

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2021**

**Filip  
Müller**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ**

Hodnocení kvality opravných svarových spojů z austenitické  
vysokolegované oceli určené pro nadkritickou uhelnou  
energetiku

Quality assessment of repair welded joints made of austenitic  
high-alloy steel intended for supercritical coal energy

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**AUTOR: Filip Müller**

**STUDIJNÍ PROGRAM: Teoretický základ strojího inženýrství**

**VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Horváth Jakub Ph.D.,IWE**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Müller** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **482610**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Hodnocení kvality opravných svarových spojů z austenitické vysokolegované oceli určené pro nadkritickou uhelnou energetiku**

Název bakalářské práce anglicky:

**Quality assessment of repair welded joints made of austenitic high-alloy steel intended for supercritical coal energy**

Pokyny pro vypracování:

1. Vypracování rešeršní části
  - a. Ocel SUPER 304H a HR3C
  - b. Způsoby degradace těchto materiálů
  - c. Metody defektoskopie aplikované na svarové spoje
2. Praktická aplikace těchto metod na svarových spojích oceli SUPER 304H a HR3C
3. Zhodnocení možností aplikace

Seznam doporučené literatury:

- [1] ABE, Fujio. Creep-resistant steels. Editor Torsten-Ulf KERN, editor Ramaswamy VISWANATHAN. Cambridge: Woodhead, 2008. ISBN 978-1-84569-178-3.  
[2] ČSN EN ISO 3452-1 (015018). Nedestruktivní zkoušení - Kapilární zkouška: Část 1: Obecné zásady. 1. Praha, 2015.  
[3] ČSN EN 13018 (015037). Nedestruktivní zkoušení - Vizuální zkoušení: Obecné zásady. 1. Praha, 2016.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jakub Horváth, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **04.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

  
Ing. Jakub Horváth, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce


  
prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

30.9.  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne: .....

.....

## **Abstrakt:**

Tato práce pojednává o vybraných možnostech hodnocení kvality opravných svarových spojů z austenitické vysokolegované oceli určené pro nadkritickou uhelnou energetiku. Bakalářská práce se zaměřuje na dvě oceli. Zaobírá se degradačními procesy, které ovlivňují vlastnosti svarů, a v praktické části aplikuje několik defektoskopických metod, pomocí kterých jsou kontrolována daná místa a porovnáno poškození s popsány procesy.

**Klíčová slova:** SUPER 304H, HR3C, defektoskopie, degradační procesy, vizuální kontrola

## **Abstrakt:**

This thesis deals with selected options for evaluating the quality of repair welds made out of austenitic high-alloy steel designed for supercritical coal energy. The bachelor thesis focuses on two types of steels. It covers degradation processes that affect the properties of welds, and in the practical part applies several defectoscopic methods, which are used to check the places of interest and compare the damage with the described processes.

**Key: words:** SUPER 304H, HR3C, defectoscopy, degradation processes, visual inspection

## **Bibliografická citace**

MÜLLER, Filip. *Hodnocení kvality opravných svarových spojů z austenitické vysokolegované oceli určené pro nadkritickou uhelnou energetiku*. Praha, 2021. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Jakub Horváth.

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Jakubu Horváthovi, Ph.D., IWE, za odbornou přípravu, metodologickou pomoc, doporučení a připomínky při zpracování mé práce.



## Obsah

1	Úvod .....	1
2	Cíle práce .....	1
3	Degradační procesy .....	2
3.1	Creep – tečení .....	2
3.2	Koroze .....	3
3.3	Únava materiálu .....	4
3.4	Necelistvosti materiálů .....	4
4	Svarové spoje - druhy a dělení .....	5
5	Svařování za působení tepla .....	6
5.1	Obloukové svařování: .....	6
6	Metody defektoskopie .....	7
6.1	Vizuální kontrola .....	7
6.2	Kapilární metoda .....	8
6.2.1	Metodika .....	8
6.2.2	Vyhodnocení indikací .....	10
6.3	Zkoušky prozařováním .....	11
6.4	Digitální radiografie .....	12
6.5	Ultrazvuk, klasický .....	13
6.6	Ultrazvukový tloušťkoměr .....	14
6.7	Ultrazvuk, phase array (metoda fázového pole) .....	15
6.8	EMAT (ElectroMagnetic Acoustic Transducer) .....	17
6.9	Rentgenové tenzometrie .....	17
6.10	Magnetická metoda prášková .....	18
6.10.1	Zkušební prostředky .....	18
6.10.2	Magnetizace .....	19
6.10.3	Demagnetizace .....	20
6.10.4	Příklady pro stanovení proudů potřebných pro dosažení specifických intenzit tangenciálního pole .....	20
6.11	Metoda magnetická .....	21
6.12	Zkoušení vířivými proudy .....	22
6.13	Spektrální analýza .....	23
7	Moderní defektoskopické metody .....	24

7.1	Výpočetní tomografie .....	24
7.2	Infračervená termografie .....	25
7.2.1	Metoda magnetické paměti materiálu (MMM -Metal Magnetic Memory) ..	26
7.3	Metoda akustické emise .....	27
8	Příklad aplikace kontroly svarů.....	28
9	Použité materiály.....	28
9.1	SUPER 304H.....	29
9.2	HR3C.....	30
9.3	Sigma fáze .....	31
10	Vypracování - vizuální kontrola .....	32
10.1	Postup přípravy .....	32
10.2	Použité nástroje .....	32
10.3	Vyhodnocení svaru dle ČSN EN ISO 5817.....	33
11	Makroskopická a mikroskopická kontrola.....	37
11.1	Mikrostruktura .....	40
12	Závěr.....	41

# 1 Úvod

Čím dál častější uplatnění vysokolegovaných austenitických ocelí je dáno zvyšujícími se požadavky na náročnější provozní (mezní) podmínky výroby v tepelných elektrárnách, a to hlavně z důvodu zvyšování efektivity ve výrobě elektrické energie a v neposlední řadě požadavky na čistější provoz elektráren. Tepelné elektrárny jsou stále nejrozšířenějším zdrojem elektrické energie v globálním měřítku. Uhlí zastupuje 27 % veškeré vyrobené energie a 36,7 % elektrické energie ve světě. Oproti klasickým elektrárnám superkritické elektrárny jsou o 33 % efektivnější a ultra kritické dokonce o 50 %. V České republice pak elektrárna s nadkritickými parametry je elektrárna Ledvice. [1]

Pro provoz elektráren ve stále vyšších teplotních režimech jsou používány austenitické ocele, které vydrží maximální mezní podmínky. Zvládají teploty páry, mají vysokou pevnost v tečení i korozivzdornosti. Jednou z kritických vlastností těchto ocelí je svařitelnost, a je proto nutné kontrolovat exponovaná místa různými defektoskopickými zkouškami. V průmyslu se používá velké množství defektoskopických zkoušek, které mají specifické vlastnosti.

## 2 Cíle práce

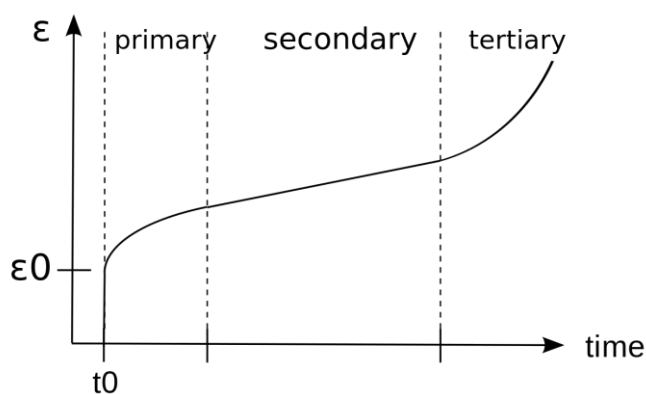
Tato bakalářská práce se zabývá metodami nedestruktivního zkoušení svarových spojů, od klasických metod, přes nekonvenční metody, až po jejich moderní podobu. Bude následovat jejich popis a srovnání, a nakonec bude aplikována zvolená metoda. Zkouška bude provedena v laboratorním prostředí.

## 3 Degradční procesy

### 3.1 Creep – tečení

Vlastnosti běžných ocelí se normálně nemění v čase, ale při zvýšené teplotě tomu tak není. Materiál začne téct, i když napětí je pod mezí kluzu. Platí, čím větší zrna daného materiálu a čím vyšší modul pružnosti, tím bude odolnost proti tečení vyšší. Definice tedy je nárůst deformace s časem za působení konstantního zatížení konstantní silou pod úrovní meze kluzu, za zvýšených teplot. Rychlost je závislá na čase a velikosti teploty. Tečení rozdělujeme na nízkoteplotní, vysokoteplotní a difúzní. Meze definuje 0,3 a 0,9 násobek teploty tavení daného materiálu. [2]

Křivku tečení rozdělujeme na primární, sekundární a terciární tečení (obrázek 1). Primární oblasti tečení se vyznačuje poklesem rychlosti tečení způsobené deformačním zpevněním, dokud nepřejde do sekundární oblasti, kde rychlost zůstává konstantní a lineární. Následuje konečná fáze, kdy rychlost tečení narůstá až do lomu.

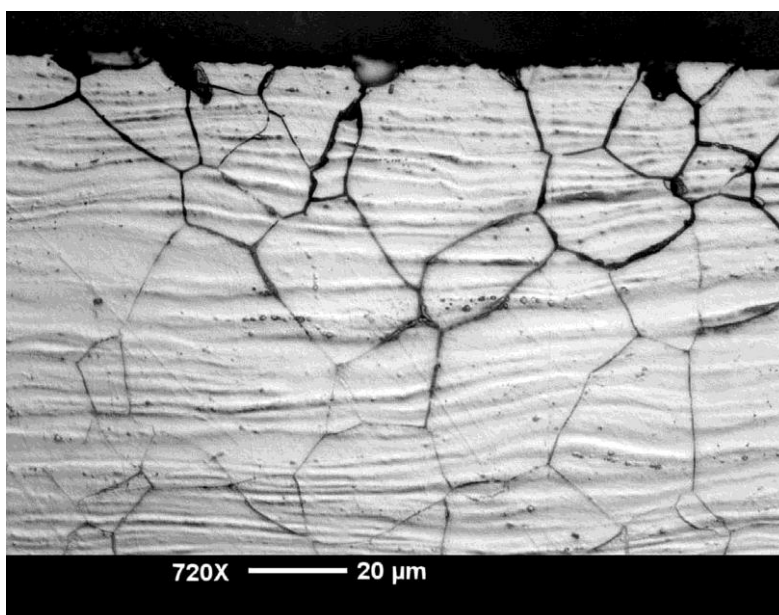


Obrázek 1: průběh tečení v čase [3]

## 3.2 Koroze

Koroze je proces samovolného rozrušení materiálu. Dělí se podle místa vzniku, fyzikálních podmínek, rozsahu, vzhledu a dalších okolností. Korozivzdorné oceli jsou nejvíce náchylné na bodové (důlkové) koroze. V anglické literatuře se můžeme spíše setkat s názvem pitting corrosion. Tato forma se vyznačuje jako hluboké důlky s úzkým hrdlem. Mechanismus spočívá v rozpuštění vrstvy se slabšími vlastnostmi, jako jsou vměstky nebo okuje. Okolní povrch zůstává bez pozorovatelného napadení. Oceli se hodnotí podle pitting resistance equivalent čísla, které nám říká, jak materiál bude odolný, například pokud číslo bude větší, než 40, ocel se může použít v mořské vodě.

Mezikrystalová koroze, jako je na obrázku 2, je další formou napadení ocele. U austenitických ocelí dochází k tomuto jevu při teplotě od 425°C. Chrom obsažený v materiálu je difúzně transportován do okolí, dochází k výraznému snížení jeho obsahu. Pokud se dostane materiál pod hranici 12 %, začne se zvyšovat náchylnost ke korozi. Tento typ koroze se především vyskytuje po nevhodném tepelném zpracování vysokolegovaných ocelí, případně po svařování, a to v určitých oblastech svarového spoje. [4]



Obrázek 2: mezikrystalová koroze austenitické korozivzdorné oceli [5]

### 3.3 Únava materiálu

Únava materiálu je široký pojem zabývající se poškozením nebo selháním části materiálu vlivem cyklického namáhání. Vznik trhlin většinou způsobují velmi malé defekty, jako jsou póry nebo vměstky. I když materiál tyto defekty nemá, může k nim dojít, jelikož vlivem cyklického zatěžování dochází ke zdrsnění povrchu součásti. Lom se jinak většinou objeví v nejvíce namáhané části dílu. K popisování používáme lineární, případně nelineární lomovou mechaniku. [6]

### 3.4 Necelistvosti materiálů

Velká skupina vad materiálu, které metody nedestruktivního zkoušení odhalují, jsou necelistvosti. Tyto výrobní degradace vznikají při výrobě dané součástky, ať už špatně zvolenou technologií, nebo nedodržením parametrů. Některé typické necelistvosti jsou například:

Vycezeniny	Makroskopické oblasti se zvýšeným obsahem vměstků fosforu síry a jiných prvků. Vyskytují se na odlitcích při dlouhé době tuhnutí.
Dutiny	Povrchové nebo vnitřní vady vznikají jak při odlévání, tak svařování, a to především důsledkem rychlého chlazení taveniny, kdy se vylučuje plyn, který je v tavenině uvězněn.
Podélné trhliny	Vyskytují se především ve výrobcích z válcované oceli. Mohou se projevit kvůli materiálovému pnutí, namáhání.
Příčné trhliny	Vznikají při tváření, především válcování nebo kování. Hlavní příčinou je přílišný ohřev a křehkost za tepla způsobená obsahem kyslíku nebo síry v kovu.
Studené spoje a neprůvary	Vznikají při nedokonalém procesu svařování, například nepřiměřenou rychlostí nebo špatně zvolenou teplotou. [7]

## 4 Svarové spoje - druhy a dělení

Svařování je proces, který při působení tepla a tlaku vytvoří nerozebíratelný spoj. Vzniklým součástí pak říkáme svařence. Výhodou tohoto spojení je jeho velká pevnost a trvanlivost. Nevýhodou je však změna struktury a následná degradace mechanických vlastností, především v tepelně ovlivněné oblasti. Ve spojích pak vzniká vnitřní pnutí a deformace. Po svařování pak můžeme materiál vyžít, abychom se těchto negativních vlastností zbavili. Svarový spoj se skládá ze tří částí – ze základního materiálu, svaru a tepelně ovlivněné oblasti. Jednotlivé svarové spoje jsou pak na výkresech zobrazeny a kótovány dle příslušného značení normy svarů ČSN EN 22553.

Rozdělení svarů se provádí dle nejrůznějších hledisek, jako je vhodnost daného svaru, použití druhu svaru, jeho velikost atd. Mezi základní rozlišení patří rozdělení dle druhu svaru:

- Tupé svary
- Koutové svary
- Bodové svary
- Lemové svary
- Děrové svary

Dále rozdělujeme vady na přípustné, nepřípustné, opravitelné a neopravitelné. Přípustné vady odpovídají normám a technickým podmínkám, tudíž není potřeba je odstraňovat. Do provozu lze připustit svary s takovými typy vad, o kterých víme, že při provozním zatížení neohrozí bezpečnost svařovaných konstrukcí. [8]

## 5 Svařování za působení tepla

### 5.1 Obloukové svařování:

#### MAG (Metal Aktiv Gas)

Je svařování v ochranné atmosféře (například  $\text{CO}_2$ ) s tavnou elektrodou. Elektrický oblouk hoří mezi kovovou elektrodou a svařovaným materiálem. Je to nejčastěji využívaný způsob svařování díky své produktivitě a nízkým nákladům. Metoda je vhodná pro všechny druhy ocelí, i vysokolegovaných. Svařovat můžeme buď ručně, nebo metodu můžeme provést s automatizovaným robotem. [9]

#### MIG (Metal Inert Gas)

Je svařování v ochranné atmosféře netečného plynu (argonu případně hélia) s tavnou elektrodou. Netečný plyn chrání svarový kov před přístupem vzduchu a zvyšuje stabilitu svařovacího oblouku. Stejně jako MAG je to metoda relativně levná a rychlá s možností automatizovat celý proces. Používá se především u svařování lehkých kovů.

#### TIG (WIG) – (Tungsten (Wolfram) Inert Gas)

Elektrický oblouk hoří mezi netavnou wolframovou elektrodou a svařovacím materiálem v netečném plynu. Plyn je nejčastěji složen z argonu, případně hélia nebo jejich směsí. Tenké plechy lze svařovat bez přídavného materiálu, na tlustší svary je pak potřeba dodat přídavný materiál. Materiál se přidává podavačem nebo ručně. Tato metoda je vhodná na precizní menší svary a dá se využít na korozivzdorné a žárovečné oceli.

Další metody:

- Svařování pod tavidlem
- Svařování plazmou
- Svařování laserem
- Plamenem

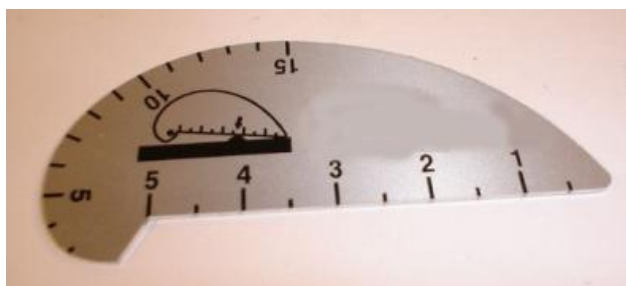


## 6 Metody defektoskopie

### 6.1 Vizuální kontrola

Patří mezi základní a nejrozšířenější kontroly. Stačí při ní pouhé oko a jednoduché přístroje. Díky své jednoduchosti a malé finanční náročnosti je to prvotní metoda, která by se měla upřednostnit před ostatními metodami. Povrch je potřeba nejprve očistit, odmastit a vysušit. Kontroluje se výskyt trhlin, zápalů a povrchových pórů. Rozděluje se na přímou a nepřímou.

Přímá se skládá z prosté prohlídky okem, popřípadě může být provedena s použitím pomůcek typu zrcadla, čočky, boroskopu, fibroskopu nebo měrky, jako je na obrázku 3. Povrch kontrolujeme za dobrého osvětlení, minimálně 160 luxy pro všeobecnou kontrolu, minimálně 500 luxy pro lokální kontrolu. Zkouška probíhá ve vzdálenosti 600 mm od očí a pod minimálním úhlem pohledu 30°. Pozornost se musí věnovat optimálnímu úhlu osvětlení vůči kontrolovanému místu, vyhnutí se lesku a optimalizaci teploty barvy osvětlení. [10]



Obrázek 3: jednoduchá měrka na koutové a tupé svary [11]

Kontrola nepřímá se provádí v případech, kdy je nedostatečný přístup ke kontrolovanému místu. Nevidíme svar přímo, ale prostřednictvím přístroje. Ten může být například endoskop (zařízení na zobrazení vnitřních dutin s flexibilním nástavcem a s kamerou) [12].

Kontrolu bude provádět personál seznámený se standardy, pravidly, specifikacemi, vybavením a instrukcemi testu a také s příslušným výrobním procesem nebo s provozním stavem testovaného komponentu. Bude seznámen s normou ČSN EN ISO 9712 a projde zrakovou zkouškou každých 12 měsíců. [12]

## 6.2 Kapilární metoda

Kapilární neboli penetrační metoda je velmi rozšířený postup. Její velkou výhodou je univerzálnost, tzn., funguje i na paramagnetické materiály. Je vhodná pro hledání povrchových vad, nedá se však využít na porézní materiály, jelikož by na materiálu našla řadu falešných chyb. Princip metody spočívá v nanesení penetrační kapaliny na předem řádně očištěnou plochu. Chvilí se musí počkat, dokud se tekutina nevsákne do materiálu. Poté se setře z povrchu, na který se nanese vývojka, která se nasákne penetrantem a ukáže jednotlivé vady povrchu díky kontrastu barev (viz obrázek 4). Metoda může být uskutečněna za pomoci barevného nebo fluorescenčního penetrantu. Při kapilární zkoušce se často používají látky zdraví škodlivé, hořlavé nebo těkavé, a proto musí být přijata bezpečnostní opatření. Zkoušení mají provádět vyškolení pracovníci. Vybavení pro celou zkoušku musí odpovídat ČSN EN ISO 3452-4. [13]

### 6.2.1 Metodika

1. Příprava a předčištění
2. Nanesení penetrantu
3. Odstranění přebytku penetrantu
4. Nanesení vývojky
5. Inspekce
6. Záznam
7. Konečné začištění

Při předčištění odstraňujeme nečistoty, rez, olej, maziva nebo nátěry a to mechanickým způsobem jako je kartáčování, smirkování, broušení nebo tryskání. Musíme být opatrní, abychom neucpali diskontinuity, ať už brusivem nebo plastickou deformací. A dále použijeme chemické předčištění vhodnými chemickými čisticími prostředky. Musíme dbát na to, aby zbytky chemikálií nereagovaly s penetrantem a nesnížily citlivost. Odstraňujeme je pak vhodnou čisticí metodou, například opláchnutím vodou. Konečným krokem je sušení, které probíhá za teploty v rozsahu 10 až 50 °C.

Zkušební systémy určují prostředky pro kapilární zkoušku. Podle ISO 3452-2 musí být penetrant a přípravek k jeho odstranění od jednoho výrobce. Systém se značí podle penetrantu, metody a vývojky. Například pro fluorescenční penetrant: zkušební systém podle ISO 3452-2, IAa stupně 2. Nanesení penetrantu se provádí nástřikem, natíráním, poléváním nebo ponořením. Závisí na vlastnostech daného penetrantu, pohybuje se v rozmezí od 5 do 60 min.



Obrázek 4: barevná indikace vady [14]

Odstranění penetrantu závisí hlavně na dané specifikaci zkušebního prostředku. Pro fluorescenční penetrant se provádí oplachem vodou. Pro osušení se může použít suchá utěrka, která nepouští vlas.

Nanesení vývojky se provádí co nejdříve po odstranění penetrantu. Pro fluorescenční penetrant se používá suchá prášková vývojka, ta je rovnoměrně nanesena na povrch. Přebytek je jemně odstraněn po uplynutí vyvíjecího času (ten se pohybuje v rozmezí 10 až 30 minut).

Inspekce pro fluorescenční penetranty je prováděná buď vizuálně, popřípadě s podporou UV-A záření. U barevných kontrastních technik musí být povrch osvětlen minimálně 500 luxy. [15]

Parametry zkoušení může být citlivost penetračního prostředku, stav povrchu, kdy drsnost povrchu ovlivňuje detekovatelnost vad a proces/technika, kdy například na detekci drobných vad se nedoporučuje odstranění přebytečného penetrantu hadrem. Hodnocení se provádí se stupni přípustnosti dle ČSN EN ISO 23277. Pokud je potřeba zvýšení úrovně detekční meze, využívá se lokální broušení. [16]

## 6.2.2 Vyhodnocení indikací

Po ukončení zkušebního procesu bude kontrolovaná součástka prohlédnuta. Pracovník musí mít dobré zkušenosti a zrak, jelikož na něm závisí správné vyhodnocení zkoušky. Podmínky k prohlédnutí musí být optimální, musí být provedeno při dobrém osvětlení, minimální hodnota pro kontrolu při barevné indikaci je daná normou. Nadbytečné osvětlení v řádech okolo 5000 luxů vede k brzké únavě očí. Pro lepší kontrolu může být použita lupa se zvětšením 2x až 6x. Při fluorescenční metodě probíhá kontrola v zatemněné místnosti v červeném světle ultrafialové lampy. Intenzita lampy je nejméně  $500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  a pro indikaci jemných necelistvostí je nejméně  $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ .

Indikace necelistvostí zjištěné kapilární metodou se rozděluje podle vzhledu na:

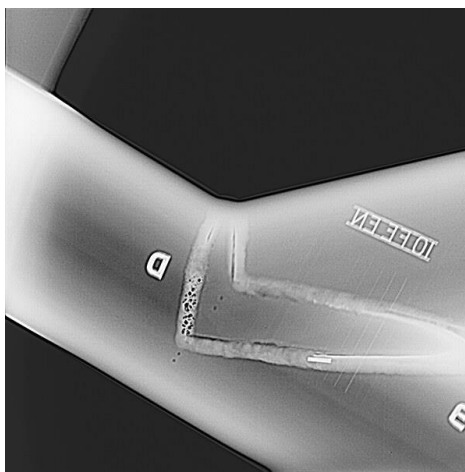
Souvislé liniové indikace	Popisují především trhliny a praskliny. Vyznačují nespojitá místa svaru nebo odlitku, u válcovaného materiálu se pak vyskytují u přeplátování.
Přerušované liniové indikace	Vyznačují necelistvosti, které mohou být vytvořeny například u výkovku údery bucharu.
Okrouhlé indikace	U svarů se vyskytují na konci svarové housenky, kde se vyskytují kráterové trhliny.
Tečkovitá indikace	Způsobuje je především porezita materiálu, boulovitost nebo jemné řediny.
Rozptýlená indikace	Pro pečlivě očištěný povrch od penetrantu značí jemnou porezitu, ale také to může být zapříčiněno zbytky penetrantu.
Falešné indikace	Jsou to indikace, které nejsou způsobeny žádnou vadou. Mohou vznikat nedostatečným očištěním penetrantu. Další častou příčinou jsou vlákna nebo nečistota ulpívající na kontrolovaném materiálu. [7]

### 6.3 Zkoušky prozařováním

Je metoda vhodná na hledání objemových vad, jako jsou vzduchové bubliny v materiálu či vnitřní praskliny v odlitkách a svarech. Využití této metody je ve slévárenství, svářenství a v hutním průmyslu. Má ovšem nízkou schopnost detekovat plošné defekty. Tato metoda je hojně využívána tam, kde není možné použít ultrazvukovou metodu.

Rozděluje se podle druhu zdroje a registrace obrazu na tři metody, na radiografickou, radioskopickou a ionizační. Záření se rozděluje podle zdroje na přírodní (radioaktivní) a umělé (rentgenové).

V radioaktivním záření se používají izotopy vyzařující paprsky gama, jelikož jejich energie je větší než energie RTG-záření, a má proto jiné radiografické účinky. Proto se používá pro kontrolu oceli přesahující 75 mm tloušťky stěny. Průběh radioaktivních přeměn nelze zastavit, či jejich intenzitu měnit, proto jsou radioizotopy uchovávány v bezpečnostních stínících krytech. Protože nemůžeme změnit energii gama zářičů, je nemožné nastavit pronikavost záření. Nejpoužívanějšími radioaktivními izotopy jsou kobalt 60, rádium 226, iridium 169, ytterbium 169 a selen 75. [17]



Obrázek 5: snímek kontrolovaného svaru [17]

Princip rentgenu je podobný jako u prozařování radioizotopy. Rentgenové záření vzniká díky přeměně vysoce energického elektronu na foton. Metoda využívá výkonnou rentgenovou lampu, která prosvítí materiál, za kterým se nachází vyvolávací film. Vada absorbuje méně záření než okolí, které utlumí záření. Díky tomu se na filmu vada zvýrazní. Rentgenové záření se používá při kontrole oceli tloušťky stěny okolo 75 mm. Detekce se provádí většinou na film, který pomocí fotochemického zpracování zviditelní obraz podobný tomu na obrázku 5. [18]

## 6.4 Digitální radiografie

Je zlepšení technologie prozařování, kdy není nutné používat filmu, ale je využito detekčního senzoru, kterým jsou polovodičové čipy. V senzoru je převedeno záření na elektrický náboj, který je převeden na digitální snímek. Velkou výhodou oproti klasické metodě je rychlejší vyhodnocení snímku, jelikož odpadá zdlouhavé chemické vyvolávání filmů, a zároveň všechny výhody digitálního snímku oproti fyzickému. Tato technologie se převážně využívá v leteckém průmyslu. [17]

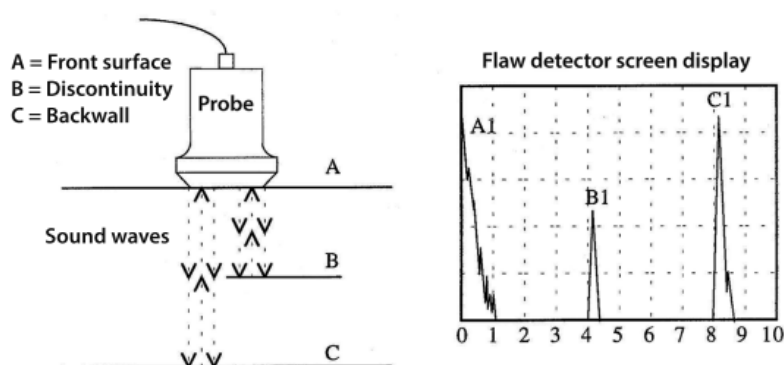
Digitální radiografie se dělí na nepřímou (computed radiography – CR) a přímou (DR). CR systém využívá paměťovou obrazovou fólii („kazetu“) s odděleným čtecím procesem, proto je tento systém také označován jako kazetový. Paměťové folie mohou být posléze odečteny ve speciálních čtečkách (digitizérech). Nejnovější zařízení mají pak rozlišení v řádech desítek mikronů na pixel. [19]

DR systém pracuje na principu převodu energie RTG paprsků na elektrický náboj. Jeho velikost je následně změřena a digitalizována na polovodičových detektorech. Základní materiál pro výrobu detektorů se používá amorfní křemík nebo amorfní selen. Výhodou metody je rychlost vyšetření, protože zde není potřeba žádného vyvolávání. DR systémy mohou být dále rozděleny do dvou podskupin podle typu převodu RTG paprsku s přímou a nepřímou konverzí. [19]

## 6.5 Ultrazvuk, klasický

Ultrazvuk je metoda nedestruktivního zkoušení vhodná na hledání vnitřních vad v materiálu. Uplatňuje se zvláště u nekovových materiálů. Princip této metody využívá skutečnosti, že pevné materiály jsou dobrými vodiči zvukových vln. Akustické vlnění pak interaguje na rozhraní mezi dvěma prostředími. Dvě základní používané zkušební metody pak jsou odrazová a průchodová. [20]

Odrážová metoda se skládá ze sondy, která vysílá krátké ultrazvukové impulsy, které se odrážejí od protilehlého povrchu zkoušeného objektu a vrací se zpět do sondy, jež působí také jako přijímač (viz obrázek 6). Nevýhodou této metody je nemožnost kontrolovat v blízkosti povrchu, proto je metoda vhodná na předměty tlustší 10 mm. Výhodou této metody je zobrazení výsledků okamžitě a také to, že pro tuto metodu je postačující přístup ke kontrolovanému místu z jedné strany.



Obrázek 6: princip ultrazvukové metody [17]

Průchodová metoda je založena na měření hodnoty ultrazvukové energie, která projde zkoušeným objektem. Dvě sondy jsou umístěny naproti sobě tak, že jedna slouží jako vysílač a druhá jako přijímač ultrazvukových vln. Jestliže vlna narazí na vadu, odrazí se a za vadou vytváří stín. Výhodou této metody je to, že se akustická vlna zeslabuje méně oproti metodě odrazu, jelikož se nemusí "vracet" materiálem. Je taky vhodná na tenké materiály. Její nevýhodou je menší přesnost, jelikož jestliže se vada nachází dál od sondy, vlny se začínají ohýbat a vada tak vypadá na přijímači menší.

Jako zdroj ultrazvukového vlnění se používají ultrazvukové sondy. Jedná se o elektroakustické zařízení obsahující jeden nebo více měničů. Nejčastěji jsou používány sondy s piezoelektrickým měničem a v některých případech také sondy s magnetostrikčním měničem. Piezoelektrický měnič je založen na stejnojmenném jevu, který popisuje schopnost krystalu generovat elektrické napětí při deformaci. V měniči jsou destičky, které se při přivedení elektrického napětí deformují (nepřímý jev). Na přijímači se naopak destičky deformují a mění mechanickou energii na elektrickou.

Po kontrolovaném materiálu je vyžadováno, aby byl homogenní, jelikož pro porézní není možné provést tuto zkoušku. Platí, čím vyšší frekvence, tím je možné rozpoznat menší vady. Použité frekvence se pohybují v rozmezích jednotek MHz. Nevýhodou je pak nutnost zajištění hladkého povrchu pro umístění sondy. [21]

## 6.6 Ultrazvukový tloušťkoměr

Tloušťkoměr je elektronický přístroj pro stanovení kontroly stěny potrubí, nádob, nádrží a dalších výrobků. Dobře se s ním měří vnitřní účinky koroze nebo narušení potrubí. Založený je na principu šíření a odrazu ultrazvuku – impulsová odrazová metoda. Vlny se šíří materiálem a odrazí se od rozdílného rozhraní, tedy od vnitřní vady nebo od protilehlého povrchu. Přístroj tento odraz (echo) zaznamená a vypočítá odrazenou vzdálenost. Dále existuje průchodová metoda, kdy máme dvě sondy, které jsou umístěné proti sobě. Jedna signál vyšle a druhá přijme. Běžné tloušťkoměry se vyrábějí s přesností okolo 0,1 mm a mohou být využity na materiál tloušťky od 0,2 do 300 mm. Moderní přístroje také disponují pamětí pro ukládání hodnot pro jejich další zpracování. [22]



Povrch před zkouškou se musí očistit od nečistot a nepřilnutých nátěrů. Mezi povrch a sondu se přidává vazební gel, který zlepšuje průchod akustické vlny do materiálu. Velkou výhodou této metody je lehkost přemístění přístroje a jednoduchost zkoušky. Zkouška se může provést téměř všude, kde to geometrie dovoluje.



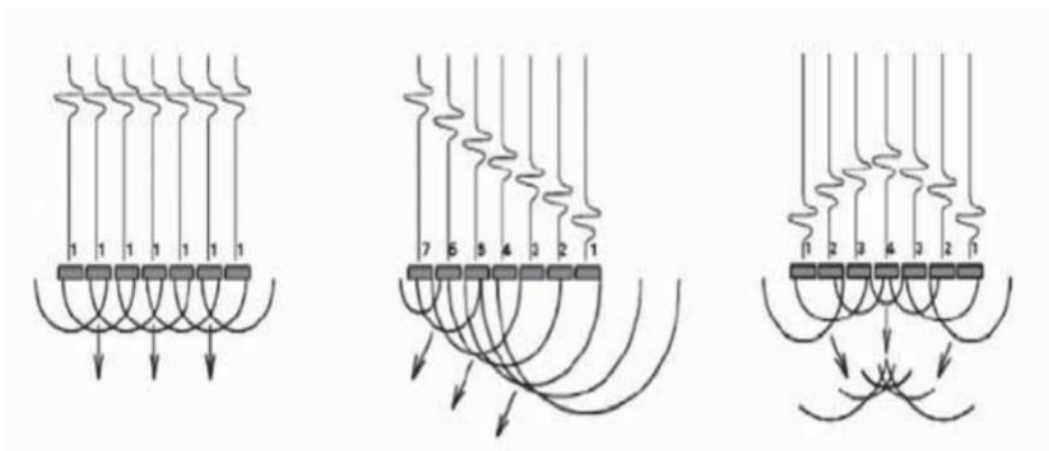
Obrázek 7: příklad ultrazvukového tloušťkoměru [23]

## 6.7 Ultrazvuk, phase array (metoda fázového pole)

Moderní ultrazvuková metoda založená na použití sady piezoelektrických měničů. Byla vyvinuta v 70. letech v Holandsku a rozšířila se v 90. letech 20. století do oblasti NDT díky vývoji ve výrobě piezokomponentů ultrazvukových sond a digitálního zpracování signálů. Metoda vznikla kvůli požadavku jaderného průmyslu na zlepšení rozlišení přesnosti při kontrole svarů a požadavku na kontrolu geometricky rozmanitějších součástí. [24]

Každý individuální měnič je řízen individuálně přes počítač, který jej budí signálem. Měnič je schopen jak vysílat signál, tak jej přijímat. Tyto měniče se uspořádávají do svazků (obvykle 128 individuálních měničů). Časováním jednotlivých impulzů lze docílit konstruktivní interference, a tím je možné nastavit úhel pro výsledný ultrazvukový svazek (viz obrázek 8). Ten funguje jako světlomet, dokáže prohledat velkou oblast kontrolovaného materiálu bez posuvu samotné sondy. To je výhoda oproti konvekční ultrazvukové metodě, která má pevně dané úhly ultrazvukových svazků.

Díky vlastnostem metody se dají kontrolovat špatně přístupná místa, která by nešla kontrolovat ostatními způsoby. Schopností metody je vytvářet podrobné řezy vnitřní struktury. Další výhodou je, že sondy nemají výrazná mrtvá pole, což umožňuje hledat chyby i těsně pod povrchem. Phased array techniku lze využít i pro ruční zkoušení, ale metoda bývá mechanizovaná a automatizovaná. Metoda se využívá pro kontrolu ocelových konstrukcí, potrubí a v oblasti energetiky. Metoda detekuje necelistvosti jako jsou praskliny, trhliny, neprůvody, vměstky atd. [25]

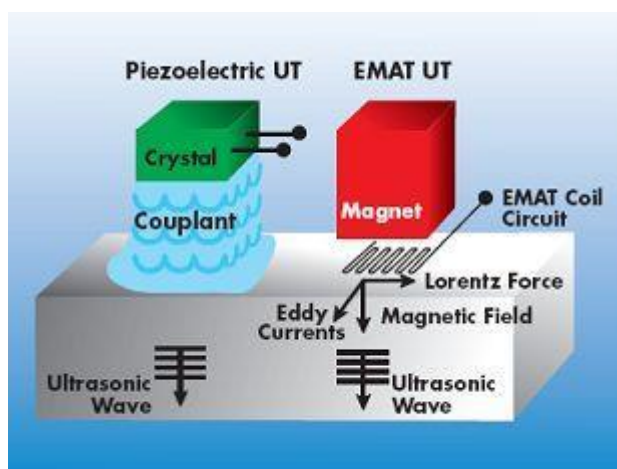


Obrázek 8: proměnné časování pulsů v elementech sondy [24]

## 6.8 EMAT (ElectroMagnetic Acoustic Transducer)

Metoda se používá pouze ve feromagnetických materiálech. Spočívá v Lorencově síle přitažlivosti v magnetickém poli. Orientací magnetického pole vyvoláme ultrazvukovou vlnu. Výhodou metody je, že není nutný kontakt se základním materiálem a metoda pracuje i za vysokých teplot materiálu. [7]

Pomocí této zkušební metody pro měření tloušťky stěny lze dosáhnout přesnosti přibližně  $\pm 50 \mu\text{m}$ . [26]



Obrázek 9: princip EMAT [27]

## 6.9 Rentgenové tenzometrie

Metoda využívá rozptylu (difrakce) rentgenových paprsků na krystalech k měření změn vzdáleností atomových mřížkových rovin vyvolaných mechanickým napětím. Podmínkou vzniku zbytkových makroskopických napětí je nerovnoměrná plastická deformace, která je vyvolaná výrobními procesy, například úprava povrchů kuličkováním. Analýza energií difraktovaných paprsků probíhá v polovodičových detektorech. Tato technologie může být využita k stanovení vhodného předpětí povrchu výrobku, který vytvoří bariéru a zabrání tvorbě trhlin. Nevýhodou je avšak nízká míra přesnosti. [7]

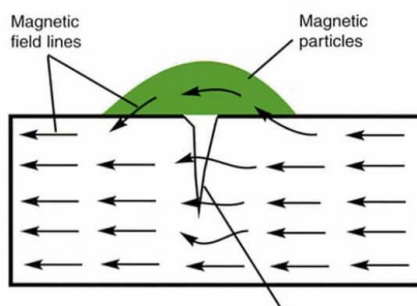
## 6.10 Magnetická metoda prášková

Metoda na zjišťování plošných vad na povrchu nebo těsně pod ním (s hloubkou klesá citlivost). Je založena na magnetických vlastnostech materiálu a lze ji využít pouze na feromagnetické materiály. Je nutno kontrolované místo zmagnetizovat. Toho lze dosáhnout buď pólovou, nebo proudovou magnetizací.

Pólovou metodou vytváříme na koncích předmětu póly. V proudové metodě nevznikají magnetické póly, ale vznikají uzavřené dráhy. Proud protéká předmětem, čímž vzniká příčné magnetické pole. Můžeme tak najít podélné vady. Kombinováním typů magnetizací (pomocným vodičem a indukcí proudu) lze zjistit příčné a podélné vady.

Kolem vady se pak siločáry deformují a vytvářejí rozptylové pole vady. Na to zareaguje magnetický prášek nanesený na povrch a vykreslí tvar vady (viz obrázek 10). Metodu lze rozdělit podle vlastností zrna na práškovou (ty jsou z kontrastní barvy oproti kontrolovanému místu) a fluorescenční. Nebo podle typu magnetizace na metodu se stejnosměrným a střídavým proudem. [21]

Při příprava povrchu se musí zbavit nečistot, okují, volné rzi, mastnoty a podobně. Neferomagnetické povlaky do hloubky 50  $\mu\text{m}$  nezhoršují detekci.



Obrázek 10: princip práškové metody [28]

### 6.10.1 Zkušební prostředky

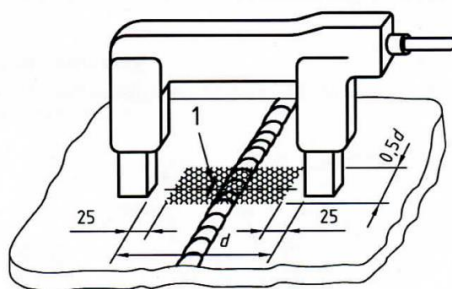
Pro práškovou metodu se využívají různé typy zkušebních prostředků. Zkušebním prostředkem je obvykle buď barevná, nebo fluorescenční suspenze částic v kapalině (ta obsahuje smáčedla a inhibitory koroze), nebo suché prášky. Ty však mají menší schopnost detekovat jemné povrchové diskontinuity. Specifikace vlastností pro magnetickou kontrolu je daná normou ČSN EN ISO 9934-2. [29]

## 6.10.2 Magnetizace

Pro kontrolu svarových spojů, pokud není dohodnuto jinak, se používají tyto přístroje: elektromagnetické jho (viz obrázek 14), zdroj proudu s elektrodami a přiložené nebo vložené vodiče nebo cívky. Hodnoty tangenciálního magnetického pole pro feromagnetický materiál se pohybují okolo 2 kA/m do 6 kA/m v závislosti nemagnetické permeability zkoušeného materiálu. Pro ověření intenzity magnetického pole se používá Halowa sonda, výpočty dle základních hodnot nebo se zkouškovou součástí s vadami na nejméně příznivých místech. [30]

Techniky magnetizace:

- Průchod proudu pomocí přiložených elektrod
- Magnetizace indukcí proudu
- Techniky magnetizačního toku
- Přiložený vodič
- Stacionární zařízení
- Přenosný elektromagnet
- Pevná cívka
- Ohebná cívka



Obrázek 11: Přenosný elektromagnet (jho) [29]

### 6.10.3 Demagnetizace

Účinnost zkoušky může být ovlivněna zbytkovým polem nebo protisměrným tokem, který způsobí zachycení kovových pilin na kontrolovaném materiálu. V těchto případech musíme snížit magnetické pole. Nejdříve zkontrolujeme oblast pomocí Hallovy sondy nebo popřípadě zkouškou pomocí kompasu. Demagnetizace se poté dosáhne buď nízkofrekvenčním, nebo reverzovaným stejnosměrným proudem. [29]

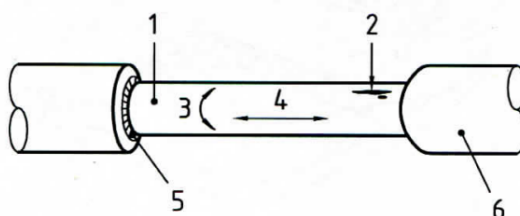
### 6.10.4 Příklady pro stanovení proudů potřebných pro dosažení specifických intenzit tangenciálního pole

Průchod proudu v axiálním směru:

$$I = H \times p$$

Kde

- I elektrický proud [A]
- p obvod objektu [mm]
- H intenzita tangenciálního pole [kA/m]



#### Legenda

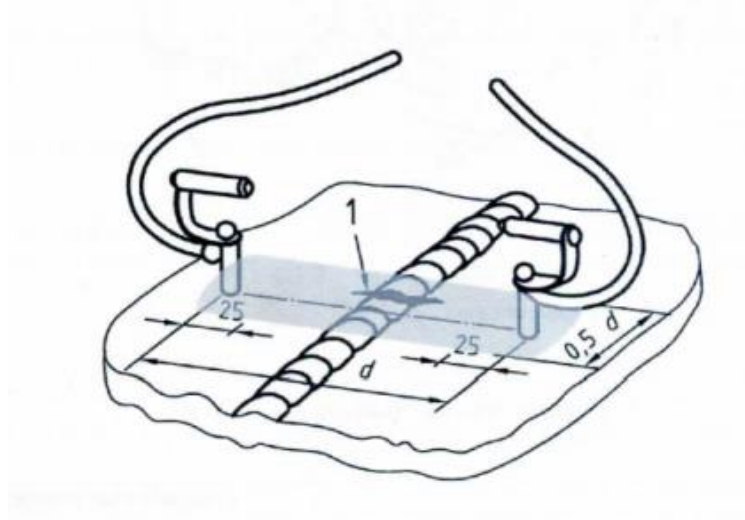
- 1 zkoušený vzorek
- 2 vada
- 3 magnetický tok
- 4 elektrický proud
- 5 kontaktní podložka
- 6 kontaktní hlava

Obrázek 12: průchod proudu v axiálním směru [29]

Průchod proudu pomocí přiložených elektrod:

$$I = 2,5 \cdot H \cdot d$$

d rozteč elektrod [mm]



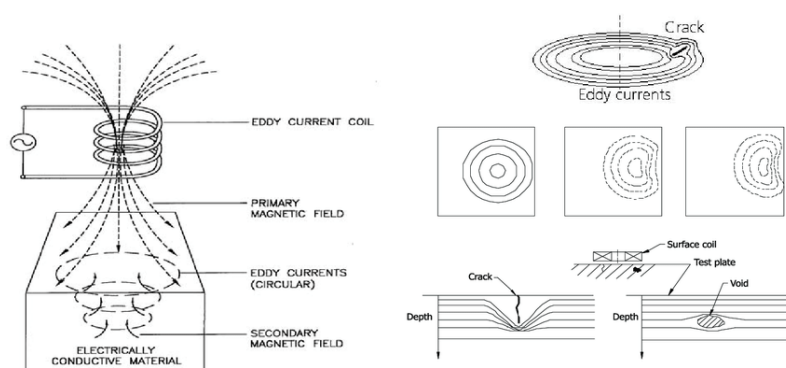
Obrázek 13: průchod proudu pomocí přiložených elektrod [29]

## 6.11 Metoda magnetická

Magnetická metoda jinak také nazvaná metoda rozptylových polí. Princip je stejný jako u práškové metody. Výsledné siločáry nejsou zvýrazněny zmagetovaným práškem, ale jsou zachyceny snímačem magnetického pole. Ten vady indikuje výkyvem napětí. Citlivost metody je srovnatelná jako u zkoušky práškové.

## 6.12 Zkoušení vířivými proudy

Principem metody je vystavení předmětu střídavému magnetickému poli, ve kterém vznikají v rovinách kolmých na směr magnetických siločar vířivé proudy (viz obrázek 14). Kontrolovaný předmět musí být magnetický a elektricky vodivý. Na přiložených cívkách je pak měřeno napětí. Když na jedné sondě je naměřeno jiné napětí, pravděpodobně se na místě nachází chyba. Touto metodou mohou být vyšetřovány pouze vodivé materiály. Metodou lze také měřit tloušťku nátěrů a dalších povlaků. Vířivé proudy se soustředí blízko povrchu a jejich síla se snižuje s vzdáleností od cívky a není možné indikovat vady hluboko pod povrchem, maximálně do hloubky několika milimetrů. Základní testovací nástroje vířivých proudů je zdroj střídavého proudu, cívka připojená k tomuto zdroji a voltmetr k měření napětí. [7]



Obrázek 14: princip metody vířivých proudů [31]

Moderní podoba této metody je uspořádání sond do matic a zobrazení výsledků na monitoru. Metoda je levná a rychlá a pomocí ní lze objekt kontrolovat i za vyšších teplot. Výhody vířivého proudu jsou citlivost na malé trhliny a další defekty, minimální potřebná příprava vzorků a to, že testovací sonda nepotřebuje přímý kontakt se součástí. Nevýhodou je pak nižší citlivost a nemožnost zjištění chyb hlouběji v materiálu. Hloubka indikace vad souvisí s frekvencí střídavého proudu, který napájí vinutí a pohybuje se v řádech milimetrů. Vířivé proudy mohou být použity pro zjišťování trhlin, detekce tepelného poškození atd. [20]



## 6.13 Spektrální analýza

Spektrometrie je obor zabývající se měřením a vyhodnocováním elektromagnetického záření emitovaného hmotou nebo interagujícího s hmotou. Princip spočívá ve vzájemné interakci mezi elektromagnetickým zářičem a částicemi hmoty. Hlavní použití spektrální analýzy kovů slouží ke zjištění chemického složení materiálu nebo referenční shody kovových materiálů použitých v konstrukcích. Metodu lze provést s pomocí ručních spektrometrů, které nám dají okamžité výsledky. [32]

Nejpoužívanější analýzy jsou rentgenfluorescenční a optická emisní spektrometrie. V optické emisní spektrometrii jsou buďcími zdroji chemický plamen, jiskrový (viz obr. 15), obloukový nebo plazmový výboj. Materiál se zahřeje na vysokou teplotu, a díky tomu jsou atomy materiálu excitovány a vyzařují spektrální čáry. [33]

Rentgenofluorescenční metoda je založena na principu rentgenového záření, pomocí kterého zjišťuje obsah prvku kovů ve zkoušeném materiálu na základě analýzy odražených paprsků. Analýza používá rentgenové lampy k ionizaci materiálu. Odražené záření je pak charakteristické pro každý chemický prvek, s nímž záření interagovalo. Podle intenzity vzniklého fluorescenčního záření lze určovat množství prvku ve vzorku. K detekci fluorescenčního záření se používají scintilační nebo polovodičové detektory.



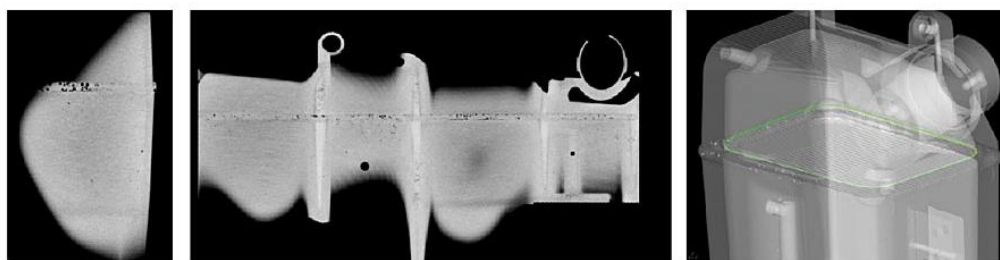
Obrázek 15: jiskrový spektrometr [34]

## 7 Moderní defektoskopické metody

### 7.1 Výpočetní tomografie

Počítačová tomografie se začala nejprve uplatňovat v medicíně, ale v posledních letech je čím dál více využívána v průmyslu. Díky nové výkonné výpočetní technice a přesným polohovým mechanismům překonala omezení na pouhou kontrolu materiálu. Oproti medicínské metodě průmyslová metoda umísťuje objekt na rotující podstavec a zdroj záření je statický. V průběhu toho se součást otáčí tak, že je nasnímána ze všech úhlů. Výhoda této metody je umožnění detekce vnitřních defektů za pomoci 3D modelů jako na obrázku 16. Modely je následně možné porovnávat s původním CAD návrhem. Tato metoda je často používána pro kontrolu v 3D aditivní výrobě a plynových turbínách. [35]

Počítačová tomografie se v technické praxi používá především pro kontrolu kompozitních materiálů a vrstevnatých konstrukcí, odlitků a vysoce namáhaných keramických dílů. Na trhu je dostupná celá řada přístrojů. Nejlepší z nich mají rozlišení až v řádech mikrometrů. Hlavním omezením výpočetní tomografie je hustota a tloušťka materiálu, z něhož je vytvořen zkoumaný předmět. Maximální tloušťka kontrolovaného materiálu z oceli se pohybuje okolo 50 mm. Existují i další možnosti prozáření, jako například použití neutronového zdroje záření, ale v sériově vyráběných zařízeních jsou zatím nedostupné. Pro kovové materiály bude potřeba vyvinout mnohem více energie oproti například plastům. [36]



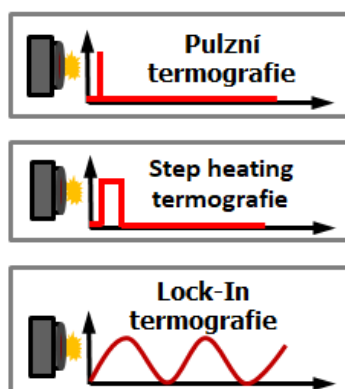
Obrázek 16: příklad obrazu tomografie [36]

## 7.2 Infračervená termografie

Tato technika je založena na získání a zhodnocení teplotních rozdílů na povrchu tělesa. Ty jsou snímány infračervenou kamerou. Citlivost detekce se pohybuje kolem  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Cílem kontroly je zjistit nesourodost materiálu, jako jsou trhliny, póry nebo cizí tělesa. Limitem termografie je, že emisivita závisí na povrchu kontrolovaného tělesa. Při známých vlastnostech materiálu lze zjistit rozsah vady buď teoreticky, nebo za použití srovnávacího etalonu.

Princip funkce termovizní je v infračerveném záření, které je soustředováno optikou termálního zobrazovače na detektor, který reaguje změnou napětí nebo odporu. Detektory dělíme na dva základní typy tepelné a fotonové. Elektronika jej zaznamenává v termálním zobrazovači. Signál je převeden na elektronický obraz na displeji. Termogram je obraz cíle elektronicky zpracovaný tak, že na displeji jednotlivé barevné odstíny odpovídají různým vlnovým délkám infračerveného záření povrchu. Kamery na termografii pak mají termogram složený s pixelů a každý jeden z nich odpovídá teplotě v místě objektu. Standardní rozlišení se pohybuje okolo  $320 \times 240$  pixelů. [37]

Dělí se na aktivní termografii a pasivní, ta pouze kontroluje povrch za běžného provozu. Využívá se především k prediktivní údržbě a diagnostice. Aktivní termografie využívá externího zdroje tepla pro stimulaci měřeného objektu. Pro ohřev se používají lasery, mikrovlny nebo vířivé proudy. Metoda se dále dělí podle způsobu buzení na metodu periodického buzení (lock-in), metodu pulzu (pulzní termografie), metodu tepelné vlny (Transite termografie) a metodu kontinuálního buzení (obrázek 17). Aktivní technologie se více využívá v průmyslu a také ve výzkumu a vývoji. [38]



Obrázek 17: rozdíly v průbězích technik aktivní termografie [38]

Komponenty pro aktivní termografie je počítač, termokamera zařízení pro excitaci teploty a samotný vzorek. Princip postupu je ten, že povrch vzorku je stimulován pulsem, který trvá zhruba několik milisekund až sekund. Teplo z impulzu je pohlceno tělesem a v závislosti na chybách v materiálu se bude šířit jinou rychlostí. To zaznamená připravená termokamera. Časový vývoj teploty se pak vyhodnotí do teplotního profilu. Profil pro materiál s chybou a bez ní bude rozdílný. [39]

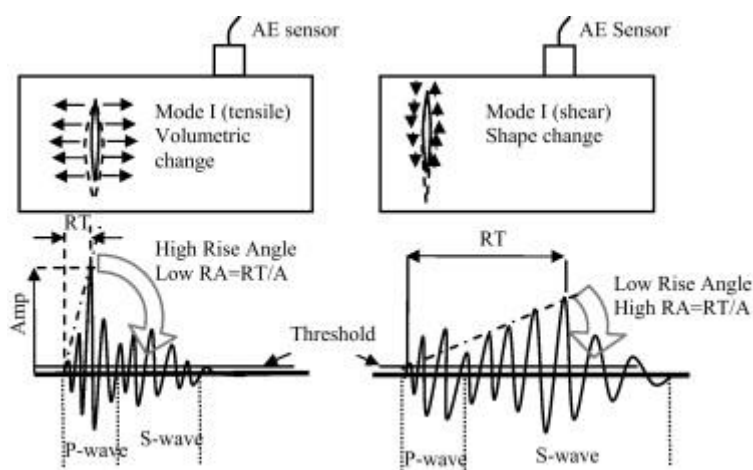
### **7.2.1 Metoda magnetické paměti materiálu (MMM – Metal Magnetic Memory)**

Metoda založená na magnetické paměti kovů. Magnetická paměť materiálu je jev, který nastává v materiálu ve formě zbytkové magnetizace vlivem procesu výroby například tepelného zpracování, ochlazování, tváření, ohýbání, lisování, sváření apod., v prostředí zemského magnetického pole a vlivem provozního zatížení. S její pomocí lze vyhledat poruchy nebo koncentrace napětí u feromagnetických materiálů. Měřením a analýzou magnetického pole těsně nad povrchem kontrolovaného prvku lze zjistit zbytkové magnetické pole. Pole je způsobeno vlivem procesu výroby a zemského magnetického pole. [40]

Výhody metody jsou: inspekce je možná i za provozu, není třeba úprava povrchu měřeného materiálu, rychlost měření. Nevýhoda je, že nelze použít na uměle zmagnetované kovy a nemagnetické materiály. Speciální zařízení jsou schopna měřit potrubí i v hloubce 1 až 2 metry. [41]

### 7.3 Metoda akustické emise

Moderní metoda založená na snímání akustických emisí (viz obázek18). Zdrojem akustické emise je například plastická deformace doprovázená poskoky dislokací. Napěťové vlny se šíří od zdroje až do snímače, kde se transformují na elektrický signál. Pro sledovací zařízení se využívají piezoelektrické snímače, které pracují v oblastech od 100 kHz až do cca 2 MHz. Při měření se používá obvykle více snímačů rozmístěných do sítě pokrývající kontrolovaný objekt. Elektrický signál se analogicky zpracuje a vyhodnotí měřícím systémem.



Obrázek 18: princip akustické metody [51]

Tato metoda se využívá na detekci defektů tlakových nádob, porušení nosných konstrukcí a monitorování netěsností a to vše i za provozu. Také se může využít na monitorování procesů sváření a obrábění a mnohé další oblasti. [7]

Vlastnosti metody:

- Metoda vyžaduje stimulaci k začátku procesu – například natlakování potrubí.
- Procesy zaznamenaných aktivit jsou většinou nezvratné.
- Metoda dokáže zaznamenat jak povrchové procesy, tak vnitřní.
- Metoda nepotřebuje přístup k vnitřním částem kontrolovaného objektu.
- Metodu lze provádět i za provozu.
- Zkouška není opakovatelná (Kaiserův jev)

## 8 Příklad aplikace kontroly svarů

Pro kontrolu svarů budou využity metody vizuální, kapilární a magnetická prášková. Vizuelní prvotní zevrubná kontrola, která zjistí povrchové defekty, jako jsou nerozměrnosti, trhliny, zápaly a další. Následovat bude penetrační (kapilární) zkouška, která odhalí vady spojené s povrchem. Nakonec bude provedena zkouška magnetická prášková, která odhalí vady těsně pod povrchem v rozsahu 2 až 3 mm.

Metody dělíme na povrchové a hloubkové, do povrchových můžeme zařadit kapilární, magnetické a spektrální analýzu, do hloubkových pak zkoušky prozařování, tomografie či ultrazvuk.

## 9 Použité materiály

Žárupevná ocel Super 304H byla vyvinuta společnostmi Nippon Steel & Sumitomo Metal [42]. Tento materiál se široce používá v uhelných elektrárnách, a to především v ultra a superkritických elektrárnách (USC), tedy tam, kde je potřeba dosáhnout vyšších teplot a tedy i vyšší účinnosti. V částech kotlů jako je přehřívák, kde teplota přesahuje 600 °C a tlak 25 MPa, je prostředí díky páře korozivní. Austenitické oceli mají asi o 50% větší tepelnou roztažnost a o 50% nižší tepelnou vodivost [2]. Výhodou těchto materiálů oproti podobným je také dobrý poměr cena – odolnost tečení. Vhodné jsou niklové slitiny, které však výrazně zvyšují cenu materiálu. [43]

Austenitické oceli obecně mají dobrou svařitelnost a mají dobrou odolnost proti vzniku trhlin za horka. Charakteristické jsou svým sklonem k tvorbě tzv. vrstevných chyb. Ty zabraňují v pohybu dislokacím a pro další deformaci je nutné výrazně zvýšit napětí. [44]

## 9.1 SUPER 304H

Jedním z hlavních představitelů vhodných austenitických ocelí a materiál použitý pro experimentální práce je SUPER 304H. Je to ocel ve skupině 18Cr 8Ni austenitických ocelí. Dle ČSN EN 10027-1 je označována jako X10CrNiCuNb 18–9-3. Dosahuje jemnozrné struktury při termomechanickém zpracování v rámci výrobní linky. Korozní odolnost je způsobena chemickým složením legur, zvláště chromem, který vytváří na povrchu ocelí tenký film oxidů, takzvanou pasivační vrstvu. Mimo chrom podporují odolnost proti oxidaci křemík a hliník. Další prvky přítomné v materiálu jsou Ti a Nb, které snižují náchylnost k mezikrystalové korozi. Odolnost proti tečení je pak dosažena legováním prvky boru a mědi. Celé chemické složení je vidět na obrázku 19. [45]

Jako většina austenitických korozivzdorných ocelí má nízké pevnostní hodnoty a nízký poměr smluvní meze kluzu k mezi pevnosti. Vyznačuje se dobrou tvářitelností za tepla a za studena a dobrou svařitelností. Pro zvýšení pevnosti se často zpracovává deformačním zpevněním za studena. Bohužel pak má ocel sníženou obrobiteľnosť. [43]

Super304H	0.07–0.13	max 0.30	max 1.00	max 0.04	max 0.01	17.0–19.0	7.5–10.5	-	-	2.5–3.5	0.30–0.60	0.05–0.12	0.001–0.010
HR3C	0.04–0.10	max 0.75	max 2.00	max 0.03	max 0.03	24.0–26.0	17.0–23.0	-	-	-	0.20–0.60	0.15–0.35	-
Sanicro 25	0.04–0.11	max 0.40	max 0.60	max 0.025	max 0.015	21.5–23.5	23.5–26.5	2.0–4.0	1.0–2.0	2.0–3.5	0.30–0.60	0.15–0.30	max0.008

Obrázek 19: složení ocelí [45]

## 9.2 HR3C

Druhým materiálem je HR3C, který vychází z chemického složení 25Cr-20 Ni. Dle evropského značení je to ocel X6CrNiNbN 25-20. Ocel byla vytvořena modifikací AISI 310 přidáním prvků tvořících karbidy a nitridy jako je Nb a N ke zvýšení pevnosti v tečení a snížení náchylnosti k tvorbě sigma fáze. [46]

Má podobné vlastnosti jako předchozí ocel SUPER 304H, ale vykazuje vyšší mez kluzu, viz obrázek 20. Z obrázku je také vidět, že oceli mají relativně nízkou mez kluzu, která klesá s teplotou. Mikrostruktura oceli se skládá z hrubozrnné austenitické matrice, v níž jsou vyloučené částice karbidu  $M_{23}C_6$  a dále jemně rozptýlené částice karbidu NbC v matrici. [47]

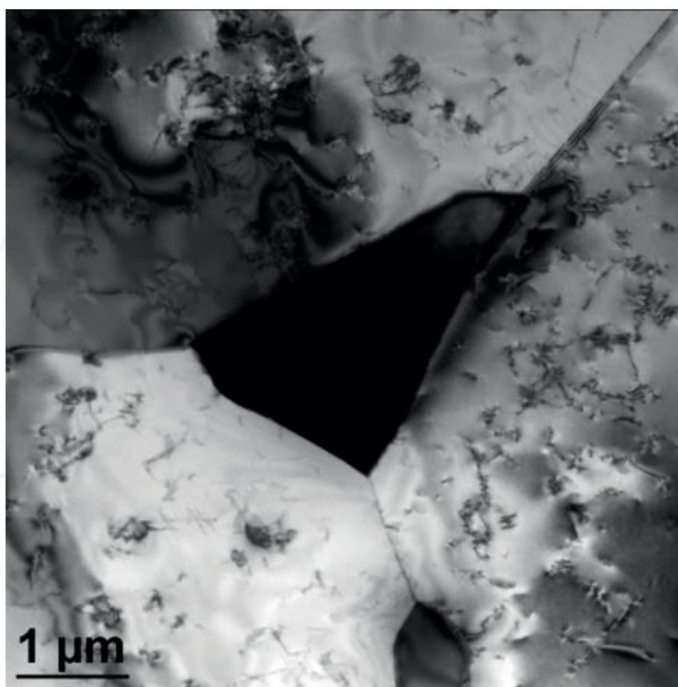
Name of dimension	Yield strength $R_{p0.2}$ [MPa]	Breaking strength [MPa]	Yield strength at elevated temperature $R_{p0.2}$ [MPa]	Elongation A [%]	Impact energy KV [J]
testing temperature [°C]	20	20	650	20	20
HR3C	$\geq 295$	655-900	180	$\geq 30$	85
Super 304H	$\geq 235$	590-850	135	$\geq 35$	85
Tp347HFG	$\geq 205$	550-750	126	$\geq 35$	85
P92	$\geq 440$	620-850	248*	$\geq 19$	40

Obrázek 20: vlastnosti ocelí [48]



### 9.3 Sigma fáze

Sigma fáze je křehká a tvrdá intermetalická fáze (obrázek 21). Způsobuje výrazné křehnutí materiálu. Další ovlivněné vlastnosti jsou zvýšení tvrdosti, pevnosti, meze kluzu a zároveň klesání tažnosti a kontrakce. Pro své vlastnosti je nežádoucí v žárovevných ocelích. V ocelích odolných tečení má zásadní dopad na tečné vlastnosti. Vyskytuje se po dlouhodobém stárnutí při vysokých teplotách okolo 600°C. Vzniká v ocelích, kde obsah chromu přesahuje 20 %. Vznik sigma fáze podporují nejvíce prvky Mo, Si, méně pak Mn a Co. V austenitických ocelích je zapříčiněna lokálním zvýšením koncentrace chromu po hranicích zrn, nebo zvýšením obsahu feritu delta ve struktuře. Tím může zapříčinit snížení korozivzdornosti a snazší šíření trhlin. Odstranění sigma fáze u korozivzdorných ocelí lze dosáhnout rozpouštěcím žháním, tedy ohřevem na teplotu okolo 1050 °C. [49]



Obrázek 21: precipitace sigma fáze na hranicích zrn po dlouhodobém provozu [45]

## 10 Vypracování - vizuální kontrola

V rámci experimentální části byla použita vizuální kontrola svarových spojů. Ve vizuální kontrole se používají i destrukční metody pro zjištění kvality sváru. Metoda je vhodná při velkých sériích výrobků. Při zkoušce se posuzují jak nepravidelnosti, tak mikrostruktury a makrostruktury svaru. V této části se zaměřuji na to, jak by takováto kontrola mohla vypadat.

Kontrolované součásti jsou dva tupé svary trubek z oceli SUPER 304H. Ty byly vyříznuty ze svého místa a zality do pryskyřice. Liší se způsobem výroby, jeden byl vytvořen kvalifikovaným svařečem a druhý byl vyroben automaticky s orbitální svařovací hlavou.

### 10.1 Postup přípravy

1. Nařezání kontrolované části
2. Zalití do epoxidu / zalisování do bakelitu - k lepší manipulaci se vzorkem.
3. Broušení – pro odstranění fleků, škrábanců apod. Provedeno postupným broušením na metalografické brusce.
4. Leštění – nejdříve diamantovou suspenzí (3 mikrony) + smáčedlo. Následuje leštění se suspenzí oxidu hlinitého  $AlO_3$  0,05  $\mu m$ , která vyhladí většinu posledních rýh.
5. Osušení – lihem, který urychlí odpařování, a fénem.
6. Leptání – provedeno leptadlem: 15 ml HCl, 10 ml glycerol, 5 ml  $HNO_3$ . Metoda leptání byla prováděna potíráním povrchu zkušební vzorku.

### 10.2 Použité nástroje

leštička GPX – 300 automatická

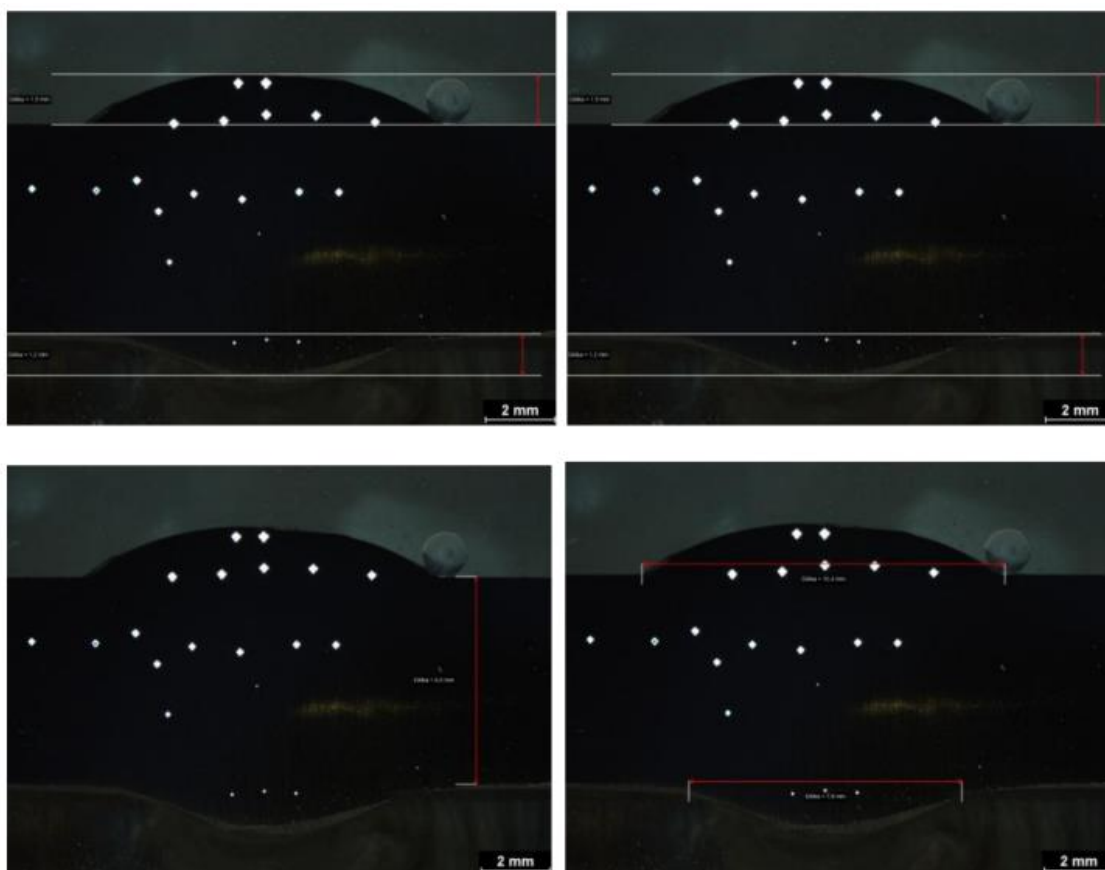
stereomikroskop – Nikon SMZ 1500

laboratorní mikroskop s videokamerou – neophot 32

### 10.3 Vyhodnocení svaru dle ČSN EN ISO 5817

Norma slouží k určení stupně kvality. Ty se dělí do třech stupňů B, C a D, kde B odpovídá nejvyšší kvalitě. Kontrola se zaměřila na makroskopické vady, které jsou snadno zjištělné. Definujeme rozměry typických vad a určíme stupeň jejich kvality.

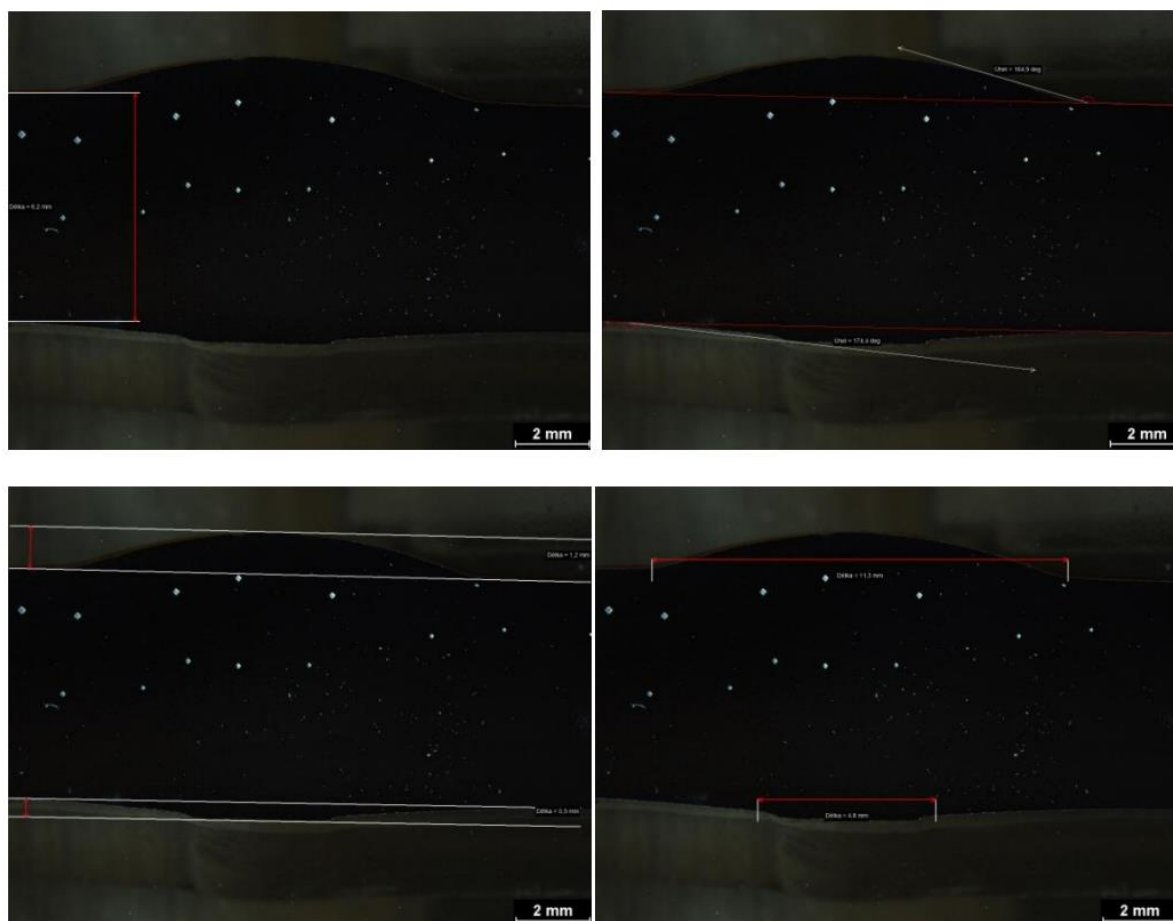
Ruční práce (vzorek: S304H Hom.Ruč. N s):



Obrázek 22: reliéfní profil ze stereomikroskopu kontrolovaného prvku 1

Vykonavatel zkoušky:	Protokol o vizuální kontrole svarů (podle ČSN EN 970 a ČSN EN ISO 5817) Visual inspection report		Protokol číslo: 01 list: 1
Zkušební místo:	Praha Karlovo náměstí	Zákazník:	
Výrobce:	Výkres číslo:		
Základní materiál: SUPER304H	Přídavný materiál:	Svářeč: -	Tepelně zpracováno: -
Svařovací proces: ruční	Typ svaru: tupý svar	Položka č.: 1	Poznámky:
Rozsah zkoušení: výřez svaru	Doplňující údaje:		
Zkoušeno podle: ČSN EN ISO 5817	kritéria hodnocení:	Stupeň jakosti: B	Stav povrchu: leštěno, leptáno
Metoda:	přímá / nepřímá	intenzita osvětlení: 500 lx	
Zdroj světla:	osvětlení od stereomikroskopu	Použité vybavení: leštička GPX – 300 automatická stereomikroskop – Nikon SMZ 1500	
Výsledky zkoušky:			
Nadměrné převýšení tupého svaru $t > 0,5 \text{ mm}; h = 1,5 \leq 1 \text{ mm} + 0,1 \cdot b = 1 + 0,1 \cdot 10,4 = 2,04$ odpovídá stupni kvality B			
Nadměrné převýšení kořene $t \geq 3 \text{ mm}; h = 1,2 \leq 1 \text{ mm} + 0,1 \cdot b = 1 + 0,2 \cdot 7,8 = 2,56$ odpovídá stupni kvality B			
Strmý přechod svaru $t > 0,5 \text{ mm}; \alpha = 156,3^\circ (\text{koruna}); 161,3^\circ (\text{kořen}) \geq 150^\circ$ odpovídá stupni kvality B			
poznámky:  Zápaly, přetečení a prolákliny se nevyskytují. Žádné systematické vady se v kontrolovaném průřezu nevyskytují.			
Datum: 20. 07. 2021	Zkoušku provedl a vyhodnotil: Filip Müller	Kvalifikace: -	

Strojní práce (vzorek: S304H Hom N):

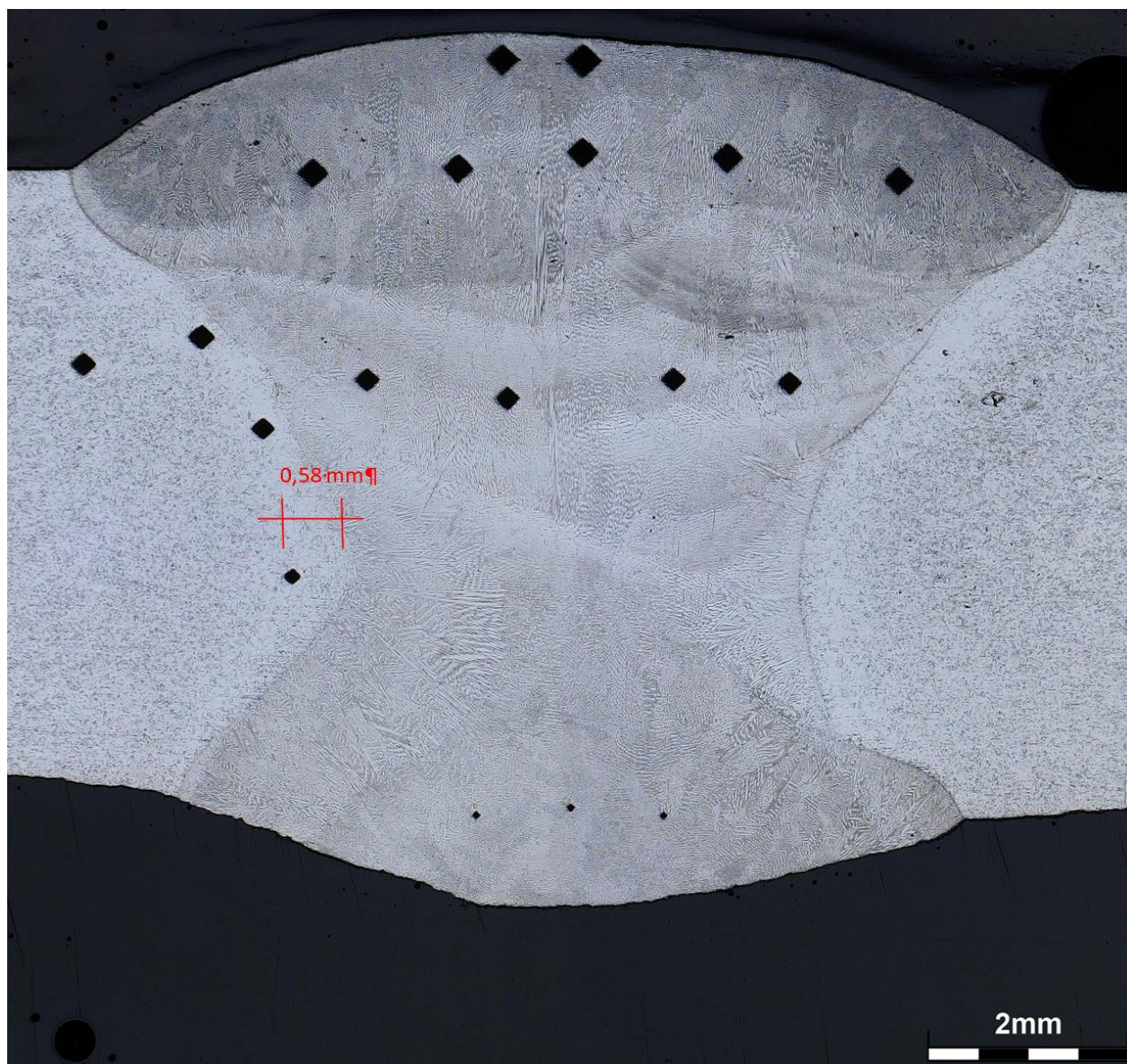


Obrázek 23: reliéfní profil ze stereomikroskopu kontrolovaného prvku 2

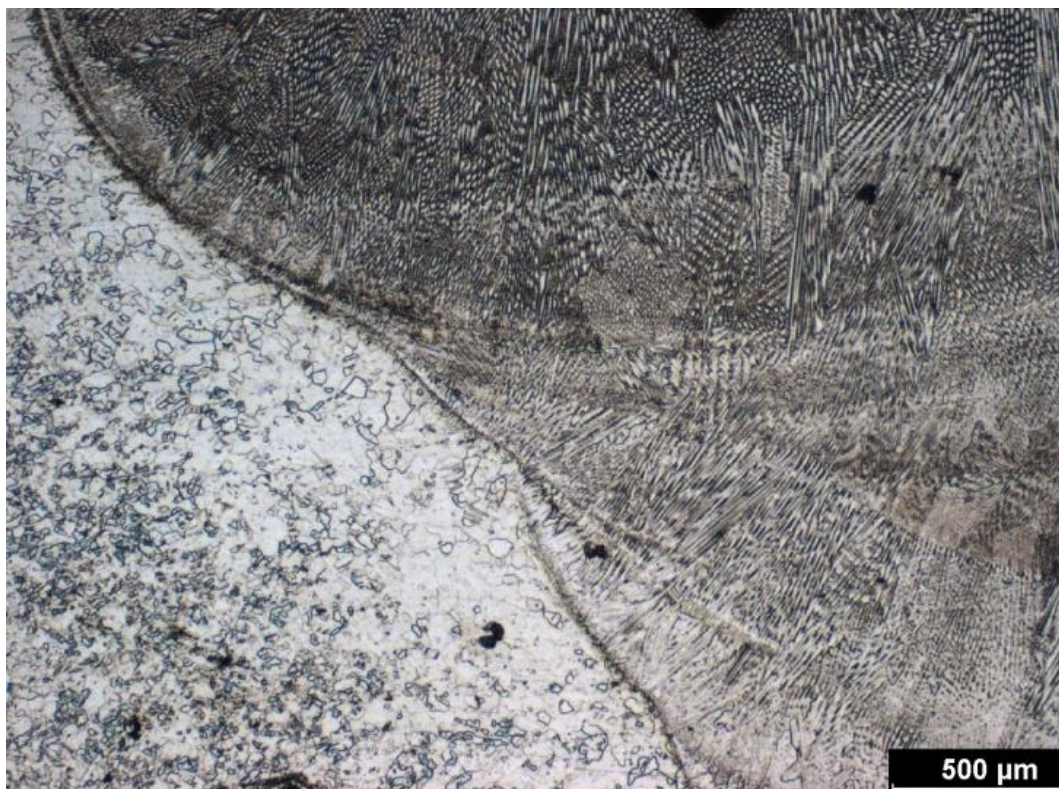
Vykonavatel zkoušky:	Protokol o vizuální kontrole svarů (podle ČSN EN 970 a ČSN EN ISO 5817) Visual inspection report		Protokol číslo: 02 list: 2
zkušební místo:	Praha Karlovo náměstí	Zákazník:	
Výrobce:	Výkres číslo:		
Základní materiál: SUPER304H	Přídavný materiál:	Svářeč: -	Tepelně zpracováno: -
Svařovací proces: Strojní	Typ svaru: tupý svar	Položka č.: 1	Poznámky:
Rozsah zkoušení:	Doplňující údaje:		
	výřez svaru		
Zkoušeno podle: ČSN EN ISO 5817	kritéria hodnocení:	Stupeň jakosti: B	Stav povrchu: leštěno, leptáno
Metoda:	přímá / nepřímá	intenzita osvětlení: 500 lx	
Zdroj světla:	osvětlení od stereomikroskopu	Použité vybavení: leštička GPX – 300 automatická stereomikroskop – Nikon SMZ 1500	
Výsledky zkoušky:			
Nadměrné převýšení tupého svaru $t = 6,2 \text{ mm} > 0,5 \text{ mm}; h = 1,2 \leq 1 \text{ mm} + 0,1 \cdot b = 1 + 0,1 \cdot 11,3 = 2,13$ odpovídá stupni kvality B			
Nadměrné převýšení kořene $t > 3 \text{ mm}; h = 1,2 \leq 1 \text{ mm} + 0,1 \cdot b = 1 + 0,2 \cdot 4,8 = 1,96$ odpovídá stupni kvality B			
Strmý přechod svaru $t > 0,5 \text{ mm}; \alpha = 164,9^\circ$ (koruna); $174,4^\circ$ (kořen) $\geq 150^\circ$ odpovídá stupni kvality B			
poznámky:  Zápaly, přetečení a prolákliny se nevyskytují, stejně jako u kontrolovaného vzorku tvořeného svářečem. Liší se menším převýšením kořene a korunky, tudíž i strmějším přechodem svaru.			
Datum: 20. 07. 2021	Zkoušku provedl a vyhodnotil: Filip Müller	Kvalifikace: -	

## 11 Makroskopická a mikroskopická kontrola

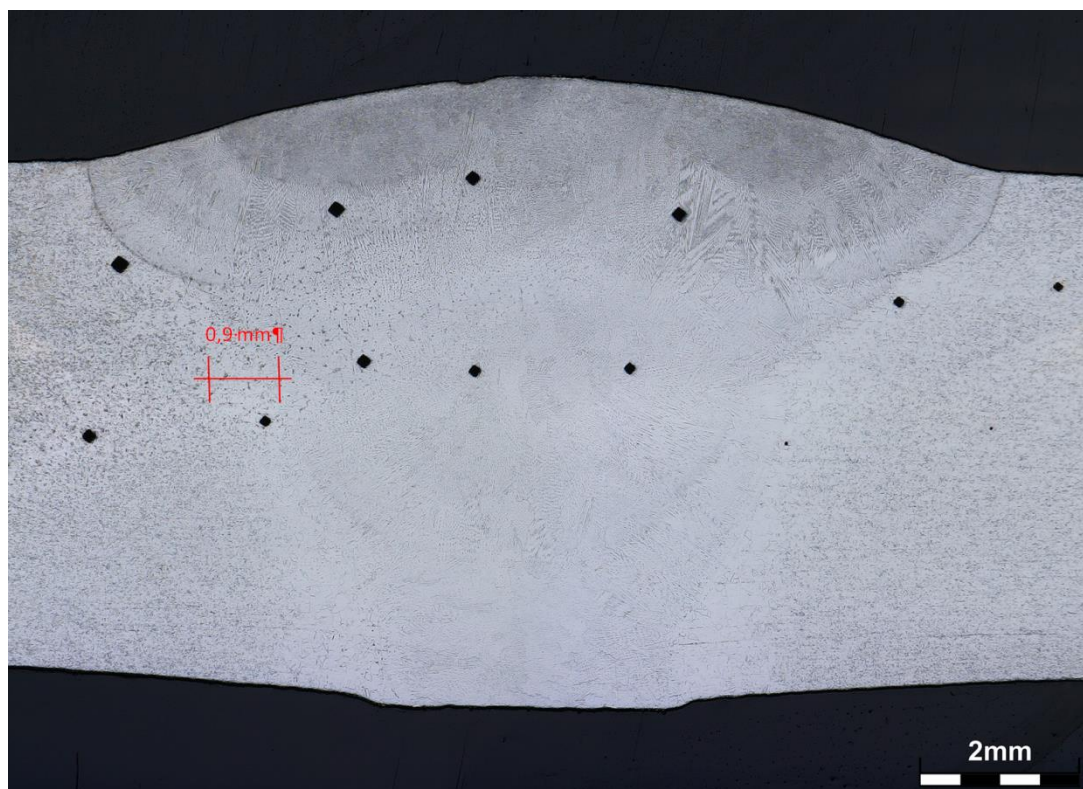
Ve vizuální kontrole se provádí také makroskopická a mikroskopická kontrola, která probíhá obecně se zvětšením kontrolovaného vzorku kolem 50x (makroskopická) až 500x (mikroskopická) v nenaleptaném nebo naleptaném stavu. Používá se pro odhalení makroskopických a mikroskopických charakteristik svaru. [50]



Obrázek 24 snímek svaru kontrolovaného vzorku 1

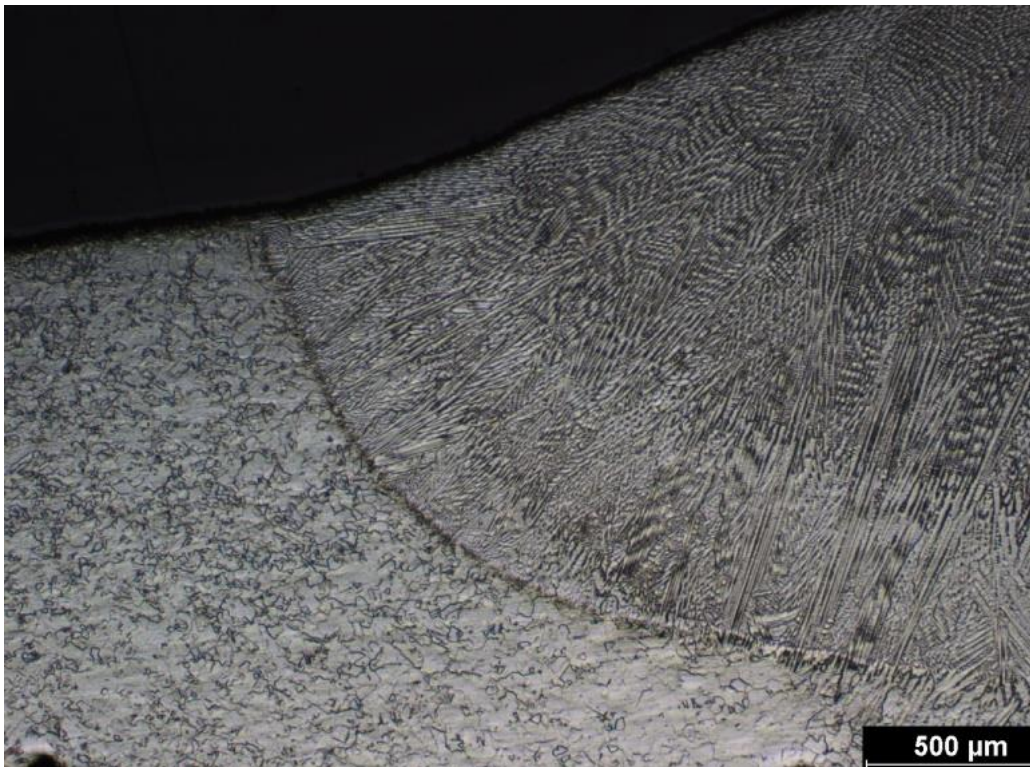


Obrázek 25: detailní snímek přechodu svaru kontrolovaného vzorku 1



Obrázek 26: snímek svaru kontrolovaného vzorku 2





Obrázek 27: detailní snímek přechodu svaru kontrolovaného vzorku 2

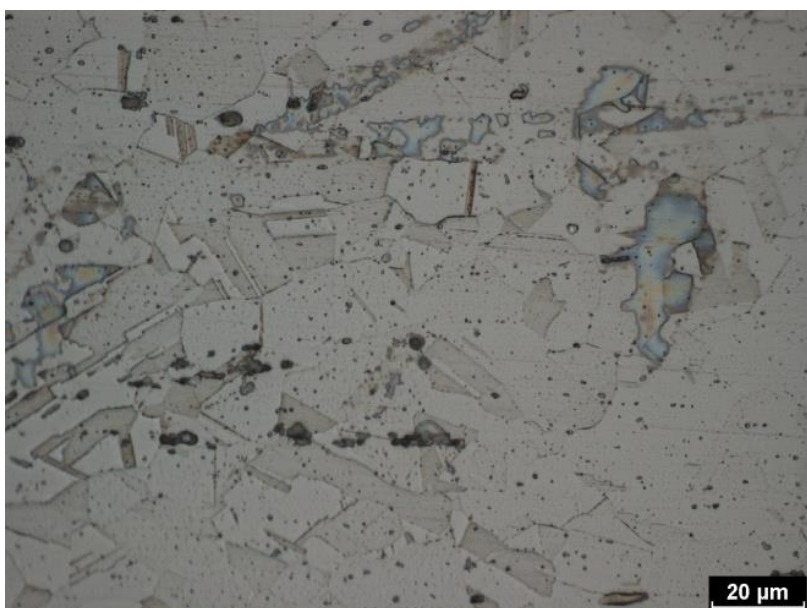
Na obrázcích lze pozorovat jemnozrnnou strukturu austenitické oceli, která tvoří trubku, a hrubozrnnou strukturu svaru, která tvoří dendritické struktury. Na obrázku vzoru 1 je svar provedený svářečem. Tepelně ovlivněná oblast je okolo 0,58 mm. Strojem vytvořený svar má pak oblast širší – okolo až 0,9 mm. Na obrázku 26 je možné vidět, že strojní svar ovlivňuje mnohem více materiál, a to hlavně v kořenové části, kde drsnost austenitických zrn je výrazně vyšší ve srovnání se vzorkem vytvořeným svářečem. Čtvercové tmavé části jsou pozůstatky z testu tvrdosti. Na svaru tvořeném strojem je možné vidět nedostatky v leštění, primárně na spodní části jsou vidět vodorovné čáry, které zůstaly po broušení.

## 11.1 Mikrostruktura

Na těchto obrázcích je možné vidět mikrostruktury ocele SUPER 304H. Konkrétně je možné spatřit austenitickou strukturu s ostrohrannými rekrystalizovanými zrny. Dále jsou patrná dvojčata. Tmavé skvrny jsou patrně zbytky špíny z předchozích procesů. Žluto – modré skvrny jsou karbonitridy niobu (pravá část obrázku 29).



Obrázek 28: detail mikrostruktury – základní materiál kontrolovaného vzorku 1



Obrázek 29: detail mikrostruktury – základní materiál kontrolovaného vzorku 2

## 12 Závěr

V práci jsem se zabýval různými defektoskopickými zkouškami a zpracoval jsem jejich přehled. K defektoskopickým zkouškám jsem vypracoval jejich obecné principy se zaměřením na jejich využití, vlastnosti, výhody a nevýhody. Prostudoval jsem si jejich vývoj, který je definován neustálými pokroky ve vývoji počítačové techniky. Mnoho metod se automatizuje a robotizuje. Dalším trendem je přejímání technologií z jiných odvětví, jako je tomografie z lékařství nebo metoda Phased Arrays, také z lékařského, potažmo leteckého průmyslu.

Aplikoval jsem metodu vizuálního zkoušení v laboratoři na vzorku oceli SUPER 304H jako praktickou ukázkou. Sepsal jsem potřebné nástroje pro vypracování zkoušky a postup jejího zpracování. Provedl jsem zkoušku v prostředí universitní laboratoře a nakonec jsem k ní vypracoval protokol s výsledkem kontroly. Zkouška proběhla úspěšně, svary byly vyhodnoceny na nejvyšší požadovanou kvalitu. Plánoval jsem vyzkoušet také další metody v laboratorní praxi, bohužel mi v tom zabránila epidemiologická situace.

## Reference

- [1] AL., J.M.K.C. *ENERGY EDUCATION* [online]. 2018 [cit. 2021]. Dostupné z: [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Supercritical\\_coal\\_plant](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Supercritical_coal_plant)
- [2] FUJIO ABE, Torsten-Ulf. *Creep-resistant steels*. Woodhead Publishing and Maney Publishing, 2008.
- [3] *Wikipedia* [online]. [cit. 2021]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Creep\\_\(deformation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Creep_(deformation))
- [4] HRADIL, DAVID. *KOROZIVZDORNÉ OCELI PRO SOUČÁSTI PARNÍHO*. VUT v Brně: Bakalářská práce, 2014.
- [5] *Wikipedia* [online]. [cit. 2021]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Koroze>
- [6] HOLÁŇ, Ing. *Šíření dlouhých únavových trhlin v austenitické oceli při smykových módech II a III*. VUT v Brně, 2013, .
- [7] KOPEC. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008.
- [8] ING. JIŘÍ BARTÁK, CSc. *Česká svářečská společnost ANB* [online]. [cit. 2021]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
- [9] Svařování MIG/MAG - seznámení. *SVÁŘEČKY-ELEKTRODY.cz*. 2020. Dostupné také z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-mig-mag-zakladni-seznameni/t-41/t-116>
- [10] ČSN EN 13018 . *Nedestruktivní zkoušení - Vizuální kontrola - Všeobecné zásady*: 015037, 2002.
- [11] TICHÝ, Ing. *Svarinfo.cz* [online]. 12 [cit. 2021]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2008021901>
- [12] NORMA. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Vizuální kontrola tavných svarů*. In: . 2018.
- [13] INTRODUCTION TO NONDESTRUCTIVE TESTING. *The american society for nondestructive testing*. 2020. Dostupné také z: [https://www.asnt.org/MajorSiteSections/About/Introduction\\_to\\_Nondestructive\\_Testing.aspx](https://www.asnt.org/MajorSiteSections/About/Introduction_to_Nondestructive_Testing.aspx)
- [14] MATOUŠEK, Jakub. *Jakub Matoušek*. 2021. Dostupné také z: <http://www.matousekhk.cz/pmi.html>
- [15] ČSN EN ISO 3452-1. *Nedestruktivní zkoušení - Kapilární zkouška - Část 1: Obecné zásady*: 015018, 2015.

- [16] ČSN EN ISO 23277. Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení kapilární metodou - Stupně přípustnosti: 051176, 2016.
- [17] SMITH, Robert. Non-Destructive Testing (NDT) – Guidance Document: An Introduction to NDT Common Methods. *British Institute of Non-Destructive Testing*. 2015, (0502), 27-29.
- [18] *Jak fungují metody NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ*.  
[http://www.techmagazin.cz/ke\\_stazeni/T082011M.pdf](http://www.techmagazin.cz/ke_stazeni/T082011M.pdf), srpen 2011, 9.
- [19] WILLIAMS, Jerry. *Farr's Physics for Medical Imaging (Second Edition)*. 2008. Dostupné také z:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780702028441500090#!>
- [20] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, s.r.o., 2001.
- [21] ATG. 2021. Dostupné také z: <https://www.atg.cz/ndt-121&display=UT>
- [22] Nedestruktivní zkoušení (NDT). *Proinex*. 2020. Dostupné také z:  
[https://www.proinex.cz/cs/blog/3\\_mereni-tloustky-nateru-ultrazvukem-ndt](https://www.proinex.cz/cs/blog/3_mereni-tloustky-nateru-ultrazvukem-ndt)
- [23] *Uni-max* [online]. [cit. 2021]. Dostupné z: <https://www.uni-max.cz/produkty/vybaveni-dilen/meridla/tloustkomery/ultrazvukovy-tloustkomer-maxmat200>
- [24] ČÍP, Ondřej. *NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ*. 2012,  
[http://www.techmagazin.cz/ke\\_stazeni/ndt/ndt2.pdf](http://www.techmagazin.cz/ke_stazeni/ndt/ndt2.pdf).
- [25] -. Ultrazvukové sondy "phased array" v energetickém průmyslu. *Průmyslové spektrum* [online]. 2006, 2006 [cit. 2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/ultrazvukove-sondy-phased-array-v-energetickem-prumyslu>
- [26] *FOERSTER* [online]. [cit. 2021]. Dostupné z:  
<http://www.foerstergroup.cz/cs/cze/technologie/ultrazvukove-zkouseni/>
- [27] *Wikipedia* [online]. [cit. 2021]. Dostupné z:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic\\_acoustic\\_transducer](https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_acoustic_transducer)
- [28] *Weldinspect*. 2021. Dostupné také z: <https://www.weldinspect.cz/magneticka-metoda-praskova>
- [29] ČSN EN ISO 9934-1. Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení magnetickou práškovou metodou - Část 1: Všeobecné zásady: 015046, 2002.
- [30] ČSN EN 1290. Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení svarů magnetickou metodou práškovou: (051182), 2010.

- [31] BHAGI, Purna. Eddy Current Testing:Basics. *Journal of Non Destructive Testing & Evaluation*. 2011, **258935465**.
- [32] BAS. 2021. Dostupné také z: <https://www.bas.cz/>
- [33] -. *AZO materials* [online]. 2018 [cit. 2021]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=15632>
- [34] SPECTRO CS. 2021. Dostupné také z: <https://www.spectro.cz/jiskrove-spektrometry/>
- [35] WEAVER, Gregory. *Computed Tomography for NDT*. 2021.
- [36] STRIČEK, Daniel. *Průmyslové CT - podpora kvality* [online]. [cit. 2021]. Dostupné z: <https://www.pbt.cz/cz/clanky/prumyslove-ct-podpora-kvality>
- [37] *Termokamera.cz* [online]. [cit. 2021]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>
- [38] SVOBODA, Jiří. INFRAČERVENÉ TERMOGRAFICKÉ (NEDESTRUKTIVNÍ). *Czech Society for Nondestructive Testing*. 2012, (20112491).
- [39] *W-technika* [online]. [cit. 2021]. Dostupné z: <https://www.termokamery-flir.cz/aktivni-termografie-jako-metoda-ndt-nedestruktivniho-testovani/>
- [40] VÁCLAV SVOBODA, Zdislav. METODA MAGNETICKÉ PAMĚTI MATERIÁLU . *Czech Society for Nondestructive Testing*. 2011.
- [41] *INSPEKCE METODOU MMM*. 2011, (082011), 17.
- [42] Post-weld Heat Treatment and Groove Angles Affect the Mechanical Properties of T92/Super 304H Dissimilar Steel Weld Joints. WANG SHUO, Wei. *High Temperature Materials and Processes*. De Gruyter, 2017.
- [43] BRENNER, Otakar. *Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály*. 2003. Dostupné také z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy-2-2.html>
- [44] ŽEMLOVÁ, Markéta. *SVAŘOVÁNÍ ŽÁRUPEVNÝCH OCELÍ METODOU APT*. VUT v brně: Bakalářská práce, 2014.
- [45] GRZEGORZ GOLAŃSKI, Adam. *Austenitic Stainless Steels - New Aspects*. INTECH, 2017.
- [46] ZHEN ZHANG, Zhengfei. Microstructure Evolution in HR3C Austenitic Steel during Long-term Creep at 650C. *Tongji University, Shanghai*. 2016.

- [47] KUBOŇ, Dr. *Hutnické listy*. 2014/5, s. 20-25.
- [48] LUKÁŠ POMIKÁLEK, Šárka. *EFFECT OF WELDING ON THE PROPERTIES OF HR3C, SUPER 304H, TP347HFG AND P92* [online]. 2013 [cit. 2021]. Dostupné z:  
<http://metal2013.tanger.cz/files/proceedings/12/reports/1584.pdf>
- [49] CHIH-CHUN HSIEH, Weite. Overview of Intermetallic Sigma ( $\sigma$ ) Phase Precipitation in Stainless Steels. *International Scholarly Research Notices* . 2021, , 2012732471.
- [50] NORMA. *ČSN EN ISO 17 639 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů- makroskopická amikroskopická kontrola svaru*. 2014.
- [51] D.G. AGGELIS, E.Z. *ScienceDirect*. 2011. Dostupné také z:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0093641311000139?via%3Dihub>

## Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: průběh tečení v čase[3]</i> .....	2
<i>Obrázek 2: mezikrystalová koroze austenitické korozivzdorné oceli[5]</i> .....	3
<i>Obrázek 3: jednoduchá měrka na koutové a tupé svary[11]</i> .....	7
<i>Obrázek 4: barevná indikace vady [14]</i> .....	9
<i>Obrázek 5: snímek kontrolovaného svaru [17]</i> .....	11
<i>Obrázek 6: princip ultrazvukové metody[17]</i> .....	13
<i>Obrázek 7: příklad ultrazvukového tloušťkoměru[23]</i> .....	15
<i>Obrázek 8: proměnné časování pulsů v elementech sondy[24]</i> .....	16
<i>Obrázek 9: princip EMAT [27]</i> .....	17
<i>Obrázek 10: princip práškové metody[28]</i> .....	18
<i>Obrázek 11: Přenosný elektromagnet (jho)[29]</i> .....	19
<i>Obrázek 12: průchod proudu v axiálním směru[29]</i> .....	20
<i>Obrázek 16: průchod proudu pomocí přiložených elektrod [36]</i> .....	21
<i>Obrázek 14: princip metody vířivých proudů[31]</i> .....	22
<i>Obrázek 15: jiskrový spektrometr [34]</i> .....	23
<i>Obrázek 16: příklad obrazu tomografie [36]</i> .....	24
<i>Obrázek 20: Rozdíly v průběžích technik aktivní termografie [45]</i> .....	25
<i>Obrázek 21: princip akustické metody [52]</i> .....	27
<i>Obrázek 19: složení ocelí[45]</i> .....	29
<i>Obrázek 20: vlastnosti ocelí [48]</i> .....	30
<i>Obrázek 21: precipitace sigma fáze na hranicích zrn po dlouhodobém provozu[45]</i> .....	31
<i>Obrázek 22: Reliéfní profil ze stereomikroskopu kontrolovaného prvku 1</i> .....	33
<i>Obrázek 23: Reliéfní profil ze stereomikroskopu kontrolovaného prvku 2</i> .....	35
<i>Obrázek 24 snímek svaru kontrolovaného vzorku 1</i> .....	37
<i>Obrázek 25: Detailní snímek přechodu svaru kontrolovaného vzorku 1</i> .....	38
<i>Obrázek 26: Snímek svaru kontrolovaného vzorku 2</i> .....	38
<i>Obrázek 27: Detailní snímek přechodu svaru kontrolovaného vzorku 2</i> .....	39
<i>Obrázek 28: Detail mikrostruktury -základní materiál kontrolovaného vzorku 1</i> .....	40
<i>Obrázek 29: Detail mikrostruktury -základní materiál kontrolovaného vzorku 2</i> .....	40