálové specifikace ohledně zkušebního vzorku se nachází v příloze č.1.: Materiálový list vzorku.

### 4.1 Vizuální zkouška

Při pohledu na svar je zřejmé, že svarová housenka je z hlediska vizuální zkoušky nepřijatelná, a to z mnoha důvodů. Hlavním z nich je přítomnost velké množství tzv. kuliček, které na povrchu vznikly rozstříkáním roztavené elektrody při svařování. Tyto vady jsou zvýrazněny na obr. 4.2 a). Co se týče kořene svaru, je zřejmé, že z hlediska vizuální zkoušky je také zcela nepřijatelný, a to hlavně kvůli zřetelným díram v kořeni svaru. Další vadou je nečelivost svaru, svar nemá po celé délce stejnou tloušťku a také nevyplňuje ve vyznačených místech na obr. 4.2 b) celý spoj.



Obr. 4.2: Vizuální zkouška svaru – a) svarová housenka, b) kořen svaru.

## 4.2 Kapilární zkouška

Pro indikaci povrchových vad u tohoto konkrétního svaru je zvolena zkouška kapilární. Obdobnou volbou by byla zkouška magnetická, ta je však vzhledem k rozměrům vzorku nepoužitelná. Konkrétní kapilární metoda byla zvolena metoda barevné indikace (kap. 3.2.2.), při kontrastním prostředí červený penetrant a bílá vývojka (kap. 3.2.3.), jako penetrant byl použit sprej PFINDER 860 a jako vývojka PFINDER 890, oba spreje vyrábí německá společnost Pfänder Chemie (viz obr. 4.3).



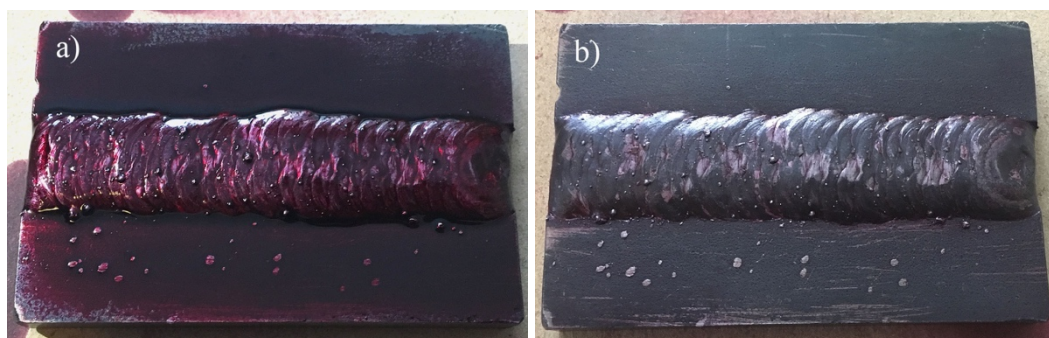


Penetrant

Vývojka

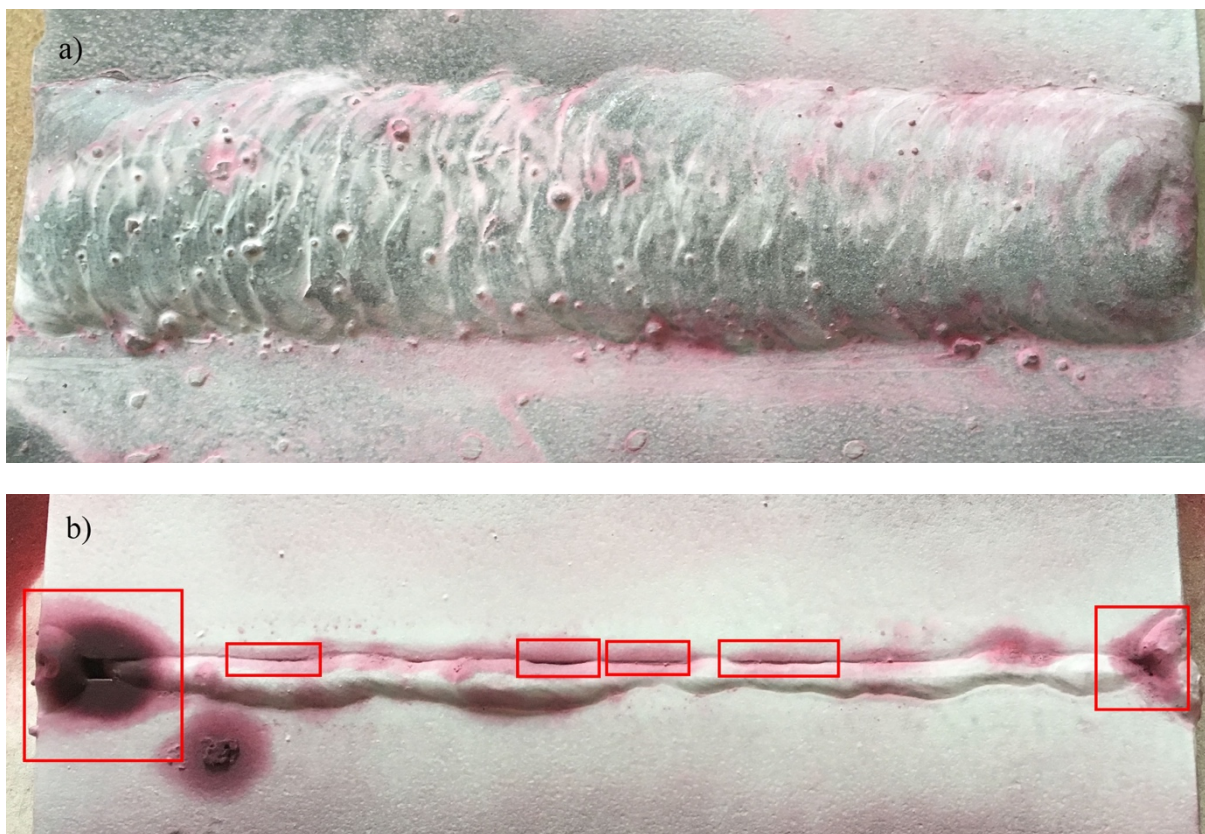
Obr. 4.3: Použité spreje při kapilární zkoušce.

Na kořen svaru i svarovou housenku byla nanесena vrstva penetrantu (obr. 4.4 a)), která se nechala pět minut působit, tak aby penetrant zatekl do nečistostí. Následně se přebytečný penetrant důkladně odstranil, aby byl kontrast mezi vývojkou a penetrantem co nejlepší (obr. 4.4 b)).



Obr. 4.4: Postup kapilární zkoušky – a) nanесení pentrantu na svarovou housenku, b) očištění přebytečného penetrantu.

Na očištěný povrch byla nanесena bílá vývojka, která postupně zobrazí červenou indikací vady na svarové housence (obr. 4.5 a)) a v kořeni svaru (obr. 4.5 b)). Dle výsledku kapilární zkoušky je svarová housenka v pořádku, jelikož se na jejím povrchu neindikovaly žádné vady. V případě kořene svaru je tomu naopak, ten je z hlediska norem kapilární zkoušky absolutně nepřijatelný, a to z mnoha důvodů. Díry po stranách kořene, které jsou popsány již ve vizuální kontrole, byly kapilárně indikovány také, dále jsou na obrázku 4.5 b) zvýrazněny studené spoje a podélné trhliny.

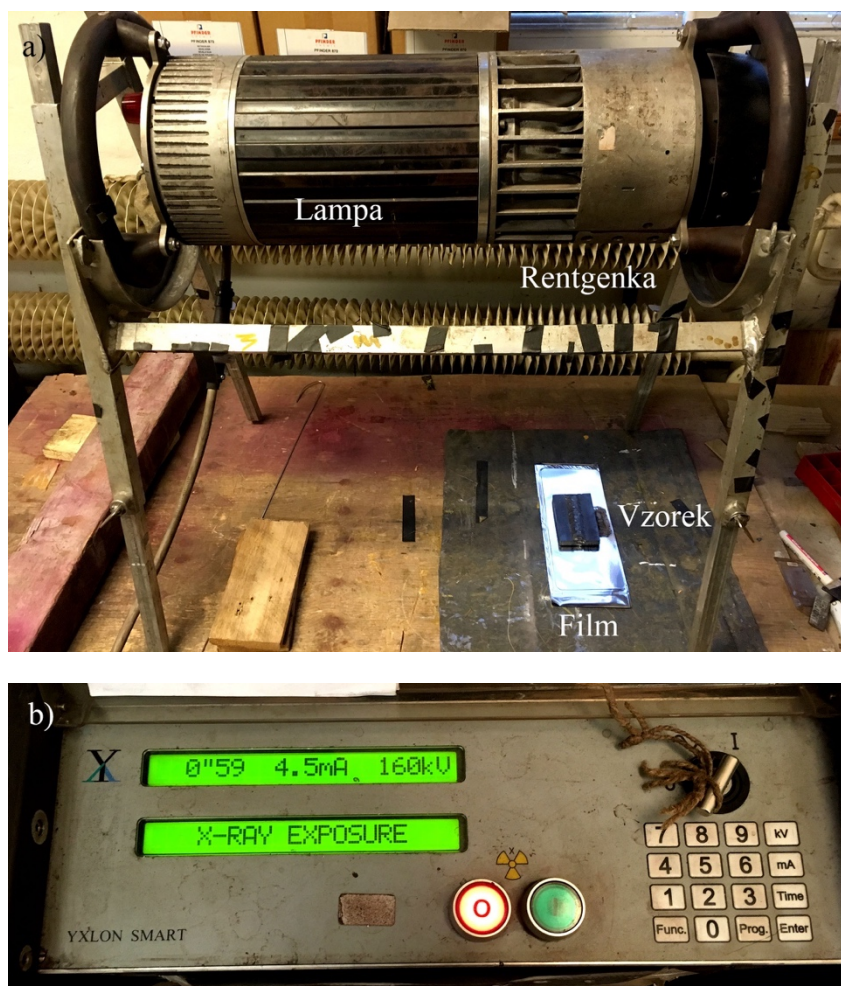


Obr. 4.5: Výsledek kapilární zkoušky – a) svarová housenka po použití vývojky, b) kořen svaru po použití vývojky se zobrazenými vadami.

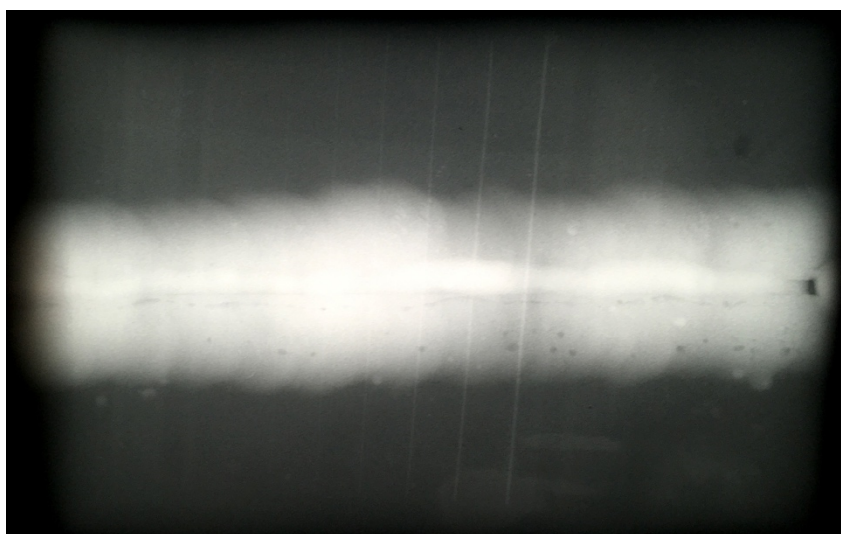
### 4.3 Zkouška prozařováním

Pro indikaci vnitřních vad byla provedena zkouška prozařováním, konkrétně zkouška rentgenovým zářením. Celý proces se skládá z jednoho hlavního nástroje (obr. 4.6 a) – rentgenové lampy, která v sobě obsahuje rentgenku (kap. 3.5.2.). Tato lampa je ovládána pomocí ovládacího panelu (obr. 4.6 b)). Vzorek je položen na radiografický film, kam se výsledek zkoušky zaznamená. Pro naši konkrétní tloušťku vzorku svaru 12 mm byl použit čas prozařování 1 min 20 s a proud 4,5 mA, mezi katodou a anodou pak napětí 160 kV, tyto hodnoty byly zvoleny podle normy ČSN EN ISO 5579 [29].



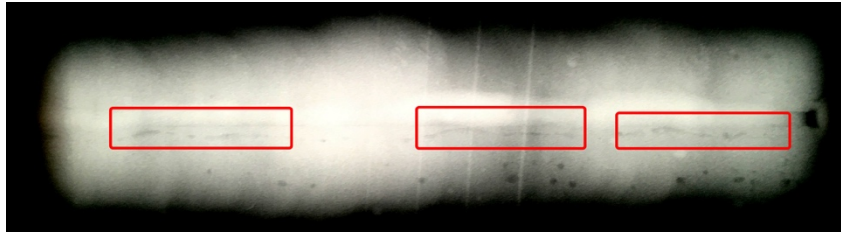


Obr. 4.6: Hlavní nástroj pro zkoušku prozařování – a) rentgenová lampa, b) ovládací panel.  
Po dokončení procesu prozařování byl následně radiografický film (obr. 4.7) vyvolán v temné místnosti (kap. 3.5.5.). Originál radiografického filmu se nachází v příloze č.3.



Obr. 4.7: Vyvolaný radiografický film svaru.

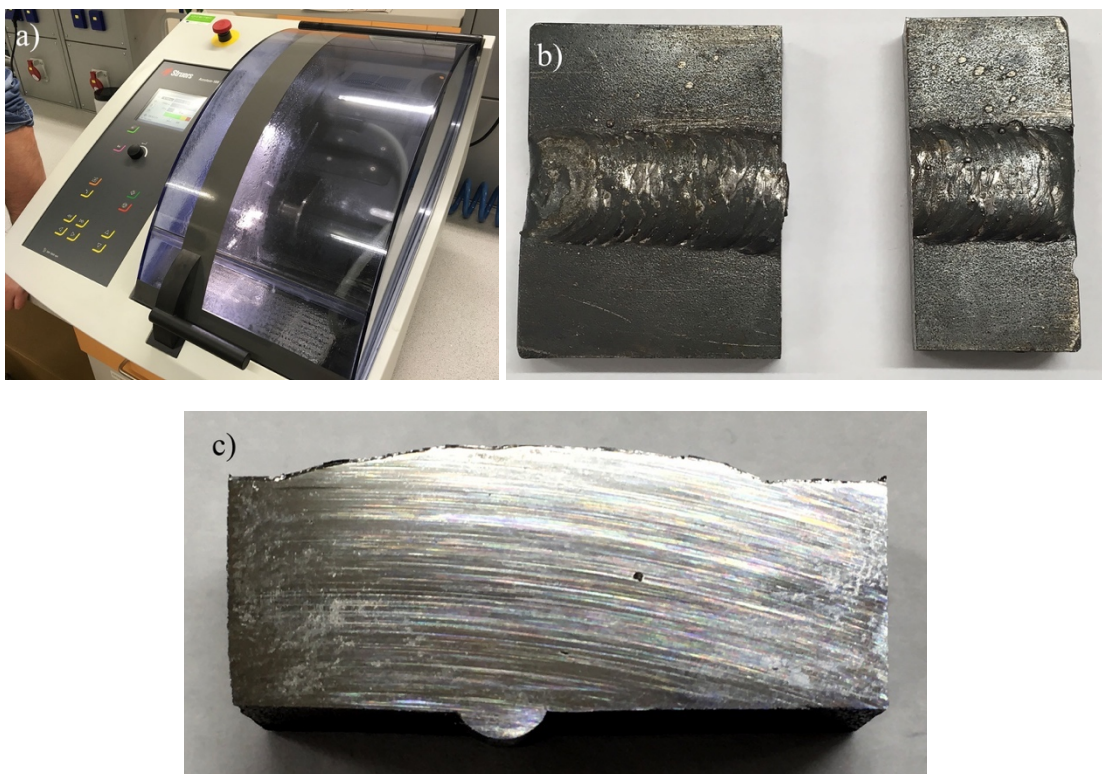
Při prozkoumání prozářeného svaru na vyvolaném filmu je zřejmé, že uvnitř svaru se nachází množství dutin, tyto vady jsou zvýrazněny na obr. 4.8.



Obr. 4.8: Vnitřní vady svaru.

#### 4.4 Destrukční zkouška svaru

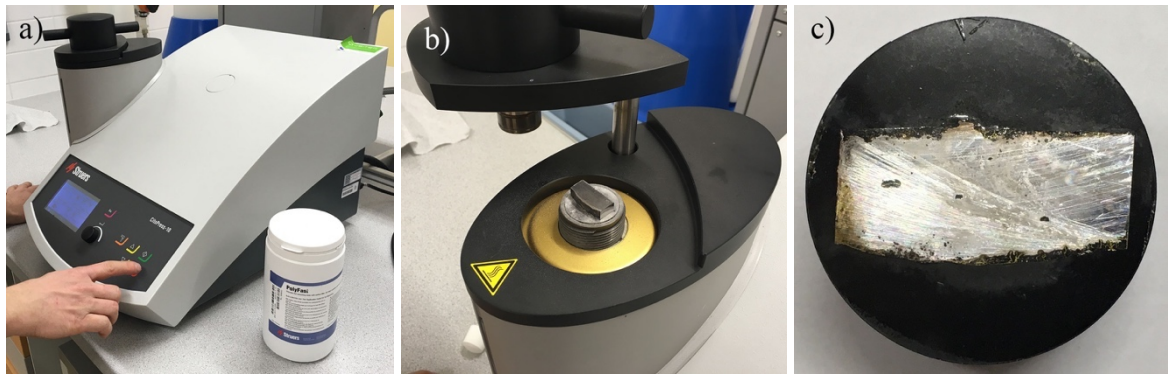
Pro ověření správnosti indikace vad pomocí nedestruktivních zkoušek byl vzorek rozříznut (obr. 4.9 b)) pomocí pily Acutom-100 dánského výrobce Struers (obr. 4.9 a)). Následně byl vyříznut malý segment ze svaru (obr. 4.9 c)), který byl následně použit pro vytvoření metalurgického výbrusu. Při řezání byla snaha provést řez v místě, kde se nachází podélná trhlinka či studený spoj, díky přesnosti a variabilitě nastavení této moderní pily, tomu bylo dosaženo.



Obr. 4.9: Výřez části svaru pro ověření nálezu nedestruktivní zkoušky – a) pila Struers Acutom-100, b) rozříznutý vzorek svaru, c) příprava pro metalurgický výbrus.

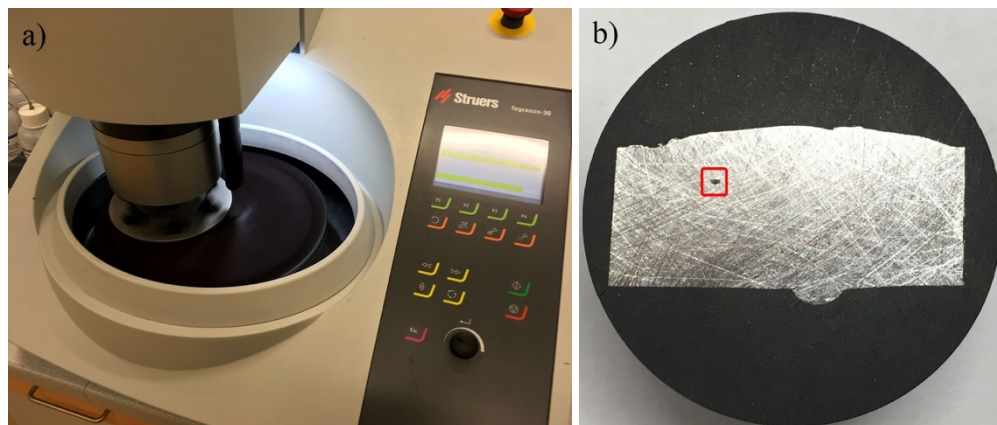
Následně byl tento vyříznutý segment svaru zalisován (obr. 4.10) za tepla pomocí vodivé pryskyřice PolyFast (Struers). Tento proces byl realizován při teplotě 180 °C a tlaku 250 bar pomocí lisu Struers CitoPress 10, doba lisování za tepla byla 5 min.





Obr. 4.10: Výroba zalisovaného metalurgického výbrusu – a) Struers CitoPress 10, b) vkládání vzorku do stroje, c) zalisovaný vzorek.

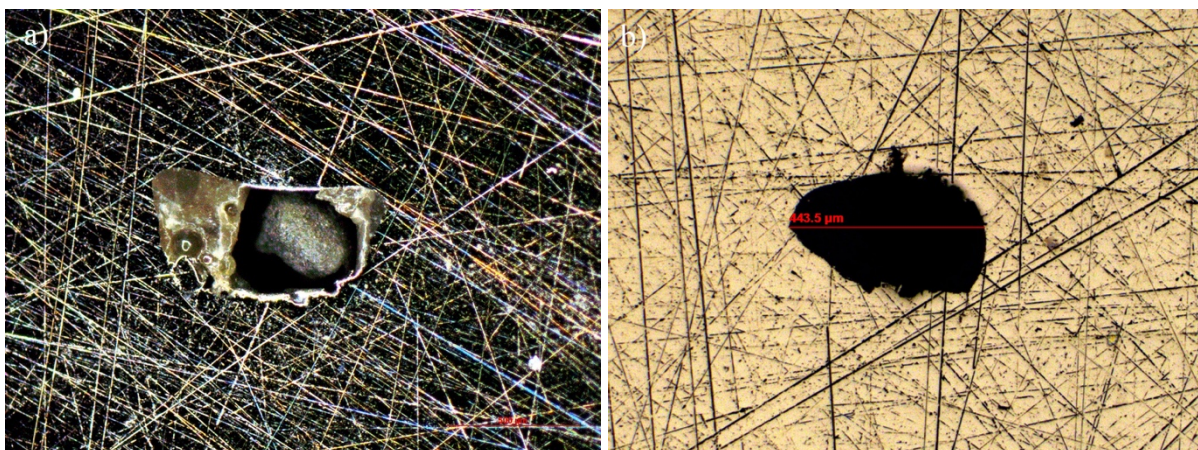
Vytvořený metalurgický vzorek má však nevhodný povrch pro zkoumání na mikroskopu. Tento povrch je drsný a nachází se na něm stopa od řezného kotouče, případně přebytek vodivé pryskyřice. Pro zdokonalení povrchu byl použit leštící stroj Tegramin 30 od dánského výrobce Struers (obr. 4.11 a)), pomocí kterého se vyleští povrch vzorku ve třech vlnách (obr. 4.11 b)) – od nejdrsnějšího (9  $\mu\text{m}$ ) k jemnějšímu (1  $\mu\text{m}$ ).



Obr. 4.11: Leštění povrchu metalurgického vzorku – a) leštička Tegramin 30, b) vyleštěný vzorek se zvýrazněnou vadou.

#### 4.5 Optický mikroskop

Na připraveném metalurgickém výbrusu se podařilo docílit zobrazení vady, která byla indikovaná pomocí nedestruktivních zkoušek. Tato vada a celý metalurgický výbrus byly následně zkoumány pod sterolupou (obr. 4.12 a)) a optickým mikroskopem Zeiss (obr. 4.12 b)). Díky zobrazení na optickém mikroskopem bylo zjištěno, že dutina má průměr 443.5  $\mu\text{m}$ .



Obr. 4.12: Zobrazení vzorku s vadou – a) stereolupa zvětšení 5x – detail vady, b) optický mikroskop Zeiss.

#### 4.6 Elektronový mikroskop

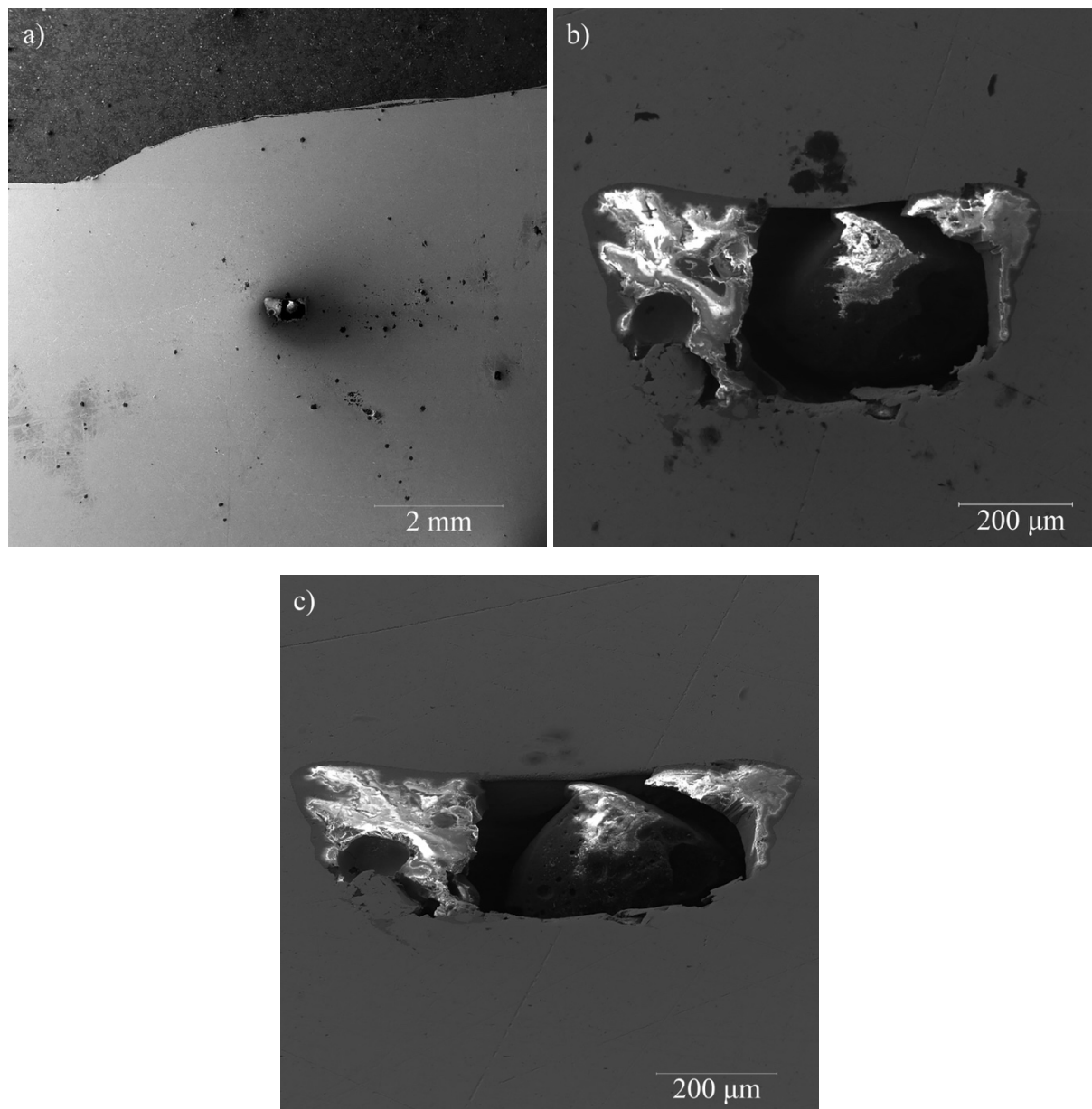
Vzorek byl podroben i prozkoumání pod elektronovým mikroskopem Tescan Lyra3 (obr. 4.13). Díky tomuto mikroskopu byla vada zobrazena s větším přiblížením a pod úhlem, následně byl podroben materiálové analýze.



Obr. 4.13: Elektronový mikroskop Tescan Lyra3 [34].

Při zobrazování následujících pohledů na vzorek (obr. 4.14) bylo použito napětí 20 kV.



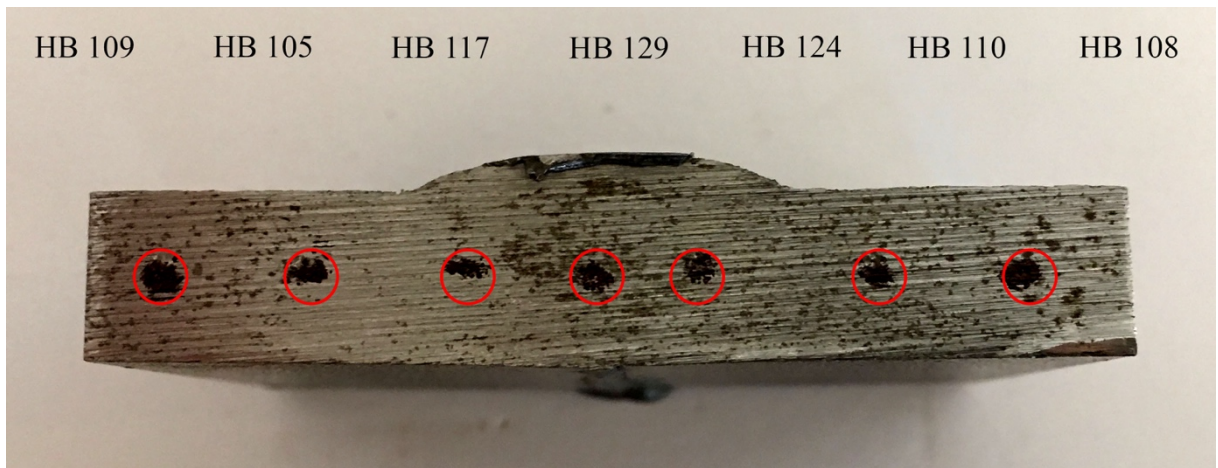


Obr. 4.14: Zobrazení vady pomocí elektronového mikroskopu – a) zvětšení 24x, b) zvětšení 217x, c) zvětšení 217x, náklon pohledu 55°.

V příloze č.2 je přiložen materiálový rozbor vady a jejího okolí, z jeho výsledků je však možné usoudit, že okolí vady (dutiny) je ochuzeno o železo (Fe) a je plně tvořeno křemíkem (Si).

#### 4.7 Zkouška tvrdosti

Zkouška tvrdosti byla provedena pomocí ručního digitálního tvrdoměru, a to z důvodu zjištění množství ovlivnění materiálových charakteristik teplem při svařování. Tato veličina byla zkoušena na sedmi bodech po celé délce vzorku (obr. 4.15), tak aby bylo jasné, jak se mění tvrdost materiálu se vzdáleností od svaru. Z výsledku zkoušky je zřejmé, že vlivem tepla je nejtvrdší právě svar samotný, o mnoho se pak neliší tepelně ovlivněná oblast (TOO).



Obr. 4.15: Tvrdost materiálu v celé délce vzorku.

---

## ZÁVĚR

V této práci zabývající se oborem defektoskopie, konkrétně metodami nedestruktivního zkoušení se zaměřením na svary bylo dosaženo následujících závěrů:

- na základě rešeršní studie byly nadefinovány základní vady odlitků a svarů, hlavní skupinou vad, kterou se následně tato práce zabývala, byly necelistvosti materiálu, které se rozdělují podle způsobu vzniku a způsobu indikace nedestruktivní zkouškou na staženiny, vycezeniny, vměstky, broky, trhliny v různých směrech a studené spoje.
- Rešeršní studie dále popisuje některé z mnoha metod nedestruktivního zkoušení. V této práci bylo hlavní popsat metody zaměřující se na svary z důvodu následné experimentální zkoušky vzorku svaru. Nadefinované metody jsou vizuální, kapilární, magnetická, ultrazvuková a prozařovací, součástí těchto definic jsou základní principy, prostředky a normou dané podmínky pro výkon těchto zkoušek,
- po nadefinování defektoskopických metod bylo cílem využít některou ze zmíněných metod na konkrétní vzorek. Jako vzorek byl zvolen jednoduchý V-svar dvou ocelových desek (S235JR) tloušťky 12 mm. Z důvodu ověření přítomnosti vad povrchových i vnitřních byly zvoleny metody vizuální, kapilární pomocí barevné indikace a prozařovací pomocí rentgenového záření (doba záření 1 min 20 s, proud 4,5 mA, napětí 160 kV),
- po provedení všech těchto zkoušek byl svar ohodnocen jako nepřijatelný z důvodu přítomnosti mnoha vnitřních dutin, povrchových kuliček z rozstříku nataveného kovu a nedostatečného provaření kořenu svaru,
- ověření správnosti těchto zkoušek a přítomnosti vnitřních dutin byla provedena pomocí rozříznutí svaru v předpokládaném místě přítomnosti dutiny a následném vytvoření metalurgického výbrusu, jež byl podroben analýze na optickém a elektronovém mikroskopu, díky kterému mohla vzniknout i materiálová analýza okolí dutiny. Tato analýza ukázala, že vnitřní dutina vznikla z důvodu ochuzení o uhlík a železo a její okolí je téměř celé tvořeno křemíkem.
- V posledním kroku experimentální části práce byla vytvořena závislost tvrdosti průřezu celého vzorku pomocí ručního tvrdoměru. Tato závislost ukázala, že tvrdost roste se vzdáleností od kraje materiálu ke svarové housence od HB 109 až po HB 129, což je tvrdost uvnitř svaru.

---

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

1. KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
2. Interní firemní materiály ATG s.r.o.: *Vizuální metoda stupeň I, II*. Praha: Advanced Technology Group, 2013, 2013(S-VT-L1\_2-0\_96).
3. *Studijní opory z předmětu 5TE*. Dostupné také z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/5te-studijni-opory/5te-studijniopory.zip>
4. ELBEL, T. *Diagnostika a řízení kvality odlitků* [online]. 1. vyd. Ostrava: FMMI VŠB – TU Ostrava, 2013 [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: [https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metallurgie/diagnostika-a-rizeni-kvality-odlitku/Elbel\\_Diagnostika-a-rizeni-kvality-odlitku.pdf](https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metallurgie/diagnostika-a-rizeni-kvality-odlitku/Elbel_Diagnostika-a-rizeni-kvality-odlitku.pdf)
5. Interní firemní materiály PTS Josef Solnař s.r.o.: *Magnetická metoda prášková stupeň I*. Ostrava: PTS Josef Solnař, 2013, 2013(PTS 02-13/1).
6. ČSN EN 13018: *Nedestruktivní zkoušení – Vizuální zkoušení – Obecné zásady*. 015037. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
7. *Záznam z endoskopické kontroly lopatek statoru spalovací turbíny* [online]. [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <http://www.ndtservis.cz/web/images/web/ndt-vt/ndt-vt-3.jpg>
8. ČSN EN ISO 17637: *Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizuální kontrola tavných svarů*. 051180. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
9. *Svarová měrka na koutové svary* [online]. [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <http://www.sometcz.com/obchod/ostatni-meridla-nastroje-a-sablony/merici-sablony-kliny-piny-a-tabulky-zavitu/hmatadlo-svu-svaru/mereni-svu-svaru>
10. ČSN EN 1370: *Slévárství – Hodnocení stavu povrchu*. 429721. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
11. *Casting Comparators as per ASTM A802/A802M-95 (2010) Standard Practice for Steel Castings, Surface Acceptance Standards, Visual Examination* [online]. [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <http://etcmeasuringinstruments.com/portfolio/casting-comparators-as-per-astm-a802a802m-95-2006/>
12. ČSN EN ISO 3452-1: *Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 1: Obecné zásady*. 015018. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
13. *Kapilární zkoušení* [online]. [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <https://weldinspect.cz/metody/kapilarni-zkouseni/>
14. ČSN EN ISO 3452-2: *Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 2: Zkoušení kapilárních prostředků*. 015018. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.

15. *PT – Kapilární zkoušení* [online]. [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <https://www.ptsndt.com/cs/prodej/pt-zkouseni-kapilarni>
16. ČSN EN ISO 3452-3: *Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 3: Kontrolní měřky*. 015018. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
17. ČSN EN ISO 9934-1: *Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení magnetickou práškovou metodou – Část 1: Obecné principy*. 015046. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
18. SINGH, Ramesh. *Applied Welding Engineering: Processes, Codes, and Standards*. 2. Elsevier Science, 2015. ISBN 9780128041765.
19. CAMPBELL, F.C. *Inspection of Metals: Understanding the Basics*. Materials Park: A S M International, 2013. ISBN 9781627080019.
20. ČSN EN ISO 9934-3: *Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení magnetickou práškovou metodou – Část 3: Přístroje*. 015046. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
21. ČSN EN ISO 9934-2: *Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení magnetickou práškovou metodou – Část 2: Zkušební prostředky*. 015046. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
22. *MT – zkoušení magnetické* [online]. [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <https://www.ptsndt.com/cs/prodej/mt-zkouseni-magneticke>
23. ČSN EN ISO 16810: *Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení ultrazvukem – Obecné zásady*. 015023. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
24. Interní firemní materiály Testima spol. s.r.o.: *Základy ultrazvuku*. Praha: R&R NDT, 2015.
25. Ultrazvuk a senzory SRFO2. *Posterus* [online]. 2011, 4(5) [cit. 2018-02-12]. ISSN 1338-0087. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=10661>
26. *Ultrazvukové sondy PTS* [online]. [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <https://www.ptsndt.com/cs/prodej/ut-zkouseni-ultrazvukem/ut-sondy/290-ut-sondy-pts>
27. *Ultrazvuková technika zkoušení phased array* [online]. [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <https://www.ptsndt.com/cs/pts-josef-solnar-ndt-skoleni-vzdelavani/ut-ndt-zkouseni-ultrazvukem/ut-zkouseni-phased-array>
28. *Ultrazvuková technika TOFD při určení hloubkových rozměrů vad* [online]. [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <http://www.ndttrade.cz/UserFiles/File/ut%20technika%20tofd%20oprava.pdf>
29. ČSN EN ISO 5579: *Nedestruktivní zkoušení – Radiografické zkoušení kovových materiálů s použitím filmu a rentgenového nebo gama záření – Základní pravidla*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
30. GROS, Xavier. *NDT Data Fusion*. Elsevier Science, 1996. ISBN 0340676485.
31. *NDtest s.r.o. - NDT metody* [online]. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: [http://www.ndtest.cz/ndtest\\_ndt\\_metody.html](http://www.ndtest.cz/ndtest_ndt_metody.html)

32. *Destičková měrka s otvory ASTM E* [online]. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <https://www.ptsndt.com/cs/prodej/rt-zkouseni-radiograficke/rt-merky-a-meridla/45-destickova-merka-s-otvory-astm-e-cs>
33. *RT měrky a měřidla: Drátkové měrky* [online]. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <https://www.ptsndt.com/cs/prodej/rt-zkouseni-radiograficke/rt-merky-a-meridla/795-dratkove-merky>
34. *LYRA3* [online]. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <https://www.tescan.com/en-us/technology/fib-sem/lyra3>
35. Zhu, Y. K., Tian, G. Y., Lu, R. S., & Zhang, H. (2011). *A review of optical NDT technologies*. *Sensors*, 11(8), 7773-7798.
36. OBRAZ, Jaroslav. *Zkoušení materiálu ultrazvukem*. Praha: SNTL, 1989, 460 s.: obr., čb. fot., tabulky, grafy. ISBN 80-03-00097-1.
37. SAMBATH, S.; NAGARAJ, P.; SELVAKUMAR, N. *Automatic defect classification in ultrasonic NDT using artificial intelligence*. *Journal of nondestructive evaluation*, 2011, 30.1: 20-28.
38. *TechMagazín: měsíčník pro technické obory, vědu, výzkum, strojírenství, plastikářský a automobilový průmysl, IT a technické školství*. Praha: Tech Media Publishing, 2012, 2012(8). ISSN 1804-5413.
39. WANG, Z. D., GU, Y. a WANG, Y. S. *A review of three magnetic NDT technologies*. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2012, 324(4), 382-388 s.
40. VOLUME, A. H. *Nondestructive evaluation and quality control*. ASM International, 1989. 795 s.

---

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
NDT	-	non-destructive testing
$\eta$	%	plnicí faktor cívky
D	mm	průměr
a(t)	m	výchylka z rovnovážné polohy v čase t
$A_0$	m	amplituda
$\Omega$	rad. s <sup>-1</sup>	úhlová rychlost
X	m	vzdálenost kmitajícího bodu od počátku
C	m. s <sup>-1</sup>	rychlost šíření vlny
$\lambda$	m	vlnová délka
f	Hz	frekvence vlnění
$\mu$	-	Poissonovo číslo
M	kg	měrná hmotnost
E	MPa	Youngův modul pružnosti
TOFD	-	time-of-flight diffraction
U	V	napětí
I	A	elektrický proud
T	°C	teplota
P	bar	tlak
TOO	-	tepelně ovlivněná oblast

## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1      Materiálový list vzorku  
Příloha 2      Materiálový rozbor vady a jejího okolí  
Příloha 3      Radiografický film