

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270014 - Materiálové inženýrství a výrobní technologie

Diplomová práce

Hodnocení creepového poškození ve svarových spojích

Autor: Bc. Lukáš Hubený
Vedoucí práce: Ing. Petr Beneš, Ph.D.
Konzultant práce: Ing. Pavel Mareš

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Lukáš HUBENÝ
Osobní číslo:	S20N0049P
Studijní program:	N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie
Téma práce:	Hodnocení creepového poškození ve svarových spojích
Zadávací katedra:	Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Zásady pro vypracování

1. Teorie creepového poškození
2. Creepové poškození svarových spojů
3. Zpřesnění detekce creepového poškození ve svarových spojích
4. Odhalování creepových vad pomocí metod NDT
5. Metalografické rozbory analyzující rozsah poškození
6. Odběr a vyhodnocování replik za účelem nalezení creepových kavit na povrchu potrubí

Rozsah diplomové práce: **50-60 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

OLYMPUS CORPORATION. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications.

Veselá, J.; Mareš, P.; Špirit, Z. Prvotní výsledky diagnostiky creepového poškození svarového spoje ultrazvukem, Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách, Sep 29-1, 2020; p. 131-136.

Creep Fatigue Damage Interaction: Fatigue Deformation and Failure, EPRI product ID 1018439, 2008.

Final Report on Round-Robin Conducted in Support of Standard Test Method for Creep-Fatigue Testing, EPRI Product ID 3002001719, 2013.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Beneš, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce: **Ing. Pavel Mareš**
Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2022**

Doc. Ing Milan Edl, Ph.D.
děkan

L.S.

Ing. Josef Odehnal, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: 25.5.2022

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Hubený	Jméno Lukáš
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270014S00 – Materiálové inženýrství a výrobní technologie	
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Beneš, Ph.D.	Jméno Petr
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KMM	
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Hodnocení creepového poškození ve svarových spojích	

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	73	TEXTOVÁ ČÁST	73	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce se zabývá poškozením potrubí v tepelných elektrárnách a hodnocením jejich zbytkové životnosti. Zaměřuje se na nedestruktivní metody hodnocení poškození. Úkolem je v práci potvrdit nebo vyvrátit přítomnost creepového poškození a zhodnotit další poškození.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Tepelné elektrárny, Creep, poškození, metalografie, zkoušky materiálu

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Hubený	Name Lukáš
STUDY PROGRAMME	N0715A270014S00 - Materials Engineering and Manufacturing Technology	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Beneš, Ph.D.	Name Petr
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Assessment of creep damage in welds	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	73	TEXT PART	73	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The diploma thesis deals with damage of pipes in thermal power plants and evaluation of their residual life. It focuses on non-destructive damage assessment methods. The task is to confirm or refute the presence of creep damage and evaluate further damage.
KEY WORDS	Thermal power plants, creep, damage, metallography, material testing

Poděkování

Tímto chci poděkovat vedoucímu této diplomové práce, panu Ing. Petru Benešovi, Ph.D., za rady a cenné připomínky, ochotu a pomoc s praktickou částí při tvorbě této práce. Zároveň také bych chtěl poděkovat Ing. Pavlu Marešovi, konzultantovi této práce, z výzkumného ústavu Centra výzkumu Řež s.r.o., za pomoc s pochopením problematiky, poskytnutí vzorků pro praktickou část a zároveň za jeho velkou nápomoc při řešení problémů a cenné rady a připomínky k této práci. V neposlední řadě bych chtěl také poděkovat rodině a přítelkyni za velkou podporu a pomoc po celou dobu mého studia.

Obsah

1	Úvod.....	5
2	Cíl práce	6
3	Životnost součástí a hlavní vlivy	6
3.1	Druhy životnosti.....	7
4	Procesy znehodnocování materiálu	8
4.1	Vliv koroze.....	9
4.1.1	Dělení koroze	10
4.2	Vliv eroze.....	12
4.3	Vliv kavitace	13
4.4	Vliv creepu.....	15
4.4.1	Difúzní creep.....	17
4.4.2	Dislokační creep.....	17
4.4.3	Creepový mechanismus.....	18
4.4.4	Faktory působící na creep.....	18
4.4.5	Poškození creepem ve svarech.....	20
5	Způsoby kontroly materiálů a součástí	20
5.1	Zkoušky nedestruktivní	21
5.1.1	Vizuální kontrola.....	21
5.1.2	Kontrola za pomoci ultrazvuku.....	21
5.1.3	Kontrola prozařovací RTG metodou.....	22
5.1.4	Metody kapilárních zkoušek.....	23
5.1.5	Metoda magnetická prášková	24
5.1.6	Využití replik	25
5.2	Zkoušky destruktivní.....	26
5.2.1	Metalografické zkoušky materiálu.....	26
5.2.2	Zkouška protlačovací	27
5.2.3	Creepové zkoušky materiálu.....	28
6	Materiály v energetice.....	29
6.1	Trendy u materiálů pro energetiku.....	30
7	Vzorky k praktické části	31
7.1	Měření tvrdosti.....	33

7.2	Chemické složení	34
7.3	Degradační procesy materiálu ČSN 15 128.....	34
7.4	Výpočet faktorů čistoty materiálu.....	36
7.4.1	CEF.....	36
7.4.2	Bruscattův faktor.....	37
7.4.3	J faktor.....	37
8	Kapilární zkouška	38
9	Hodnocení vad.....	41
9.1	Analýza vzorek A.....	43
9.2	Analýza vzorek B.....	44
9.3	Analýza vzorek C.....	45
9.4	Vyhodnocení vzorků	46
9.4.1	Vzorek A.....	46
9.4.2	Vzorek B.....	46
9.4.3	Vzorek C.....	47
10	Prozařovací RTG metoda.....	47
10.1	Vzorek D:	48
10.2	Vzorek E.....	49
11	Metalografická analýza	50
12	Využití replik.....	54
13	Diskuse výsledků	60
14	Závěr	63
15	Seznam použitých zdrojů	64

Seznam obrázků

Obr. 1. Koroze v potrubí [6].	11
Obr. 2. Trubka poškozená erozí [7].	12
Obr. 3. Vliv manganu v austenitické oceli [10].	14
Obr. 4. Vliv vysoké teploty na diagram tahové zkoušky [11].	15
Obr. 5. Difúzní creep [15].	17
Obr. 6. Pohyb při dislokačním creepu [16].	17
Obr. 7. Creepová křivka [17].	18
Obr. 8. Schéma kontroly vady rentgenem [23].	23
Obr. 9. Průběh protlačovací zkoušky – upraveno [21].	28
Obr. 10. Creepový zkušební stroj [12]	28
Obr. 11. ARA diagram 15 128 [35].	32
Obr. 12. Vzorek A kapilární zkouška, zdroj: vlastní.	39
Obr. 13. Vzorek B kapilární zkouška, zdroj: vlastní	39
Obr. 14. Vzorek C kapilární zkouška, zdroj: vlastní	40
Obr. 15. Vzorek A, indikace nalezené metodou Phased Array, vyznačení vad na metalografickém výbrusu, zdroj: vlastní.	43
Obr. 16. Vzorek B indikace nalezené metodou Phased Array, vyznačení vad na metalografickém výbrusu, zdroj: vlastní.	44
Obr. 17. Vzorek C, indikace nalezené metodou Phased Array, vyznačení vad na metalografickém výbrusu, zdroj: vlastní.	45
Obr. 18. Rentgenogram svaru vzorku D a ztotožnění nalezených indikací pomocí metody Phased Array, zdroj: vlastní.	48
Obr. 19. Rentgenogram svaru vzorku E a ztotožnění nalezených indikací pomocí metody Phased Array, zdroj: vlastní.	49
Obr. 20. Metalografie 1, zdroj: vlastní	50
Obr. 21. Metalografie 2, zdroj: vlastní	51
Obr. 22. Metalografie 3, zdroj: vlastní	51
Obr. 23. Metalografie 4, zdroj: vlastní	52
Obr. 24. Metalografie 5, zdroj: vlastní	52
Obr. 25. Metalografie 6, zdroj: vlastní	53
Obr. 26. Replika vzorku A, zdroj: vlastní.	55
Obr. 27. Replika vzorku B, zdroj: vlastní	55
Obr. 28. Replika vzorku C, zdroj: vlastní	56

Obr. 29. Detail struktury A, zdroj: vlastní	56
Obr. 30. Detail struktury B, zdroj: vlastní	57
Obr. 31. Detail struktury C, zdroj: vlastní	57
Obr. 32. Silikonová replika povrchu materiálu, zdroj: vlastní.....	58
Obr. 33. Silikonová vzorku A, zdroj: vlastní.	59

Seznam tabulek:

Tab. 1. Tabulkové chemické složení 1.7715 [33].	31
Tab. 2. Minimální mez kluzu při dané teplotě [33].....	31
Tab. 3. Minimální normované meze pevnosti při tečení [33].....	32
Tab. 4. Tvrdost materiálu v daných místech vzorku	33
Tab. 5. Naměřené chemické složení oceli ČSN 15 128	34
Tab. 6. Vypočtené hodnoty materiálových faktorů.....	37
Tab. 7. Neubauerovy třídy poškození [41].	41
Tab. 8. Hodnocení poškození – Neubauerovy třídy [42].....	54

1 Úvod

V současné době dochází na poli energetiky k určité recesi. Částečně za to může obrovský tlak na snižování emisí oxidu uhličitého a dalších škodlivých látek v atmosféře a zároveň také ubývající světové zásoby fosilních zdrojů. Vzhledem k snaze se od fosilních paliv oprostit a vytvářet celosvětově nižší uhlíkovou stopu, dostávají se tak v oblasti energetiky méně ekologické zdroje do pozadí a dávají přednost více „zeleným“. Tím méně ekologickým zdrojem jsou myšleny samozřejmě tepelné elektrárny na bázi spalování určitého produktu. Úvaha by to byla jednoduchá v případě, že by šlo úplně vyřadit z provozu tepelné elektrárny a používat jen zelené ekologické zdroje pro výrobu čisté energie, avšak právě i tyto zdroje mají své nevýhody a v současné době dokážou jen velmi špatně vykrývat určité napěťové extrémy v síti.

Řešení, které se nabízí, je, že právě méně ekologické tepelné elektrárny budou využívány v době, kdy bude v síti nějaký výkyv či předpokládaná vyšší spotřeba. A tu vyvstává velký problém, a to že při výstavbě většiny tepelných elektráren a při jejich konstrukci se neuvažovalo, že by se měly nějak často, jednoduše řečeno, vypínat a zase zapínat. Právě touto problematikou se bude zabývat tato diplomová práce. Tepelné elektrárny jsou koncipovány na prakticky nepřetržitý pracovní cyklus v rozmezí určitých teplot, a pokud by neustále docházelo k novému startování elektráren, budou všechny strojní součásti obrovským způsobem tepelně cyklicky namáhány. Hlavním úkolem je tedy zjistit, jak moc změny teplot ovlivňují chování materiálů použitých v daném závodě a vytvořit způsob, jak dokázat efektivně zjistit, kdy už je určitá část na hraně své životnosti a dokázat ji tak včas vyměnit, čímž by se mělo dokázat předejít poškozením takových součástí, a tím podstatně větším škodám a nebezpečnějším situacím.

2 Cíl práce

Cílem této diplomové práce je stanovit chování materiálu u aplikací v parovodech v elektrárně, kde na něj působí zároveň vysoký tlak a také vysoká teplota. Teplota se pohybuje okolo 650 °C a tlak většinou okolo 15 MPa. Při těchto podmínkách je známo, že obvykle dochází ke creepovému poškození, a to hlavně v místě, kde jsou technologicky vytvořeny svary. Toto poškození v určitém časovém horizontu působení může v materiálu potrubí způsobovat rozsáhlá poškození. V neposlední řadě až úplné protržení potrubí. Tato situace je samozřejmě naprosto nežádoucí. Důležitým prvkem, jak těmto situacím předcházet, je pravidelná kontrola, a podstatné je provádět kontrolu ve fázi, kdy se v materiálu poškození teprve začíná emitovat, aby bylo možné provést ochranná opatření, případně pak parovod včas vyřadit z provozu. Proto se tato práce bude zabývat metodami zpřesnění diagnostiky opotřebení a možných vad v potrubí. Bude se zaměřovat především na možnosti u technik phased array, ultrazvuku. Zaměřovat se práce však bude i na způsob vyhledávání kavit na povrchu potrubí metodou vytváření replik. Kromě těchto metod, které by dané potrubí neměly poškodit a bylo by dále v provozu použitelné, je možné rovněž poškození ověřit destruktivními metodami, tedy vyjmutím určitých částí součástí a následné diagnostiky pomocí např. metalografických metod. Ve všech těchto oblastech by se mělo hlavně posoudit, jak zpřesnit detekci poškození, a tím lépe předcházet možnému poškození či haváriím.

3 Životnost součástí a hlavní vlivy

Pojmem životnost součásti je definován časový úsek, během kterého je daná součást schopna být trvanlivá a spolehlivě plnit provozní a právní požadavky. Trvanlivost součásti znamená, že materiál výrobku si i přes určité degradační procesy zachovává vlastnosti požadované pro správnou funkčnost. Trvanlivost se také obecně dá označit odolnost materiálu vůči degradaci, a to jak vlivem prostředí, tak zároveň i vlivem provozu. Spolehlivost pak určuje pravděpodobnost vzniku určité vady, případně pak poruchy, a je ukazatelem kvality součásti, tedy jak konstrukce, tak zvoleného materiálu. Při návrhu je však nutné uvažovat i ekonomicky a součást s neomezenou životností je sice pro cílového zákazníka skvělá, avšak z ekonomického hlediska pro výrobce nevyhovující. V současné době se obvyklá životnost většiny součástí dimenzuje na tři až šest let.

Životnost se uvažuje u výrobku už ve fázi návrhu, přičemž se bere ohled primárně na provozní podmínky, ve kterých se daná součást během svého životního cyklu bude vyskytovat.

Pro správnou a zaručenou životnost proto bývá také předepsána pravidelná kontrola a údržba, případně preventivní výměna určitých částí. V neposlední řadě je pak brán ohled na materiál součásti, kdy se u něj může předpokládat dle předchozích zkušeností určitý druh degradace vlivem působení prostředí. Právě pro zjišťování životnosti a míry poškození materiálu je důležité na součástech obzvláště v teplotě průmyslu provádět nespočet různých zkoušek, které budou popsány dále a sledovat jejich jednotlivé důležité parametry.

3.1 Druhy životnosti

Při návrhu součásti je daný díl koncipován na určitou dobu životnosti, kterou určuje konstruktér, případně je součástí požadavku zákazníka. To označujeme jako navrhovanou životnost či plánovanou provozní životnost. Pokud se dodrží provozní podmínky a nedojde v nějaké oblasti k pochybení, takový čas životnosti se nazývá předpovídaná provozní životnost, případně pak plánovaná. Pokud je životnost výrobku taková, že pravděpodobně vydrží až do konce životního cyklu celého výrobku, je tato skutečnost označována jako zbytková provozní životnost. U zbytkové životnosti je právě nejdůležitější dokázat co nejpresněji odhadnout, jak ještě dlouho bude celý stroj pravděpodobně pracovat, a provést dostatečnou a podrobnou diagnostiku degradace jednotlivých jeho částí [1].

Degradace je pojem souhrnně označující obecně změny v materiálu, v mikrostruktuře, které probíhají v čase. Degradace materiálu podstatným způsobem ovlivňuje funkce a vlastnosti. To je umocněno ještě degradačním mechanismem, což souhrnně označuje fyzikální, mechanické a chemické působení, a zároveň dopad vnějších vlivů, jako je teplota či vlhkost. Hlavní myšlenka pak je taková, že postupným působením degradace materiál ztrácí své vlastnosti, a stává se pro dané účely nevhodným. V praxi je možné nejčastěji pozorovat 4 různé degradační procesy. Jsou to degradace mechanickým zatěžováním, tedy únava materiálu, dále je to pak poškození tepelným zatěžováním, což znamená určité cyklické tepelné zatěžování, či práce materiálu za vysokých teplot, čímž se ve velké části hlavně bude zabývat tato diplomová práce. Další je pak degradace chemická čili vlivem působení, ať už vnějších vlivů, nebo například média přenášeného danou součástí.

Poslední z této čtveřice degradačních vlivů je poškození zářením. Obecně se však setkáváme spíše s kombinovaným působením několika vlivů naráz, jako je například tepelné a mechanické zatížení [2].

Reálný čas životnosti, který často nelze předem určit, je označován jako cyklus životnosti. Je to doba od začátku používání součásti až do doby, kdy je z provozu vyřazena. Důvodem pro vyřazení bývá často dosažení mezní doby pro výměnu dané součásti. Ještě obvyklejší je však to, že určité pozorované kritérium, jako je například hluk vibrace a podobně, se dostane mimo požadované hodnoty. Poté dochází k opravě či úplné výměně dané součásti [1].

4 Procesy znehodnocování materiálu

Pro určení životnosti, případně pak toho, jak dlouho je ještě schopen již degradovaný materiál dále vykonávat svou funkci, je důležité znát chování a jednotlivé druhy procesů znehodnocování materiálu. Při pochopení degradačních procesů je pak mnohem jednodušší zjistit, o jakou vadu by se mohlo u dané součásti jednat, na co se zaměřovat při průběžných kontrolách, a tím i na jaký parametr si dávat větší pozor. Je důležité také sledovat mezní stavy, které mohou v materiálu nastat.

Existuje mnoho druhů mezních stavů jako například mezní stavy, které souvisí s deformací, kam patří mezní stav pružnosti či deformace. Další kategorií mohou být mezní stavy související s povrchem. Do této třídy patří poškození erozivní, kavitace, koroze, adhezivní a abrazivní opotřebení, kontaktní únava, vibrační opotřebení a tak dále. Další třídou jsou mezní stavy, které se vyznačují tím, že mají společný určitý druh porušování soudržnosti. Sem se řadí mezní stavy lomů, mezní stavy trhlin a jejich stabilita a také v této práci probíraný creep, jak teplotní, tak cyklický. Mezi jedny z posledních kategorií se pak řadí mezní stavy související s lidmi a stavy specifické. Mezi ty související s člověkem patří například sledování mezního stavu hluku a kmitání u součásti. Specifické mezní stavy se pak u tělesa zaměřují na mezní stavy kinematiky a vazeb, případně také jejich únosností. Tato práce se bude zabývat hlavně procesy poškozování materiálu, se kterými je možné se v praxi u sledovaného vysokotlakého parního potrubí nejpravděpodobněji setkat. Budou to tedy hlavně: creep, koroze, eroze, vibrační opotřebení, kavitace [3].

4.1 Vliv koroze

Často při návrhu nějaké součásti, v tomto případě se zaměříme už na potrubí, které slouží k přesunu určitého média na určitou vzdálenost, vyvstane problém, kdy právě kvůli přepravovanému médiu přestane většina vhodných materiálů návrhu vyhovovat. Někdy je nutné dopravovat velmi agresivní či dokonce radioaktivní látky, u kterých se dá uvažovat určitá agresivita. Pak jsou ale látky, u kterých se agresivní chování nepředpokládalo, avšak přesto jsou při chodu zařízení velmi nebezpečné. To jsou například média na bázi vody. Voda je jedním z hlavních činitelů koroze. Koroze je obecně proces, který je velmi nepříznivý pro použitý materiál. Definice koroze je shrnutím všech špatných chemických vlivů. Koroze je tedy fyzikálně chemická interakce kovu a nějakého prostředí, kdy tato interakce vede k určité chemické změně v materiálu na atomové úrovni, a tato změna má za výsledek podstatného zhoršení vlastností materiálu, a může se tak ovlivnit určitým způsobem i dané prostředí. Hlavním chemickým principem je přitom reakce materiálu s kyslíkem a dalšími látkami obsaženými ve vzduchu či v prostředí vyvolávající v materiálu oxidaci. Oxidace je chemicky vyjádřena jako ztráta elektronů. Na příkladu železa vzniká působením kyslíku na jeho povrchu oxid železitý, tedy Fe_2O_3 . U některých materiálů jako například u hliníku je oxidace výhodná, jelikož oxidací na povrchu se vytvoří ochranná pasivační vrstva, v tomto případě Al_2O_3 , která díky bariérovému efektu materiál chrání. U materiálů, jako je železo, je nutné materiál před korozi chránit uměle a ochrannou pasivační vrstvu nahrazovat povlakováním či nátěry [4, 5].

Voda jako prostředí je tak nebezpečná proto, že je vlastně prakticky všude. Vodu známe v kapalném skupenství, avšak hojně se vyskytuje také ve skupenství plynném jako vodní pára tvořící vzdušnou vlhkost. A jelikož je pro provoz součástí těžké vytvořit prostředí bez přirozené vzdušné vlhkosti, je velmi komplikované s tímto jevem bojovat a úplně ho eliminovat. Proto se u návrhů součástí, jako je právě parní potrubí či turbíny, musí zvolit vysoce korozi-vzdorné oceli a zároveň počítat s určitým úbytkem materiálu při provozu.

4.1.1 Dělení koroze

a) Koroze atmosférická

Koroze atmosférická je způsobena ve velké míře vzdušnou vlhkostí, počasím a dalšími vlivy atmosféry.

b) Korozi v kapalných látkách

Korozi v kapalných látkách způsobuje nejčastěji voda a její skupenství, případně pak jiná chemicky agresivní látka.

c) Koroze půdní

Půda díky své vlhkosti a složení tvoří kombinaci koroze v kapalině a koroze atmosférické. Složení půdy a vlhkost zároveň tvoří elektrolyt, a tím může docházet i ke korozi elektrochemické.

Dělní koroze podle prostředí:

- Chemická – u chemické koroze vzniká a probíhá koroze jen vlivem chemických reakcí mezi materiálem a okolím.
- Elektrochemická korozi – při elektrochemické korozi prostředí okolo materiálu figuruje jako elektrolyt, a díky působení i malého elektrického proudu materiál degraduje.

Dělení koroze podle chování materiálu:

- Koroze rovnoměrná – rovnoměrná koroze je rozložena rovnoměrně po celé součásti.
- Koroze nerovnoměrná – na rozdíl od koroze rovnoměrné, nerovnoměrná se vyskytuje jen místy a nevytváří obvykle souvislý povlak na materiálu.
- Koroze galvanická – u galvanické koroze musí být materiál heterogenní, kdy jedna složka je ušlechtilejší než druhá, a díky tomu vzniká galvanický článek, kde dva materiály tvoří katodu a anodu. Materiál, který je z dvojice méně ušlechtilý, pak zpravidla koroduje a degraduje rychleji.

- Štěrbínová koroze – vzniká vlivem kavit, ve kterých zůstává kapalina fungující jako elektrolyt pro možnou elektrochemickou korozi.
- Koroze bodová – koroze napadá jen malou plochu materiálu, obvykle však bývá součástí v tomto místě napadena do hloubky.
- Koroze erozivní – erozivní koroze je způsobena potenciální energií proudícího média, kdy systematicky poškozuje svrchní vrstvu a podněcuje korozi.
- Koroze mezikrystalická – koroze napadá nečistoty či prvky v materiálu usazené na hranicích zrn. Obvykle tyto prvky mají menší korozivní odolnost oproti materiálu hlavního zrna. Vlivem mezikrystalové koroze může docházet k mezikrystalickému praskání. Koroze je způsobena hlavně vlivem precipitátů, které se emitují při teplotě mezi 500 a 850 °C [4].

V případě této práce a vysokotlakých parních potrubí v tepelných elektrárnách by se dalo uvažovat, že se zde bude vyskytovat dle dělení chemická kapalinová koroze pravděpodobně nerovnoměrně v místě určitých chemických vad. Velice pravděpodobně pak vlivem kavit i koroze štěrbinová a bodová, určitě pak erozivní koroze vlivem pohybu horké páry a patrně také koroze mezikrystalická. Příklad koroze v potrubí je možné vidět na obr. 1 [4].



Obr. 1. Koroze v potrubí [6].

4.2 Vliv eroze

Eroze je proces, při kterém je materiál potrubí či součástí opotřebováván mechanicky kapalinou. Toto opotřebení se někdy může nazývat vymílání. Z hlediska návrhu součásti je eroze velmi komplikovaná, jelikož je těžké přesněji určit, kde vzniká a jak se bude chovat při provozu. V zasažených místech způsobuje majoritní úbytky materiálu. Problémovými místy pak v teplárenském průmyslu bývají lopatky turbín a trubková kolena viz obr. 2 [8].



Obr. 2. Trubka poškozená erozí [7].

Příčinou eroze je v teplárenství hlavně vznik malých kapiček v páře. K tomu dochází, když přehřáté páře, která proudí potrubím, klesne teplota a začne kondenzovat na malé kapičky o průměru řádově mikrometrů. Tento jev se nazývá primární kondenzace. Takto malé kapičky samy o sobě erozi nezpůsobují. Teplota páry začne klesat z důvodu, že pára není takzvaně v rovnováze čili je podchlazená. Aby opětovně dosáhla rovnovážného stavu, určitá její část mění své skupenství zpět na kapalné. Tento efekt je závislý na rychlosti rozpínání přehřáté páry. Oblast, při které k tomuto efektu, se nachází okolo Wilsonovy křivky. Vlivem kondenzace ztratí pára určité procento své vlhkosti. Vzhledem k erozi materiálu je více nebezpečná fáze druhá, která se nazývá sekundární kondenzace. Malinké kapičky vzniklé kondenzací v primární fázi se na některých místech začnou shlukovat a spojovat do větších kapek. Bývají to místa jako povrchy trubek či lopatky turbín. Tyto spojené kapky dosahují velikosti v řádech desítek až stovek mikrometrů. Takové kapky už vlivem kinetické energie způsobují deformaci materiálu a erozivní poškození [8].

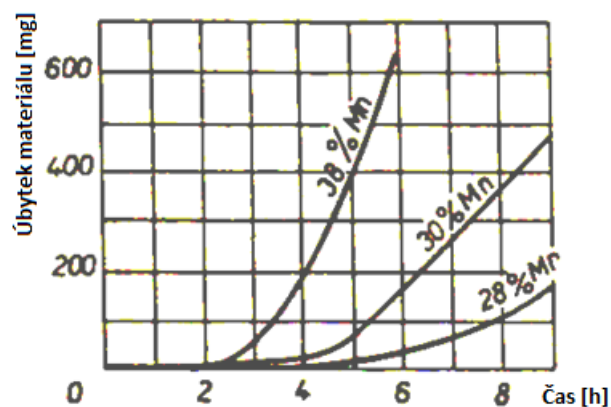
Jelikož eroze způsobuje změnu rozměrů součástí, hlavně pak tedy vnitřního průřezu, je nutné tyto parametry pravidelně kontrolovat. Sleduje se tloušťka potrubí a změny v chemickém složení materiálu. Pokud by se totiž potrubí dostalo v některém místě na kritický rozměr tloušťky stěny, hrozilo by nebezpečí protržení. Měření se provádí nejčastěji pomocí ultrazvuku. Obvykle se nesledují v teplárnách úplně všechna potrubí, nejčastěji bývají vytipována ta, u kterých hrozí větší výskyt kapek vody, a tím i větší náchylnost k erozivnímu poškození. Samozřejmě se také bere ohled na provozní teplotu, stáří dílu a druh oceli [9].

4.3 Vliv kavitace

Kavitace je proces, při kterém v kapalině dochází k poklesu tlaku. Vlivem tohoto značného poklesu tlaku dojde ke klesnutí teploty varu, a tím odpařování části kapaliny. Kvůli tomu se začnou v kapalině tvořit malinké bublinky. Díky kinetické energii kapaliny se tyto bublinky dostávají dále až opět do míst s vyšším tlakem. Tam dojde k opětovné kondenzaci bublinky, vytvoří se kavitační dutiny, jelikož bublina imploduje, čímž dojde k uvolnění velkého množství energie. Bublinky se přitom shromažďují v pásy, které se označují jako kavitační oblast. Uvolněná energie pak interaguje s povrchy potrubí, lopatek oběžných kol a nejčastěji pak lodních šroubů. Dochází k nárazům na povrch součásti, rozrušování povrchu, a tím vzniku poškození. Implozí bubliny, a často jejím opětovným vznikem, dochází k nepravidelným rázům tepajícím na povrch součásti, kde způsobuje únavové opotřebení, které vyústí v následné rozrušování povrchu dané součásti. Velikost účinku kavitačního opotřebení je pak přímo závislá na energii rázu, který imploze kavitační bublinky vytvoří. Hlavní pak je to, že největší kavitační opotřebení vzniká v místech, kde se na součásti kavitační bublinky odtrhávají od povrchu a disponují největší energií. Kvůli kontaktu bublinek s povrchem je menší kavitační účinek na součástech s menší drsností povrchu, nejlépe pak na leštěných plochách [10].

Vzhledem k rozsahu poškození tak kavitace svým druhem účinku působí na povrch součástí, čímž v první řadě mění jejich vlastnosti a do materiálu vnáší velké pnutí. Díky tomu mohou nastat zpravidla dvě situace. V první řadě dochází vzniklým napětím k překročení meze pevnosti materiálu, a ten je tak porušován. Nebo může docházet k menšímu napětí, čímž se povrch materiálu zpevňuje, ztrácí plastické vlastnosti a je více křehký, což vede také k následnému poškození. Z hlediska struktury, je obecně známý fakt, že heterogenní struktura materiálu obvykle odolává lépe tomuto druhu poškození [10].

Kvůli rozdílnosti vlastností materiálu v heterogenní struktuře nevznikají tak velké plastické deformace, často pak jedna fáze rázy tlumí a na druhé se projevuje deformace. U homogenního materiálu, kromě jeho primárních vlastností, hlavně záleží na orientaci krystalů, kdy určitá orientace může mít markantní vliv na odolnost vůči poškození kavitací oproti orientaci jiné. Okolo velikosti zrna panují rozdílné názory, ve většině případů je však potvrzeno, že jemnější struktura materiálu brání kavitaci lépe. Mikroskopický mechanismus poškození se pak dá popsat tak, že k poškozování dochází po hranicích zrn, a následně deformace postupuje do zrna, které se pak celé vylamuje. Například u perlitických ocelí je pro kavitaci výhodné zvolit oceli s vysokým obsahem uhlíku a také s legurami, které se vyskytují po hranicích zrn a společně s uhlíkem podporují vysokou odolnost vůči poškození. Vhodnými legujícími prvky je pak wolfram či molybden. Naopak u austenitických ocelí je schopnost odolávat kavitaci způsobena schopností austenitu nechat se mechanicky zpevnit plastickou deformací. Na tuto schopnost však mají ve velké míře vliv legury. Například legury ve formě manganu zpevnění podporují, naopak přísada niklu schopnost podstatným způsobem snižuje. Obsah manganu však musí být zvolen rozumně, protože zrovna v tomto případě určitě více neznamená lépe viz obr. 3, kde je vyobrazen vliv obsahu manganu na úbytek materiálu vlivem kavitace [10].



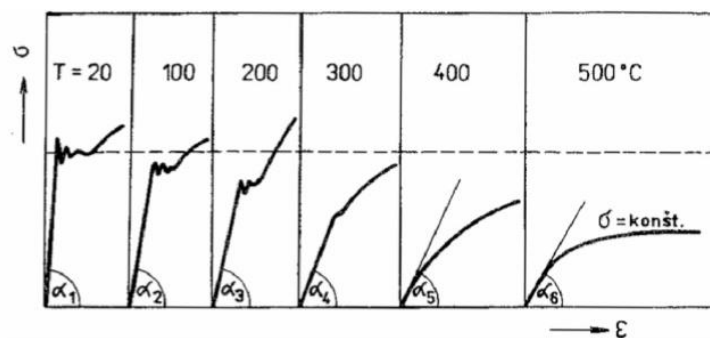
Obr. 3. Vliv manganu v austenitické oceli [10].

Vzhledem k výčtu všech problematik u kavitačního opotřebení vyvstává otázka, jak se tomuto jevu bránit. Kvůli tomu, že poškození vzniká hlavně na povrchu součásti, používají se jako ochrana různé povlaky, povrchové kalení či další mechanické zpevňování.

Povlaky bývají jak kovové, tak nekovové, na bázi kaučuku či různých druhů pryskyřic. Mechanické zpevnování je pak nejobvyklejší u austenitických ocelí. Méně používanou metodou je možnost na povrch navařit materiál s větší odolností, případně jej použít ve formě plátu [10].

4.4 Vliv creepu

Creep, neboli tečení materiálu, je způsob poškození, které se projevuje u materiálu při vysokých teplotách a působení malého napětí. Tento jev je možné pozorovat v mikrostruktuře materiálu v oblasti hranic zrn. Tečení materiálu je ve většině případů způsobeno působením vysokých teplot, jelikož většina materiálů není předurčena pro práci ve vysokých teplotách, jak lze vidět na obr. 4, kde se vlivem teploty mění chování materiálu v tahové zkoušce. Úplně například vymizí mez kluzu a snižuje se potřebné napětí, naopak se však zvětšuje poměrné prodloužení součásti. Jelikož je tato práce zaměřena na vysokoteplotní teplotěnské potrubí, je velice pravděpodobné, že se právě zde bude creep vyskytovat často, proto bude podrobně popsán v této kapitole a dalších částech práce.



Obr. 4. Vliv vysoké teploty na diagram tahové zkoušky [11].

Obecně je známo, že creep se u kovových materiálů začíná objevovat okolo teplot 40-50 % teploty tavení. Vzniká dlouhodobým působením vysoké teploty na součást a za současného působení konstantního zatížení či napětí, které však musí být menší, než je mez kluzu materiálu. Souhrnně se dá toto poškození definovat jako velmi pomalá plastická deformace za vysokých teplot [12], [13].

Některé součásti v odvětvích, jako je petrochemický, elektrárenský a jaderný průmysl, jsou opakovaně a dlouhodobě vystavovány podmínkám, které zahrnují působení sil a zároveň působení vysoké teploty. Tečení je druh deformace, která vzniká vlivem mechanického a tepelného zatížení. U krystalických materiálů je creep popisován jako difúzní tok vakancí a dislokační pohyb.

Deformační napětí je závislé na napětí, zatížení, času a teplotě. [2]

$$\varepsilon = f(\sigma)f(\varepsilon)f(t)f(T) \quad [2].$$

Tyto funkce jsou závislé na druhu creepu. Druh creepu se zjišťuje creepovými zkouškami při různých nastaveních teploty a napětí. U creepu na rozdíl od jiných poškození není viditelná žádná kluzná plocha. Creep na rozdíl od klasické plastické deformace je označen u procesů, které jsou tepelně aktivované a mají velmi nízkou rychlost deformace [2].

U technické analýzy se obvykle nejvíce zaměřuje pozornost na primární a sekundární fázi tečení. V terciální fázi se již dále a poměrně rychle šíří vzniklý problém a je velká pravděpodobnost, že v krátkém časovém horizontu dojde k nějaké poruše. Rychlost deformace v první fázi je obvykle větší než ve fázi sekundární, avšak rychlost v primární fázi klesá, zatímco v sekundární fázi je rychlost téměř konstantní. Primární fáze tečení také probíhá v kratším časovém úseku než právě sekundární [2].

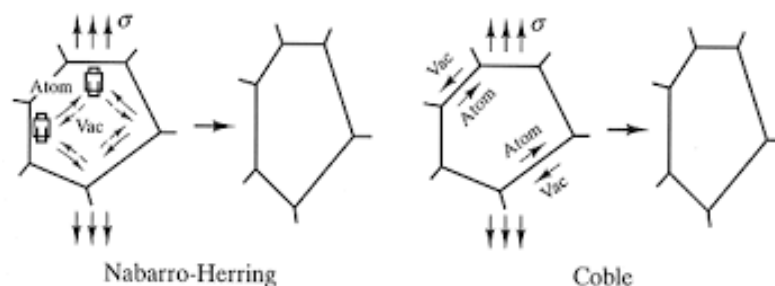
U creepu se usuzují dvě hlavní metody posuzování. Takzvané Time-hardening (časové zpevnění) a Strain-hardening (deformační zpevnění). U časového zpevnění se předpokládá, že rychlost creepové deformace závisí pouze na době od počátku creepu. Změny napětí v grafu se pak projevují skokově. Deformační zpevnění naopak předpokládá, že rychlost tečení závisí na aktuální deformaci materiálu. Vlivem deformace dochází při změně napětí v grafu k postupnému posunu [2].

V mikrostruktuře dochází vlivem creepu ke změnám struktur, pohybu dislokací a po hranicích zrn materiálu se začínají objevovat kavity či takzvané creepové trhliny. Na atomové úrovni u kovových materiálů jsou pozorovány dva hlavní druhy creepu. Jsou to difúzní a dislokační creep.

4.4.1 Difúzní creep

Mechanismus creepu difúzní je, jak již název napovídá, úzce spjat s pojmem difúze, který je jedním ze základních procesů creepu. Difúze se dá jednoduše definovat jako pohyb vakancí a iontů, atomů a molekul v materiálu, který je vyvolán pohybem sousedních částic. V makroskopickém hledisku je možné tento jev pozorovat jako deformaci. Pohyb částic je hlavně způsoben teplotou, je to tedy takzvaný tepelný pohyb.

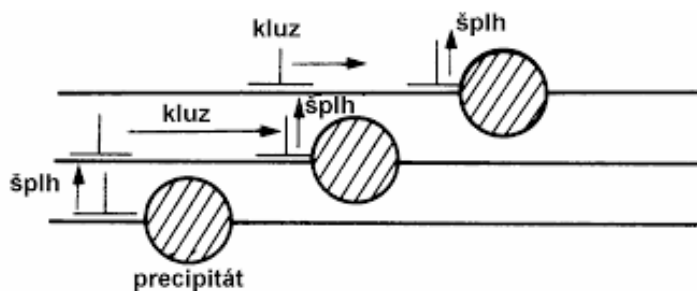
Jak je vidět na obr. 5, existují dva principy difúzního creepu, tedy Nabarro- Herringův princip a pak Cobleho princip. V případě Nabarro-Herringova principu na obrázku 5 vlevo protíná difúze hlavní zrna. K tomu dochází při vysokých teplotách, ale je potřeba nižší napětí. Dle Cobleho principu vyobrazeného na obrázku 5 vpravo difúze prostupuje hranicemi zrn, a to při nižších teplotách i napětích [12],[14].



Obr. 5. Difúzní creep [15].

4.4.2 Dislokační creep

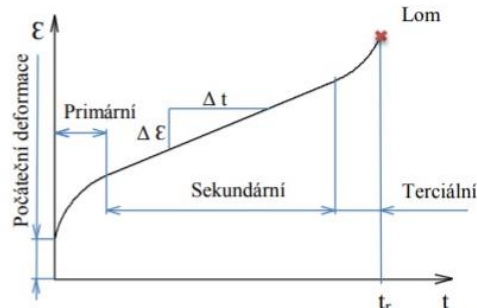
Tento způsob chování creepu je možné pozorovat výhradně u materiálů s velkými zrny při vysokých napětích. Deformace je zde charakteristická pohybem dislokací, které mají možnost buď v krystalové mřížce šplhat či se pohybovat skluzem viz obrázek 6. Schopnost pohybu i při vysokých napětích je v tomto ohledu unikátní. Síly potřebné k pohybu jsou však velké a je potřeba překonat odpor krystalové mřížky. Zároveň je také nutné dosáhnout síly potřebné k překonání překážek v mřížce, které představují precipitační prvky na hranicích zrn [12], [14].



Obr. 6. Pohyb při dislokačním creepu [16].

4.4.3 Creepový mechanismus

Chování creepového poškození v materiálu je obvykle znázorňováno takzvanou creepovou křivkou, kde jsou vyobrazeny jeho 3 hlavní stádia. Příklad creepové křivky, která bude popsána podrobněji níže, můžeme vidět na obr. 7.



Obr. 7. Creepová křivka [17].

Creepová křivka popisuje závislost deformace na čase. Schéma je složeno ze třech rozdílných úseků: primárního, sekundárního a terciálního. V úseku primárního creepu je materiál v rovnováze a rychlost creepu je velmi malá s klesající tendencí. V úseku sekundárního creepu je poměr závislosti času a deformace skoro konstantní, tedy přímý. Poslední fáze creepu je terciální fáze. V této fázi rychlost deformace vzhledem k času a předchozím hodnotám prudce naroste. Tato fáze je zakončena iniciací lomu součásti [18], [19].

4.4.4 Faktory působící na creep

Jelikož je mechanismus poškození creepem velmi spletitá záležitost, je těžké jednoznačně určit, jaký parametr má rozhodující vliv. Jako rozhodující elementy vlivu na creepové poškození jsou proto uváděny hlavně tyto:

- Pracovní teplota
- Čas působení
- Složení použitého materiálu
- Působící napětí
- Tepelné zpracování a tváření

Uvedené parametry jsou často velmi proměnné, ale v chování creepu hrají velkou roli. Pracovní teplota a čas působení jsou samozřejmě prakticky nejdůležitější parametry. Již dříve bylo experimentálně zjištěno, že i velice malé odchylky ve složení materiálu či v obsahu a rozložení vměstků velmi podstatně ovlivňují výsledné chování materiálu při tečení [18].

4.4.5 Poškození creepem ve svarech

Svar, což je druh spojení materiálů za použití tepla, podstatným způsobem ovlivňuje celou konstrukci a vlastnosti součástí. V součásti z homogenního materiálu s výbornými vlastnostmi se spojením pomocí svarů vytvářejí vruby a teplo vyzařené při tvorbě svaru neblaze ovlivňuje výchozí materiál. Svary jsou tedy konstrukčním prvkem s neblahým dopadem, avšak většinou jiný způsob spojení materiálů nepřipadá v úvahu. K výskytu creepového poškození dochází u svárů na nízkolegovaných chromových kalených ocelích, případně uhlíkových žárupevných. Na pomezí materiálu a svaru se vytvoří pásmo velmi měkkého materiálu, který je vysoce degradován. Mikrostruktura se vyznačuje překrytovanou strukturou vysoce popuštěnou. Celkově je takový materiál špatně odolný vůči plastické deformaci a creepu. Plastická deformace se v takové zóně kumuluje, roste napětí, a díky tomu se začínají objevovat kavity na hranicích zrn. Kavity se vlivem napětí vzájemně spojují, a tím se iniciuje trhlinka, která dále roste. Kvůli výskytu trhlín poté dochází k rozsáhlejšímu poškození [19].

5 Způsoby kontroly materiálů a součástí

Pro bezpečné a spolehlivé použití součástí je nutné součásti určitými způsoby pravidelně kontrolovat. K tomu slouží obor zvaný defektoskopie. Vzhledem k druhům poškození a degradaci materiálu, případně vnějším a vnitřním vadám, které se dají obvykle komplikovaně zjišťovat, existují určité způsoby, jak tyto parametry sledovat, a tím předcházet většímu poškození, či naplánovat opravu nebo výměnu daného dílu. Nejčastější vady výrobků, které se v běžné praxi vyskytují, jsou různé bublinky, vměstky, staženiny, trhliny či studené spoje. Pro sledování různých parametrů a poškození jsou samozřejmě vhodné různé způsoby kontroly, některé se však mohou použít univerzálněji. Obecně pak existují dva hlavní druhy zkoušek materiálů, tedy destruktivní a nedestruktivní. Nedestruktivní mají tu výhodu, že není nutné pro aplikaci měření a zjištění vady poškodit daný díl. Často u této metody není potřeba díl ani demontovat. Naopak u destruktivních metod jsou součásti již nenávratně poškozeny, avšak mnohdy jsou získány další důležité poznatky, například o struktuře či složení materiálu. Stručný popis, použití, výhody a nevýhody jednotlivých metod zjišťování vad materiálů a celých dílů budou popsány v následujících kapitolách.

5.1 Zkoušky nedestruktivní

Jak již bylo napsáno dříve, u nedestruktivních metod zkoušení nedojde při kontrole k jakémukoliv poškození měřeného dílu. Obecně jsou tyto metody zjišťování vad velmi přesné a některé i relativně jednoduché a v provozech často šetří i velké množství času, čímž samozřejmě i finančních prostředků, jelikož není nutné provádět demontáž jednotlivých součástí nebo je někam přesouvat.

5.1.1 Vizuální kontrola

Vizuální kontrola je jedním ze základních způsobů kontroly součástí. Součásti kontrolují pověřené osoby za použití svého zraku. Metoda bývá často využívána obvykle jako základní před všemi metodami. Do vizuální kontroly se totiž neřadí pouze pozorování okem, ale i například použití mikroskopů, endoskopů, zrcátek a podobně. Nevýhodou metody je, že se dají pozorovat pouze deformace či vady na povrchu materiálu. Za použití výše uvedených nástrojů je však možné zkontrolovat i různé dutiny či otvory. Vizuální metoda je v praxi hojně využívána [20].

5.1.2 Kontrola za pomoci ultrazvuku

Ultrazvuková metoda kontroly materiálu se v praxi používá pro hodnocení jak povrchových vad, tak hlavně vad uvnitř materiálu. Zjišťují se tak vady v materiálu, ale i ty úzce související s povrchem (např. trhliny, vměstky, porozita, neprůvody atd.). Hlavní princip této metody je takový, že ultrazvukový vysílač emituje vysokofrekvenční zvuk, který je sondou vyslán do určitého místa v materiálu. Vlny materiálem projdou, avšak od vad v materiálu jsou odraženy zpět a vyhodnocovány přijímačem. Princip bude podrobněji popsán dále. Obecně pak ultrazvukové vlny jsou vysílány v nepřetržitém proudu či jako jednotlivé impulsy. Přijímací sonda může být na stejné straně, jako je vysílač, nebo na opačné straně materiálu v závislosti na metodě měření [20], [22].

Nejčastější způsob je takový, že vyhodnocování odražených krátkodobých ultrazvukových vln vysílaných vysílačem probíhá po odrazu a zachycení přijímačem. Vysílač a přijímač jsou přitom umístěny v sondě na jedné straně materiálu, tedy nehodnotí se vlny, které materiálem projdou, ale ty, co se odrazí od překážek v materiálu [20], [22].

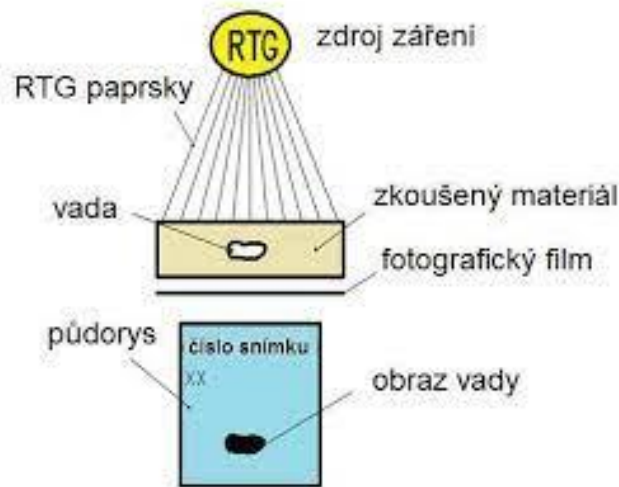
Vlny jsou generovány ve vysokofrekvenčním generátoru, odkud jsou odváděny do materiálu. Část těchto vln tvoří kmity, které na oscilografu vykazují takzvaný šum čili základní echo. Základní echo je pak ukazatelem toho, že ultrazvukové vlny vstupují do materiálu. Odrazení vln při průchodu materiálem od jeho zadní stěny a jejich zachycení přijímačem vyvolává takzvané koncové echo. U ultrazvukové metody se vady v materiálu na osciloskopu objevují jako výchylky, jelikož se od vady odrazí a vrátí se k snímači dříve než ostatní vlny. Vlny odražené od vady emitují tím pádem takzvané poruchové echo. Pokud je ultrazvukový přístroj správně nastaven, tedy rozmezí, frekvence pro materiál, je operátor schopen poměrně přesně určit hloubku, ve které se vada nachází, a i její přibližnou velikost. Při měření je přitom důležité kvůli přenosu ultrazvukových vln povrch měřeného materiálu řádně očistit a lubrikovat vazelínou, vodou či speciálním gelem. [21], [23].

5.1.3 Kontrola prozařovací RTG metodou

Kontrola prozařovací metodou s využitím RTG záření je v případě nedestruktivních metod často využívána, a to hlavně při laboratorní činnosti. Rentgenové zařízení je velmi drahé a je nutné striktně dodržovat bezpečnostní opatření z důvodu velmi nebezpečného rentgenového záření, které při používání rentgenu vzniká. Toto záření ve větším množství může způsobit porušování tkání, poškození kostní dřevě a v nejhorším případě i popáleniny a smrt. Přístroj sám o sobě musí být vůči vyzařování izolován, nejčastěji pak olověnými pláty okolo celého těla přístroje. Na základě výkonosti rentgenového přístroje je možné určit, jaký materiál, případně do jaké hloubky, může být prozářen. Metoda je velmi univerzální a nejčastěji se používá na kontroly trubek, tlakových nádob a svarů na součástech [23].

Rentgenové záření je definováno jako záření s velmi malou vlnovou délkou. Taková vlnová délka je menší než u viditelného světla. Měření pak probíhá tak, že do rentgenu za zkoumaný materiál je umístěn reakční film. Je vyvoláno rentgenové záření, které následně prochází materiálem až na film. Objevené vady v materiálu se na film promítnou jako tmavá až černá místa. U tohoto způsobu se dají vady poměrně spolehlivě analyzovat, tedy hlavně jejich rozměry, které u rentgenové metody prakticky odpovídají [23].

Schéma rentgenové analýzy včetně popisu hlavních částí je vyobrazeno na obr. 8. Pro lepší analýzu a rozeznávání rozměrů a pozice vad existují speciální měrky, které se ke snímkům přikládají. Tato měrka je vlastně sada drátů o známém průměru. Měrky se vkládají na měřený vzorek a podle toho, jaký z drátů je na daném snímku rozeznatelný, je možné usuzovat, jak velké vady se dají spolehlivě objevit. Rozeznatelnost velikosti vad podle průměru drátků se udává v procentech. U lékařského rentgenu se dá uvažovat schopnost pozorovat vady v řádech desetin milimetru, u rentgenových mikroskopů jsou to pak mikrometry [23].



Obr. 8. Schéma kontrolы vady rentgenem [23].

5.1.4 Metody kapilárních zkoušek

Tyto zkoušky materiálu jsou založeny na principu, kdy kapaliny zatékají do trhlin, ze kterých pak působením kapilárních sil vzlínají. Takto je možné pozorovat na materiálu povrchové trhliny či bodové poškození. Výhodou této metody je bezpochyby jednoduchost. Proto také není nutná velká kvalifikace osoby provádějící kontrolu. Je to jedna ze základních zkoušek, která poskytuje základní informace o součásti předtím, než se přistoupí k dalším složitějším kontrolním metodám. Jako nevýhoda se dá považovat to, že metodou je možné kontrolovat pouze povrch materiálu, případně malá hloubka pod povrchem vzhledem k hloubce trhlin. Zjišťuje se poloha trhliny, případně její velikost, avšak o vnitřním poškození části součásti žádné informace touto metodou zjistitelné nejsou [20].

Pro kapilární zkoušku jsou použity tři různé látky, které se obvykle dají koupit v celé sadě. V případě hromadné výroby při hromadných zkouškách jsou látky umístěny ve velkých nádobách, do nich jsou jednotlivé součásti ponořovány. Průběh zkoušky je takový, že se součást očistí a odmastí. Na součást se poté nanese penetrant, tedy kapalina, která by měla ulpět v trhlinách. Penetrant se nechá asi 30 minut působit, aby dobře zatekl do všech pravděpodobně se vyskytujících kapilár. Přebytečný penetrant se po 30 minutách působení očistí. Následně je na materiál nanesena látka zvaná vývojka, čímž se zvýrazní penetrant, který ulpěl ve vadách, a vady jsou tak mnohem lépe viditelné. Pro hodnocení se používá buď barevného kontrastu mezi penetrantem a vývojkou, kdy je penetrant většinou nějaké syté barvy a vývojka pak bílá, nebo je penetrant fluorescenční a hodnocení probíhá za svitu UV světla. Po provedení zkoušky je povrch součásti zase očištěn a je možné ji dále používat. Při neúplně dokonalém vyčištění může v materiálu zůstat malé procento penetrantu, tato skutečnost však v další funkci ničemu nevádí [25].

5.1.5 Metoda magnetická prášková

Tato ve svém principu velmi jednoduchá metoda je obecně vhodná spíše pro kontrolu povrchu materiálu součásti, či oblasti těsně pod povrchem, avšak ne tolik spolehlivě. Další podmínkou je to, že materiál musí být feromagnetický. Hlavní princip této metody je pak takový, že v určitém místě na povrchu materiálu se vytvoří magnetické pole, většinou je pro to zvolen elektromagnet. Elektromagnet napojený na stejnosměrný proud je využíván pro podélnou magnetizaci, kterou se zjišťují příčné vady, a u zapojení na střídavý proud je situace právě opačná, kdy se provede příčná magnetizace pro zjišťování podélných vad. Nevýhodou podélné magnetizace je to, že se materiál zmagnetizuje zkouškou permanentně a je nutné jej znovu odmagnetizovat. Magnetické pole začne rovnoměrně probíhat materiálem součásti obvykle pak příčným směrem. Materiál je následně polit či ponořen do reakční kapaliny obsahující velmi malé částičky kovu. Vlivem působení vad v materiálu vznikají v takových místech magnetické špičky, které jsou nad materiálem ve větší výšce než magnetické pole nepoškozeného materiálu. Taková místa se nazývají magnetické póly. Právě v tomto místě se uchytí magnetický prášek z reakční kapaliny, přičemž ten, který se na místech bez vad neuchytí, je odplaven pryč. Součást se následně vizuálně kontroluje, přičemž se hledají místa obsahující reakční prášek. Ten pro ulehčení bývá často vysoce citlivý na UV záření a pod takovým světlem je fluorescenční. Díky tomu je pak možné vadu lépe najít a analyzovat [21].

5.1.6 Využití replik

Metoda replik je řazena do kategorie nedestruktivních zkoušek materiálů součástí. Není tedy úplně nedestruktivní, jelikož je před odběrem nutné povrch upravit, a to nejčastěji broušením či leštěním. Takové úpravy se obecně nazývají mikroobrábění. Většinou jsou však kontrolovány tak velké součástky, že úběr materiálu ve formě broušení povrchu či leštění ve výsledku vůbec nehraje roli [26].

Touto metodou se nejčastěji kontrolují součásti z teplotárenského průmyslu. Kontroluje se potrubí, ventily, rotory turbín, lopatky, vnější tlakové skříně a další. Často se kontrolují také svary, u kterých je analyzována oblast základního materiálu, materiál svaru, přechodová oblast a v neposlední řadě pak oblast ovlivněná teplem vzniklým při svařování. Výhodou je to, že většina takto kontrolovaných dílů je zkoumána přímo v dané elektrárně bez nutnosti jakékoliv demontáže. V takových případech však některé dílce mohou být hůře dostupné [23].

Průběh měření je takový, že se povrch součásti nejdříve, jak již bylo zmíněno, obrousí a vyleští, většinou strojně. Následně je pak velmi důkladně vyčištěn a odmaštěn. Důležité je, aby při těchto operacích bylo vyvíjeno co nejméně tepla, aby nedošlo ke změnám ve struktuře materiálu. Povrch je následně leptán chemicky, případně elektrolyticky. Po této přípravě je co nejrychleji odebrán otisk neboli replika povrchu. Co nejrychleji proto, aby se materiál součásti mezitím nestačil poškodit oxidací či jinými činidly. Odebrání repliky probíhá natisknutím fólie na měřený materiál. Fólie má tloušťku okolo 0,05 mm a je vyrobena z umělé hmoty. Před měřením je změkčena změkčovadlem, aby došlo k otisku zkoumané struktury. Po odběru se replika vytvrdí pro stálost při převozu. Po otisku vznikne na replice otisk reliéfu materiálu součásti. Otisk je následně z místa odvezen do laboratoře, kde je zkoumán nejčastěji světelným mikroskopem. Pro podrobnější popis je vhodné zvolit elektronový mikroskop. Z důvodu možného poškození repliky či určitých nepřesností vlivem přesunu, realizuje se nejčastěji měření odebrané repliky mikroskopem přímo v místě a získané výsledky jsou pak později analyzovány. Hodnotí se hlavně struktura materiálu a tvar zrn, fáze materiálu, množství a velikost vměstků a dalších prvků, a nakonec přítomnost necelistvostí a kavit. [26].

5.2 Zkoušky destruktivní

U tohoto typu zkoušek pro to, aby bylo možné zjišťovat hledané parametry, je nutné ze součásti určitou část vyříznout či materiál jiným způsobem poškodit. To může být na jednu stranu nevýhoda, kdy dojde k poškození součástí a ty již nemohou být dále použity. Avšak na druhou stranu, díky destruktivním metodám, je možno získat o materiálu data, která bychom jinými, případně nedestruktivními metodami, získávali jen těžko. Taková data jsou pak pro vyhodnocování poškození či předpověď chování materiálu velmi cenná.

5.2.1 Metalografické zkoušky materiálu

Metalografie je věda, která se zabývá tím, jak vypadá vnitřní stavba materiálů. Hlavním smyslem je strukturu materiálu zvýraznit a následně mikroskopicky zkoumat. Upravený materiál se zkoumá elektronovým nebo světelným mikroskopem. Materiál je předtím nutné připravit. Tento proces se nazývá metalografický výbrus [27].

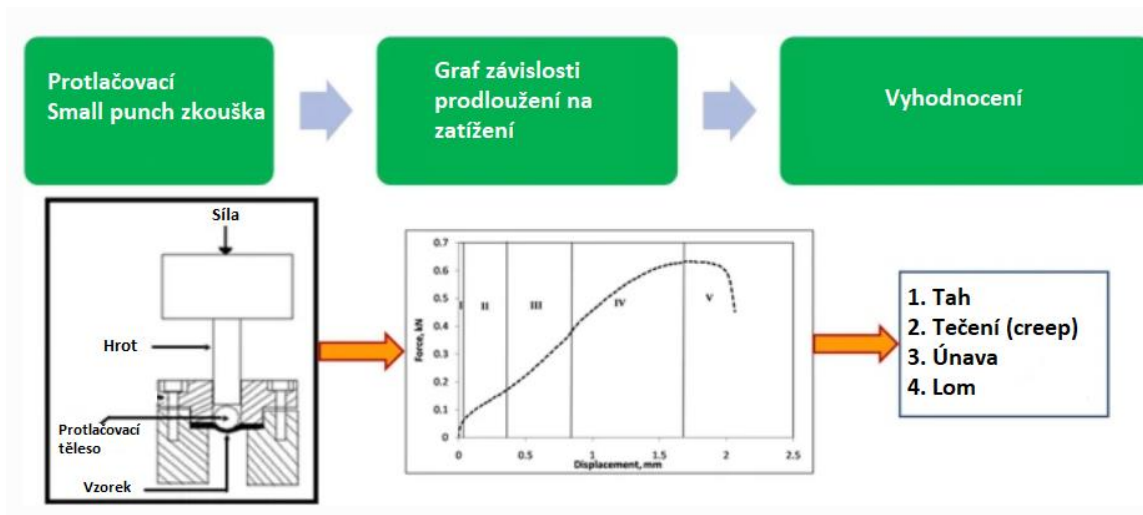
Metalografický výbrus se provádí tak, že se nejdříve z určitého místa na součásti odebere vzorek. Není neobvyklé, že bývá odebírán i z více míst současně například z důvodu tepelně ovlivněné oblasti u svaru. Vzorek musí být dostatečně vypovídající o materiálu součásti. V případě metalografické kontroly deformovaného materiálu je vzorek odebrán z místa, kde došlo k deformaci, a pak ještě z místa, kde materiál není poškozen, případně z etalon daného materiálu. Následně se pak některé vzorky mohou zatavit do plastu. Toho se využívá pro lepší manipulaci s velmi malými vzorky materiálu. Následuje broušení pozorované plochy materiálu a poté leštění. Broušení a leštění probíhá většinou ve specializovaných přístrojích pomocí brusných a leštících kotoučů s využitím abrazivních past a je možné jej provádět i ručně. Při leštění se odstraňují stopy po předchozí operaci, tedy po broušení. Je tvářena pouze vrchní vrstva a materiálový odběr je velmi malý. Pro lepší vykreslení pozorované struktury a hranic zrn je materiál před pozorováním ještě leptán leptadly. Leptáním se odstraňují z povrchově upraveného materiálu svrchní vrstvy, čímž se odkryje samotná struktura materiálu. Je možné leptat třemi způsoby, a to leptat plošně, tedy celý vzorek, a leptadlo vykreslí všechny struktury zde obsažené, nebo leptat selektivně, kdy leptadlo reaguje pouze s určitou strukturou, kterou zvýrazní změnou barvy. V neposlední řadě je to pak leptání na hranice zrn, aby došlo k zvýraznění právě zrn a bylo možné lépe určit jejich velikost či tvar. Pokud nějaký z výše popsaných dílčích bodů metalografického výbrusu bude proveden chybně, projeví se to velmi negativně na následně pozorované struktuře.

Při samotném pozorování struktury by se pozorovatel měl zaměřit hlavně na určité význačné znaky ve strukturách, které nejvíce ovlivňují materiál [27].

Takovými znaky jsou stav materiálu, tedy zda je nějak mechanicky či tepelně zpracován. Dále pak jakost a samozřejmě struktura a z jakých je složena složek. Struktura je zkoumána pomocí mikroskopů. Pozorování mikrostruktury je velmi důležitým prvkem na poli destruktivních metod zkoušení materiálu. Analýzou použitého materiálu je možné provést hodnocení vhodnosti daného materiálu pro daný výrobek, dále pak určit rozsah poškození materiálu či změny ve struktuře u již používaných součástí. Fázové složení materiálu zase dokáže predikovat vlastnosti a chování součásti v provozu, případně i chování při lomu nebo deformaci. Metalografickými zkouškami může také být zkontrolována kvalita materiálu dodávaného výrobcem [27].

5.2.2 Zkouška protlačovací

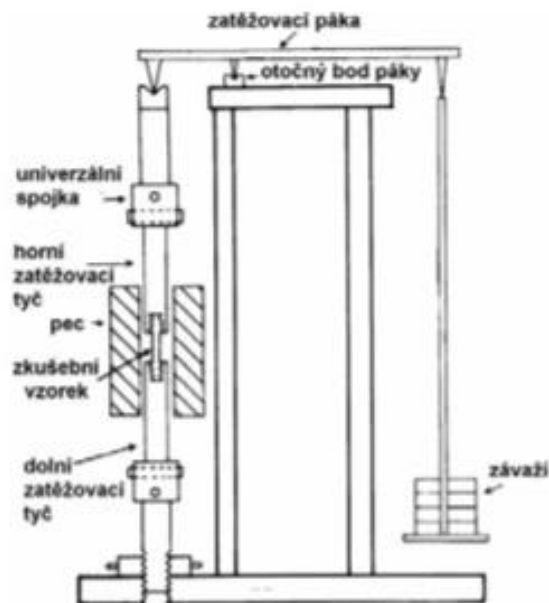
Tato metoda zkoušení materiálu, tedy zkouška protlačovací neboli penetrační zkouška, jinak také small punch test, slouží pro analýzu chování materiálu při zvýšených teplotách. Jako vzorek je použit malý kulatý disk, který je umístěn v měřicím přístroji. Na jedné straně je protlačovací těleso, na druhé pak měřený vzorek. Protlačovací těleso neboli razník tlačí na vzorek a sleduje se chování materiálu. Schéma měření je lépe vidět na obr. č. 9. Obecně existují tři různé druhy měření. Za prvé je to za konstantní rychlosti razníku, za druhé za konstantní zatěžovací síly, a nakonec za stálé deformace. Sleduje se chování materiálu při zatížení a často je měření prováděno při změněné teplotě pro analýzu chování materiálu při vyšších či nižších teplotách. Výsledkem je pak zjištění toho, zda se materiál při vysokých teplotách chová více houževnatě či jak se jinak mění jeho vlastnosti. Takových poznatků se následně využívá při konstrukci a návrhu součástí pracujících v extrémních podmínkách. Je možné vyhodnocovat, jak při zvýšených teplotách, tak při snížených, a z výsledků se dá uvažovat také pravděpodobná životnost součásti. Jak je možné dále vidět na obrázku č. 9, provede se protlačovací zkouška, ze které je následně vytvořen graf závislosti prodloužení na působící síle či napětí. V grafu se vyznačují jednotlivé zóny, ve kterých působí různé druhy namáhání, tedy tah, tečení, únava a poté poslední část, kdy dochází k samotnému lomu [28].



Obr. 9. Průběh protlačovací zkoušky – upraveno [21].

5.2.3 Creepové zkoušky materiálu

Zkoušení creepového poškození u materiálu probíhá v laboratorních podmínkách na speciálním zkušebním stroji, který je vyobrazen na obrázku č. 10.



Obr. 10. Creepový zkušební stroj [12]

Je použit zkušební vzorek velmi podobný jako u trhací zkoušky materiálu, tedy obrobena tyč o přesných rozměrech. Vzorek je upnutý mezi dvěma kleštinami, kde je osově namáhaný. Kleštiny jsou zatíženy, a tím mají tendenci se od sebe roztahovat. Zatížení vzorku je uskutečněno hydraulickým mechanismem či použitím závaží a páky. V materiálu je tak vyvoláváno tahové pnutí. Samotná zkouška následně probíhá tak, že se vzorek zatíží, a takto zatížený se nechává po určitou dobu a sleduje se chování a změny materiálu v čase. Teplota při zkoušce je také konstantní a může být snižena či zvýšena. Pokud je to potřeba, je možné zkoušku provádět i ve specifickém agresivním prostředí. Doba zatěžování je buď přesně dána technologicky, musí to však být minimálně 10 % celkové předpokládané životnosti, nebo existují další zkoušky, při kterých se materiál testuje až do úplného prasknutí. Existují dva hlavní způsoby, jak se tato zkouška provádí, a to při konstantním napětí a při konstantním zatížení. U konstantního napětí se velikost síly variabilně mění v závislosti na tom, aby bylo neustále ve vzorku udržováno stejné napětí. Zkouška je ukončena deformací, případně po určitém čase. U zkoušky s konstantním zatížením je použito závaží o určité hmotnosti, které po celou dobu zkoušky vyvolává konstantní zatížení. Napětí se přitom i vlivem zmenšování průřezu vzorku zvyšuje, čímž také podstatně roste rychlost deformace. Rozdíl mezi těmito dvěma způsoby dosahuje významných odchylek v terciální oblasti creepové křivky, která byla popsána již dříve [29], [12].

6 Materiály v energetice

Na materiály používané v tak specifickém prostředí, jako je energetika, jsou kladeny vysoké nároky. Jedná se o součásti, jako jsou vysokotlaká potrubí, kotle a podobně. Hlavním parametrem těchto součástí je pak pracovní teplota přesahující 650 °C. Z materiálového hlediska se pro tyto aplikace nejčastěji používají oceli třídy 15, jelikož na rozdíl od ostatních ocelí mají vyšší žáruvzdornost a žárupevnost. Zároveň také mají nižší mez kluzu, a to v širokém pásmu teplot. Tyto ocele vynikají také svojí vysokou korozní odolností. Tepelné zpracování se volí buď rozpouštěcí nebo stabilizační žihání [30].

Základní používané materiály jsou ocele s vysokým obsahem chromu či niklu. Nejčastějšími přísadami těchto ocelí jsou prvky jako kobalt, wolfram, vanad, molybden, titan a niob. Často se přidává dusík pro zvýšení meze kluzu a creepové odolnosti. Při volbě oceli pro tuto aplikaci se obecně volí menší obsah chromu při zvyšování podílu niklu [30].

Právě nikl totiž stabilizuje austenit a zamezuje nukleaci nežádoucího feritu. Pokud by se struktura transformovala na feritickou, hrozilo by velké nebezpečí vzniku karbidů Cr₂₃C₆. Tyto karbidy působením dlouhodobého zatížení vylučují chrom, čímž podporují možnost vzniku alfa fáze. Následně pak právě z důvodu vzniku alfa fáze v austenitickém materiálu dochází k razantnímu snížení houževnatosti. Proti vylučování karbidů chromu po hranicích zrn v materiálu působí prvky jako titan a niob. Tento jev se označuje jako stabilizace. Tyto prvky zároveň podstatně vylepšují pevnost materiálu při creepu, a to tak, že jsou tvořeny intersticiální prvky nebo u nich dochází k nukleaci tvrdých karbidů a nitridů titanu v dislokacích. Další zlepšení odolnosti vůči tvorbě karbidů Cr₂₃C₆ je možné docílit přidávkem bóru. Bór se v materiálu vyskytuje v oblasti hranice zrna, díky čemuž zde může zabraňovat difuzi a pokluzům zrn a zároveň také zpomaluje tvorbu karbidů. Snížením difúze a pokluzů v materiálu se zákonitě zlepšuje odolnost vůči creepovému poškození. Velkou nevýhodou legury bóru je však podstatné zhoršení svařitelnosti materiálu [30], [31].

6.1 Trendy u materiálů pro energetiku

Odvětví energetiky se v současné době mění vzhledem ke snaze snižovat vstupní parametry pro výrobu jednotky energie. U elektráren je trend zvyšování teplot médií, a tím zvýšení celkové účinnosti zařízení, díky čemuž je pak snížena zátěž na životní prostředí. Zvětšením teplot médií jsou však kladeny větší požadavky na materiály součástí, kterými tato média procházejí. Mezi hlavní požadavky na materiál se pak zařazuje zvýšení meze pevnosti při tečení za tepla a zlepšení odolnosti proti korozi při vysokých teplotách při zachování vyrobiteľnosti a spolehlivosti. Mezi jedny z vhodných materiálů patří oceli mikrolegované na základě vanadu a niobu. Dalšími používanými materiály jsou pak obecně žárupevné oceli třídy 15. Jedním z nejvíce využívaných materiálů v současné době je chromová ocel P91 pro své výborné vlastnosti v oblasti vysokých teplot. Ocel P91 (EN 1.4903, X10CrMoVNb9) patří mezi feritické oceli s 1 % molybdenu a 9 % chromu. Díky klíčovým vlastnostem oceli P91, jako jsou žárupevnost, teplotní vodivost, nízká teplotní roztažnost, vysoká odolnost vůči korozi i v agresivním prostředí. I díky dobré dostupnosti proto bývá často zvolena. V mnoha případech je možné vlivem zvolené tohoto materiálu i částečně pozměnit konstrukci a zvolit například menší šířky stěn při zachování či zlepšení vlastností celé součásti. [30], [32].

7 Vzorky k praktické části

Pro praktickou část této práce byl na několik částí rozdělen velký vzorek, což byla část používaného parovodu PK 15 pocházejícího z tepelné elektrárny, u které bylo pozorováno poškození, tedy trhlinka. Zkušební těleso bylo tvořeno reálným vzorkem, který pracoval při teplotě 540 °C a při tlaku 17,5 MPa po dobu provozu zhruba 271 138 hodin. Cílem práce je ověření výskytu creepového poškození v materiálu, případně dalších možných příčin trhlin a defektů. Možné defekty se přitom očekávají v oblasti hranice svaru a základního materiálu, respektive tepelně ovlivněné oblasti nebo přímo ve svaru. Vzorek byl za účelem analýzy rozdělen na 5 menších částí označených písmeny A-E. Vzorek A má rozměry (délka x výška x šířka) 87x60x38, vzorek B: 88x52x18, vzorek C: 112x70x32, vzorek D: 89x60x11 a vzorek E: 89x60x15.

Vzorky zkoumané v této práci jsou z kotlové oceli dle normy ČSN 15 128, dle EN pak 1.7715. Jiné značení oceli je pak 14MoV6. Jedná se o chrom molybden vanadovou ocel pro použití za vyšších teplot a tlaků. Ocel je žárupevná při pracovních teplotách maximálně do 580 °C. Je vhodná pro svařování, svařitelnost je však podmíněná. Největší využití tohoto materiálu je v chemickém průmyslu a v energetice. Chemické složení materiálu dle katalogové normy je uvedeno v tabulce č. 1 níže:

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Al	Sn	Sb	As
0,1-0,18	max 0,4	0,4-0,7	max 0,025	max 0,015	0,3-0,6	0,5-0,7	0,22-0,28	max 0,02	max 0,025	max 0,001	max 0,002

Tab. 1. Tabulkové chemické složení 1.7715 [33].

Mez pevnosti materiálu se pohybuje v rozmezí 460-610 [MPa]. Mez kluzu je minimálně 300 MPa. Nárazová práce dosahuje v obou směrech, tedy podélně i napříč, hodnoty 27 J. Tažnost materiálu je až 20 %. Materiál je možné získat ve stavu normalizačně žíhaném či zušlechtěném ve formě tyčí nebo trubek. Vzhledem k charakteru této práce a použití materiálu 14MoV6 jsou v tabulkách 2 a 3 níže uvedeny hodnoty meze kluzu za zvýšených teplot a také odolnost proti creepovému poškození [33].

Teplota	100°C	150°C	200°C	250°C	300°C	350°C	400°C	450°C	500°C	550°C	600°C
Mez kluzu [Mpa]	282	276	267	241	225	216	209	203	200	195	164

Tab. 2. Minimální mez kluzu při dané teplotě [33].

Jak je patrné z tabulky 2, zvyšující se teplota podstatným způsobem snižuje mez kluzu, což se výrazným způsobem projeví na chování materiálu při provozu za vysokých teplot a dalších zvýšených parametřů, jako je například tlak páry.

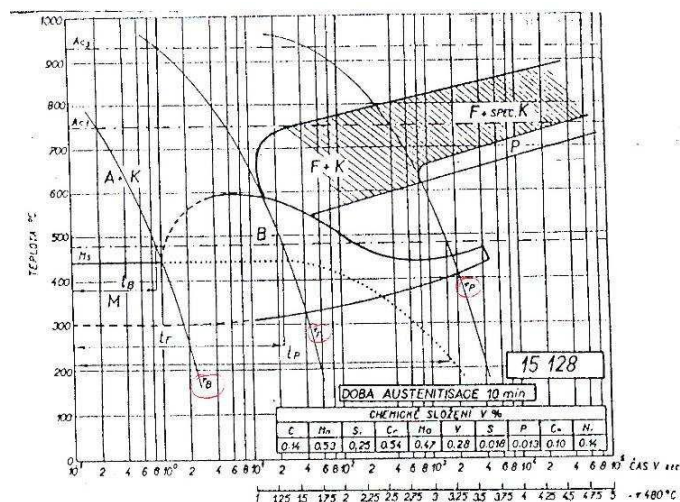
Další uvedenou tabulkou jsou hodnoty meze pevnosti tečení v čase v tab. 3.

Teplota		450°C	460°C	480°C	500°C	520°C	540°C	560°C
Mez pevnosti při tečení v čase:	$R_{mT}/10^4 \text{ h [MPa]}$	380	353	304	257	212	170	133
	$R_{mT}/10^5 \text{ h [MPa]}$	321	294	242	193	149	113	86

Tab. 3. Minimální normované meze pevnosti při tečení [33].

Z tab. 3., meze pevnosti při tečení, je možné vyčíst minimální mez pevnosti při tečení po uplynutí určitého času. Tato hodnota reprezentuje minimální napětí, které po uplynutí uvedené doby při určité teplotě způsobí lom [34].

Na obr. 11. je pro daný materiál EN 1.7715 uveden diagram ARA, tedy anizotermický rozpad austenitu. V tomto grafu jsou nejvíce viditelné změny struktur při ochlazování austenitu z teplot nad A_1 . Podstatné zde jsou změny struktur na martenzit, bainit a perlit, které jsou velmi důležité v případě svařování. Je možné pak lépe odhadnout změnu struktur ve svaru a v tepelně ovlivněné oblasti. Tím se dá lépe usuzovat následné chování svaru, a určovat tak lepší svařovací postupy a parametry pro co nejlepší vlastnosti celé součásti [35].



Obr. 11. ARA diagram 15 128 [35].

7.1 Měření tvrdosti

Na zkoumaném vzorku z materiálu ČSN 15 128 byla také v několika místech změřena tvrdost metodou HV10 (dle normy ČSN EN ISO 9015-1), tedy metodou podle Vickerse s hodnotou zatížení 10 kg odpovídající přibližně zatížení 98 N. Tvrdost byla měřena ve třech místech, v oblasti svaru, v blízkosti svaru v tepelně ovlivněné oblasti a v základním materiálu. Dále pak bylo měření provedeno v oblasti paty a kořene svaru. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. č.4.

	Oblast svaru	Tepelně ovlivněná oblast	Základní materiál
Oblast paty svaru	257± 5,9	253± 6,2	154± 2,5
Oblast kořene svaru	229± 5,1	255± 6,3	155± 3,5

Tab. 4. Tvrdost materiálu v daných místech vzorku

Tvrdost HV podle tabulkových hodnot se pohybuje v rozmezí 145-190, naměřené hodnoty v oblasti základního materiálu jsou tedy sice na spodní hranici, avšak vyhovují materiálové normě. V oblasti svaru a v tepelně ovlivněné oblasti je dle očekávání tvrdost vzorků podstatně vyšší, v oblasti paty svaru řádově o 100 jednotek. V oblasti kořene svaru je to v tepelně ovlivněné oblasti o 100 a přímo ve svaru o 74 jednotek. Razantní skok v hodnotách tvrdosti v oblasti svaru je způsoben pravděpodobně změnou struktury v tepelně ovlivněné oblasti a tvrdých fází na povrchu svaru. Uvedená ocel však patří do ocelí označovaných, že mají technologicky zaručenou podmíněnou svařitelnost. Obvykle to bývají oceli do 0,22 % uhlíku. U takových je pak pro vznik nevhodných tvrdých struktur menší pravděpodobnost. Za nevhodné struktury je přitom považována Widmannstättenova struktura, kde jsou v perlitu výrazné jehlice feritu či nerovnovážná struktura martenzit, která je tvrdá a křehká, díky čemuž může docházet ke vzniku trhlin a prasklin.

Tvrdost v oblasti svaru by měla také kontrolovat a nepřekročit určitou danou mez dle normy. Materiál ČSN 015 128 je dle normy TRI/ISO 15608 [36] zařazen do třídy 6.1. Maximální tvrdost svaru HV10 dle normy ČSN EN ISO 15614-1 [37] pro materiály třídy 6.1 má maximální hodnotu tvrdosti dle Vickerse 380. Dle naměřených hodnot v oblasti svaru a tepelně ovlivněné oblasti tato tvrdost odpovídá rozmezí uvedenému v normě.

7.2 Chemické složení

Analýza chemického složení vzorků pro tuto práci byla provedena metodou GDOS. To je zkratka pro optickou emisní spektrometrii v doutnavém výboji, obecně známá jako optická atomová emisní spektrometrie. Jedná se o jednu z nejběžnějších metod používaných pro přímou analýzu chemického složení z pevného vzorku. Podmínkou je, aby na vzorku byla rovná ploška o rozměru alespoň v řádu několika mm. Vzorek se musí umístit ke zdroji, tedy k takzvané Grimmově výbojce. Výbojka se napouští pracovním plynem na vysoký tlak. Obvykle je použit argon. Následně se zapojí na vysoké napětí o hodnotách 750-1200 V.

Uvnitř výbojky vzniká doutnavý výboj. Emitují se těžké ionty pracovního plynu a jsou urychlovány na povrch vzorku. Ionty vyrážejí atomy původního materiálu a vlivem srážek s elektrony emitují určité záření. Toto určité specifické spektrum záření se následně pozoruje a vyhodnocuje spektrometrem [38].

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Al
Doporučené hodnoty	0,1-0,18	max 0,4	0,4-0,7	max 0,025	max 0,015	0,3-0,6	0,5-0,7	0,22-0,28	max 0,02
Naměřené hodnoty	0,18±0,01	0,26±0,01	0,56±0,01	0,017±0,001	0,025±0,001	0,69±0,004	0,45±0,01	0,26±0,004	0,01

Tab. 5. Naměřené chemické složení oceli ČSN 15 128

Optickou emisní spektrometrií byly naměřeny v základním materiálu hodnoty obsahu jednotlivých prvků, jak je možné vidět v tab. 5. Oproti hodnotám v materiálové normě jsou tu určité odchylky, jinak však většina prvků spadá do uvedených rozmezí. Síry bylo naměřeno větší množství, než norma připouští, konkrétně o 0,01. Posledním prvkem, u kterého bylo pozorováno větší než povolené množství, bylo u chromu, kde se jednalo o překročení maxima o 0,09. U molybdenu bylo naopak zjištěno menší množství a to o 0,05.

7.3 Degradční procesy materiálu ČSN 15 128

Obecně u materiálů, jako je ocel, tak za vysokých teplot je obvykle degradace vyvolána změnami ve struktuře. Tyto změny způsobující strukturní nestabilitu se významným způsobem podílejí na celkové provozní spolehlivosti součástí [39].

Za strukturní nestabilitu je obvykle považována postupná degradace struktury. V rámci změn jsou při degradaci žárupevných ocelí nejčastěji pozorovány poklesy hustoty dislokací, rozpouštění metastabilních fází a také se často podstatným způsobem zmenšuje plocha hranic zrn. Dále dochází k hrubnutí částic a rozpouštění jemných karbonitridů [39].

Kvůli hrubnutí částic v materiálu se podstatným způsobem snižuje vliv předchozího precipitačního zpevnění, jelikož jsou rozpouštěny právě jemné precipitáty [39].

Jedním z degračních mechanismů materiálu je jeho zkřehnutí. To je způsobeno zpravidla výskytem interkrystalických lomů, jež probíhají po hranicích zrn materiálu. V tomto případě feritických a austenitických zrn. Jiný druh zkřehnutí materiálu, který je možné pozorovat u žárupevných ocelí, je pak takzvané karbidické zkřehnutí. Tento druh degradace je způsoben hrubnutím karbidických fází, hlavně pak $M_{23}C_6$ a M_7C_3 . Uvedené karbidy mohou v mnoha případech také určitým způsobem negativně interagovat s maticí materiálu [39].

Tyto interakce se pak následně projeví změnami v lokálním zpevnění, a tím větší pravděpodobnosti karbidického zkřehnutí. Lokální karbidické zkřehnutí má pak majoritní vliv na snížení celkové tvrdosti a meze kluzu [34].

Dalším častým typem zkřehnutí je popouštěcí křehkost. Popouštěcí křehkost je vyvolána vylučováním atomů hlavně u prvků, které nejvíce působí na povrchu materiálu. U žárupevných ocelí je to hlavně vlivem fosforu a cínu. Velký vliv má také hrubé austenitické zrno materiálu. Fosfor v materiálu se kumuluje v oblasti hranic zrn, kde tím snižuje celkovou soudržnost. Naopak síra v materiálu se váže na mangan a tvoří s ním sulfidy MnS . Při pracovní teplotě žárupevných ocelí může u síry docházet k tomu, že její přebytečný obsah se vylučuje ve formě velmi jemných sulfidů MnS na hranicích zrn austenitu. Proto, aby se co nejvíce zamezilo možnosti zkřehnutí žárupevných ocelí, je trend snižovat množství síry, cínu a fosforu. Kromě tohoto snižování obsahu určitých prvků je také varianta, že se úmyslně do materiálu dodávají prvky, které potlačují vliv takových nečistot. Jsou to prvky, jako je bór a molybden [34].

Je důležité podotknout, že degradační procesy jsou často ovlivněny některými konstrukčními prvky, které základní materiál tepelně či mechanicky podstatným způsobem ovlivňují. V případě této práce a použití materiálu na vysokotlaké potrubí se jedná o konstrukční prvek svar. Obvykle materiál může být sebelepší kvality a čistoty, avšak konstrukce je závislá právě na nejslabším článku. To je v tomto případě svar z důvodů tepelně ovlivněné oblasti či vad v oblasti svaru. Za vady v oblasti svaru nejčastěji považujeme výrobní vady svarových housenek, jako jsou převýšení či přesazení.

Další svarové vady, které se často vyskytují, jsou určité trhlinky či heterogenity, mezi něž se řadí vměstky, řediny a bublinky. Kromě oblasti svaru se však vady vyskytují i v místě velmi blízko okolo svaru, tedy v takzvané tepelně ovlivněné oblasti svaru, či na hranici přechodu svaru a základního materiálu. Zde se objevují strukturní vady, jako jsou rozdílné velikosti zrn či další nehomogenity.

7.4 Výpočet faktorů čistoty materiálu

Velký vliv u ocelí žárupevných, jejichž provozní teploty dosahují vysokých hodnot, má metalurgická čistota. Vlivem nečistot dochází obvykle k migraci substitučních prvků do oblasti hranic zrn, čímž se snižuje v této oblasti pevnost a zvyšuje se pravděpodobnost křehkého poškození. Pro analýzu čistoty materiálu se vypočítává z obsahu vybraných prvků několik faktorů, které následně vyjadřují náchylnost materiálu ke vzniku poškození. Faktory materiálu pro účel této práce byly zvoleny na základě tabulkových hodnot z normy materiálu [40].

7.4.1 CEF

Faktor CEF je zkratka pro kritérium náchylnosti materiálu ke zkřehnutí při dlouhodobém provozu při zvýšených teplotách, v angličtině pak Creep Embrittlement Factor. Tento faktor je vyjádřen pomocí obsahu některých aktivních prvků na povrchu materiálu [40].

$$CEF = P + (8,16\% \cdot Sb) + (3,57\% \cdot Sn) + (2,43\% \cdot Sn) \quad [40].$$

$$CEF = 0,0025 + (8,16 \cdot 0,001) + (3,57 \cdot 0,025) + (2,43 \cdot 0,002)$$

$$\underline{\underline{CEF = 0,12727 [-]}}$$

7.4.2 Bruscattův faktor

Tento faktor se zaměřuje na vlastnosti určitých prvků, které prokazatelně vedou ke snižování creepové tažnosti. Prvky, na které se zpravidla výpočet tohoto faktoru zaměřuje, jsou síra, cín, antimon a arsen [40].

$$X = [(10.P) + (5.Sb) + (4.Sn) + As].100 \quad [40].$$
$$X = [(10.0,025) + (5.0,001) + (4.0,025) + 0,002].100$$
$$\underline{X = 35,7[ppm]}$$

7.4.3 J faktor.

Vypočítávaný J, respektive J* faktor, nemá žádný rozměr. Vyjadřuje se jím míra citlivosti oceli na popouštěcí křehkost, která může vznikat v materiálu vlivem působení vysokých teplot. Faktor se vypočítává na základě vztahu hmotnostního procenta určitých prvků.

Pro chrom molybdenové oceli je stanovena hranice pro nízkou až zanedbatelnou citlivost na popouštěcí křehkost na hodnotě 100. [40].

J faktor:

$$J = [(Mn + Si). (P + Sn)]. 10^4 \quad [40].$$
$$J = [(0,5 + 0,4). (0,025 + 0,025)]. 10^4$$
$$\underline{J = 450 [-]}.$$

J* faktor:

$$J^* = [(Mn + Si). (P + Sn + Sb)]. 10^4 \quad [40].$$
$$J^* = [(0,5 + 0,4). (0,025 + 0,025)]. 10^4$$
$$\underline{J^* = 459 [-]}.$$

Pro lepší orientaci jsou v tab. č. 6 níže zaznamenány přehledně vypočtené hodnoty včetně jejich limitních hodnot pro ideální vlastnosti materiálu.

Materiálové faktory	CEF	X	J	J*
Limitní hodnota faktoru	0,15	15	150	150
Výsledek	0,127	35,7	450	459

Tab. 6. Vypočtené hodnoty materiálových faktorů

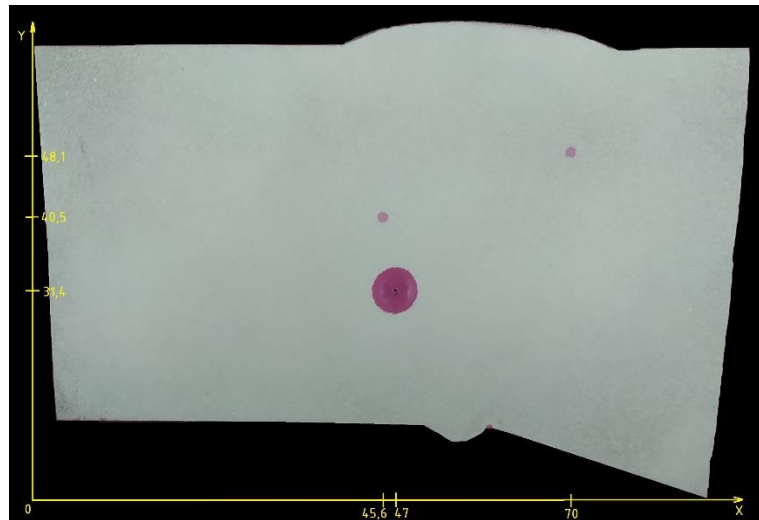
Hodnota CEF, tedy faktor náchylnosti ke zkřehnutí, v tomto případě vyšel s hodnotou 0,127. Dle tabulkových hodnot pro faktor CEF je hranice pro maximální hodnotu u ocelí s vysokou metalurgickou kvalitou 0,15. Výsledná hodnota spadá do tohoto rozmezí, z čehož se dá uvažovat vysoká metalurgická čistota. U faktorů X, J a J* je snaha u výsledků dosahovat co nejnižších hodnot výsledků, jelikož nižší výsledné číslo představuje vyšší čistotu materiálu, a tím vysokou žárupevnost a zaručené mechanické vlastnosti. Pro vysokou čistotu by hodnota X měla být menší než 15 a u hodnoty J, respektive J* menší než 150. Tato rozmezí, jak je patrné z tab. č. 6, byly v obou případech překročeny, z čehož se tedy dá uvažovat snížená čistota materiálu oceli, a tím vyšší pravděpodobnost vzniku křehkosti a zhoršení vlastností materiálu v čase při dlouhodobějším působení vysokých teplot.

8 Kapilární zkouška

Kapilární zkouška je jednou z nedestruktivních metod zkoušení materiálu a používá se ke zjišťování vad na povrchu součástí. Je to velmi jednoduchá, spolehlivá a také poměrně levná zkouška. V této práci byla kapilární zkouška provedena na třech vzorcích konkrétně A, B a C.

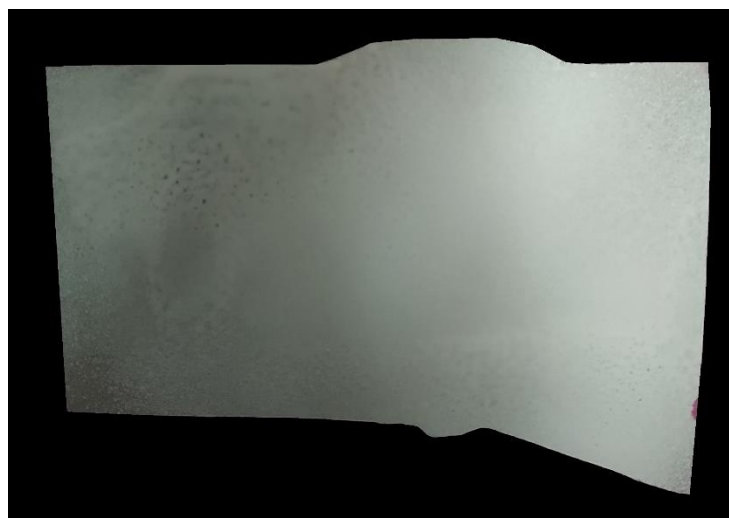
Sada na zkoušení kapilární metodou se skládá ze tří látek pro jednotlivé etapy, jež budou popsány dále. Princip zkoušky je takový, že nejdříve se zkoumaný povrch pečlivě očistí od nečistot a mastnoty. K tomu je využíván přípravek označovaný jako „čistič“, v tomto případě se jedná o Pfínder 890 cleaner. Po vyčištění povrchu a jeho osušení přichází druhá etapa zkoušky, kdy se na materiál nanese penetrant. Penetrant se rovnoměrně nanese na povrch a dojde k jeho proniknutí do případných dutin a vad. V tomto případě byl použit vodou omyvatelný penetrant pro barevnou zkoušku červené barvy. Po nanesení penetrantu se přebytečná látka z povrchu opatrně opláchně, v tomto případě vodou. Vzorek se nechá oschnout. V poslední etapě se na povrch zkoušeného vzorku nanese kontrastní vývojka. Zde byla použita látka Pfínder 871 developer bílé barvy. Penetrant začne následně z vad v materiálu vzlínat a na vývojce zobrazí indikační oblast. Po analýze vzorku se materiál opět pomocí čističe omyje od testovacích látek. Jednotlivé vady objevené touto metodou budou podrobněji zkoumány v části věnované metalografii.

Jeden ze vzorků, tedy vzorek A, který byl pro tuto práci analyzovaný kapilární zkouškou, jejíž výsledek je možné vidět na obr. č. 12. níže.



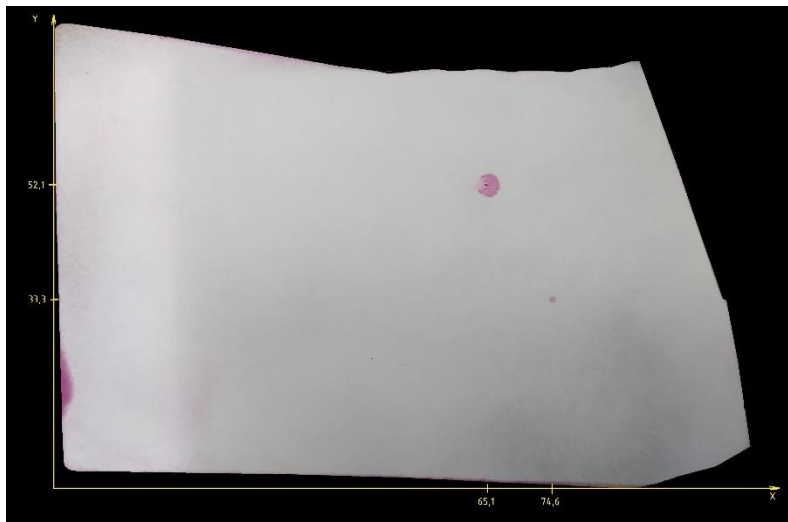
Obr. 12. Vzorek A kapilární zkouška, zdroj: vlastní.

Z obrázku je patrné, že na vzorku byly zjištěny prokazatelně celkem 3 vady, a to dvě menší a jedna větší vlevo dole. Indikace se podle předpokladů objevují v oblasti hranice svaru a přechodu do tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu. Kapilární metoda tyto vady objevila spolehlivě. Metoda má však tu nevýhodu, že je možné podle ní zjistit přesně jen pozici vady, avšak velikost vady, ostatně jako v tomto případě, je poměrně zkreslená množstvím vyloučeného penetrantu. Na obr. 12 jsou pro lepší představu uvedeny osy s pozicí jednotlivých vad vzhledem ke vzdálenosti od počátečního bodu.



Obr. 13. Vzorek B kapilární zkouška, zdroj: vlastní

Provedená zkouška u vzorku B, jak je patrné z obr. 13, není vypovídající, jelikož zde touto metodou nebylo možné objevit žádnou významnou vadu. To může být způsobeno charakterem vady, které nemusí mít nutně dostatečnou hloubku pro to, aby se v ní mohl držet penetrant nebo jinými důvody.



Obr. 14. Vzorek C kapilární zkouška, zdroj: vlastní

U posledního vzorku označeného jako C viz obr. 14, byl kapilární metodou potvrzen výskyt dvou vad. Vady se zde vyskytují přímo v oblasti svaru. Rozdíl od předcházejících dvou součástí je ten, že u tohoto vzorku sledována oblast, která byla někdy dříve opravovaná, tedy zde máme několik svarových housenek navrstvených na sobě v určité šířce. Oblast s opravovaným místem je v tomto případě možné vidět od pravé strany, zleva je základní materiál. Jako v předchozím případě je velikost vady opět velmi zkreslená, je tedy možné spolehlivě určit pouze polohu vady v materiálu. Celkově je však metoda přes svou jednoduchost velmi účelná, uživatelsky přívětivá a zároveň také velmi levná.

Vady na vybraných vzorcích objevené při použití kapilární metody budou následně dále zkoumány v kapitole věnované metalografii, kde bude proveden jejich přesnější rozbor.

9 Hodnocení vad

Pro účel této práce byly vzorky nejdříve zkontrolovány ultrazvukovou metodou za účelem detekce vad. Kontrola byla provedena za použití ultrazvukové techniky phased array. Pro měření vzorků ultrazvukovou metodou bylo použito zařízení Dynaray 128/128 PR. Toto zařízení nejčastěji pro měření využívá sondy s velkými rozsahy či sondy nízkofrekvenční se složitými geometriemi. Při měření se může jednoduše pracovat se změnami ohniskových vzdáleností. Rozsah frekvencí sond se pohybuje v rozmezí 0,5 MHz až 20 MHz. Pro kontrolu vzorků v této práci byla využita lineární sonda PA AM10 osazená klínem s jmenovitým úhlem 55°. Pozice sondy je vždy na obrázcích označena šipkou. Při měření bylo využito sektorové skenování s rozpětím úhlů 40-75°. Následně byl v místě indikace proveden řez a výbrus za účelem potvrzení výskytu vady v materiálu. Výbrus byl zkoumán mikroskopicky a vady včetně jejich poloh byly zaznamenány.

Pro hodnocení vad v materiálu, a tím určování zbytkové životnosti součástí v teplem průmyslu, které pracují za vysokých teplot, se využívá mnoho metod pro určování a kvantifikaci rozsahu poškození creepem či kavitami. Pro zpřesnění a normalizaci tohoto hodnocení se uplatňuje v současné době mezinárodně schválená stupnice poškození (viz tab 7.) [41].

Třída poškození	Popis poškození
0	Nový materiál, bez poškození
1	Materiál vystavený creepovému poškození, bez kavit
2a	Samostatné izolované kavity
2b	Větší množství kavit bez přednostní orientace
3a	Větší množství kavit s přednostní orientací
3b	Řetězce kavit či oddělené hranice zrn
4	Mikrotrhliny
5	Makrotrhliny

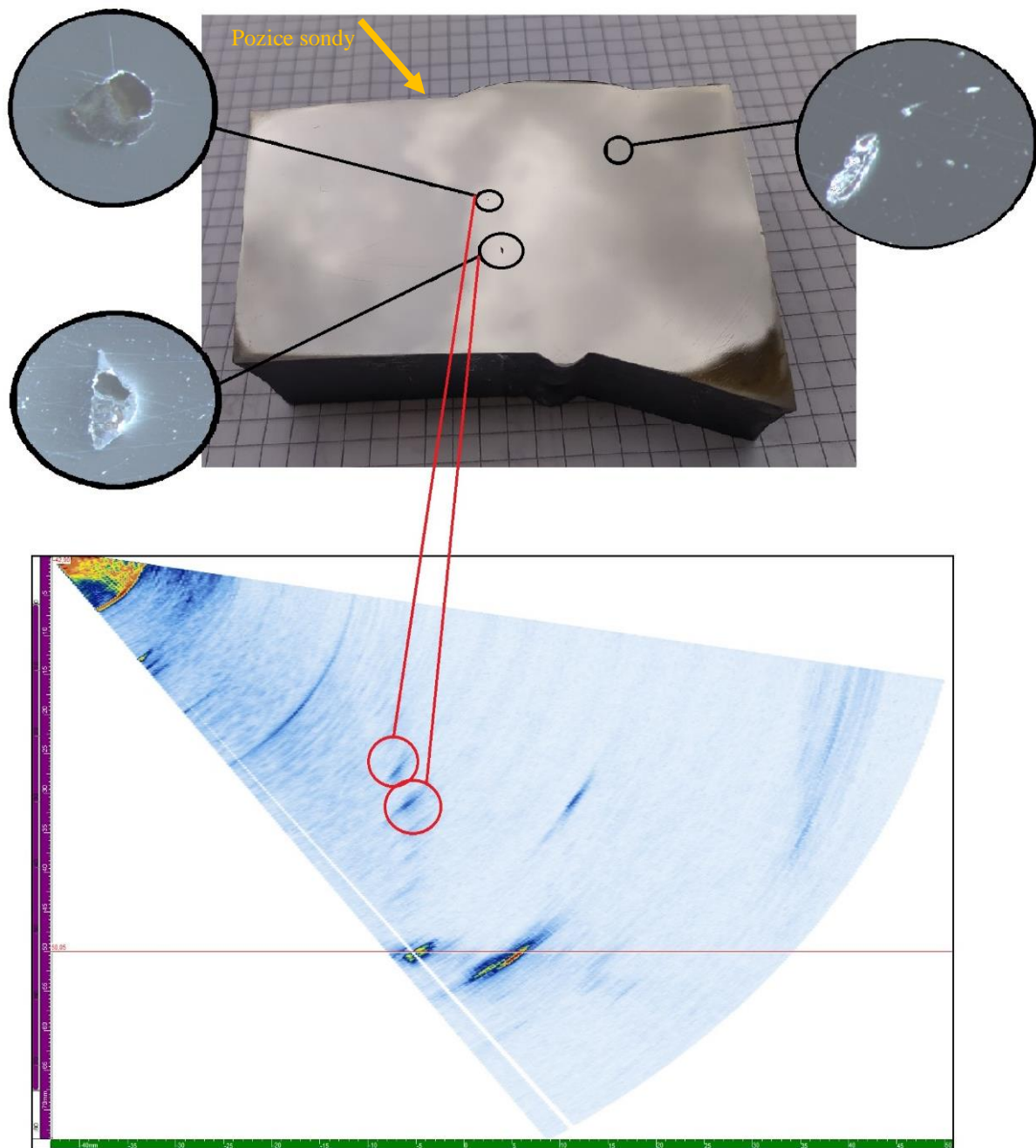
Tab. 7. Neubauerovy třídy poškození [41].

Pro hodnocení poškození je využívána německá směrnice, tedy etalon, který obsahuje referenční snímky a dělí poškození u nejvíce používaných žárupevných ocelí do několika tříd poškození. Tento etalon se označuje jako Neubauerovy třídy poškození dle VGB TW-507. Jednotlivé třídy poškození dle VGB TW 507 s krátkými popisy můžete vidět v tab. č. 7.

Jako systém hodnocení vad v tepelných elektrárnách se nejčastěji využívá třístupňový přístup. V každé fázi tohoto přístupu se s určitou přesností určuje zbytková životnost a doporučený servisní interval. První fáze, která se považuje za analytickou, se zabývá primárně obecnými výpočty a možnostmi degradace na základě provozních podmínek tepelné elektrárny. Výpočty jsou prováděny s přihlédnutím na provozní historii zařízení, tedy kontroly, zaznamenané poruchy a opravy a dle záznamů o údržbě a odstávkách. Zaměřuje se hlavně na tvar součásti, vlastnosti materiálu, počet provozních hodin a pak také na provozní parametry, jako je pracovní teplota a tlak. Tato fáze není v určování životnosti tak moc přesná. V druhé fázi tohoto přístupu je kladen důraz na metody nedestruktivního testování součástí. To vede k zpřesnění určení životnosti. Nedestruktivní zkoušky přitom nezpůsobují zastavení provozu a jsou v určení vad poměrně přesné. Mezi nedestruktivní metody, které se objevují v této fázi, se řadí vizuální kontrola pro sledování geometrických nepřesností komponent či potenciálně nebezpečných míst určených ve fázi 1. Dále se provádí kapilární zkouška a ultrazvukové šetření za účelem nalezení možných trhlin. Poslední metoda používaná v této fázi je metoda replik, která díky analýze struktury materiálu na povrchu a pravděpodobného výskytu kavit také podstatným způsobem, bez větších zásahů do součástí, dokáže zpřesnit určování zbytkové životnosti. Ve třetí a poslední fázi přichází na řadu podrobné testování zahrnující destruktivní metody, jako je například metalografický výbrus. Často bývá také podrobně analyzováno oběžné médium, u tepelných elektráren tedy pára. Tato fáze má tu nevýhodu, že je nutné přerušit provoz elektrárny a také zničit některé součásti za účelem získání vzorků. Oproti tomu jsou v této fázi však získána nejpřesnější data a zbytková životnost je zde také určena nejpřesněji [42].

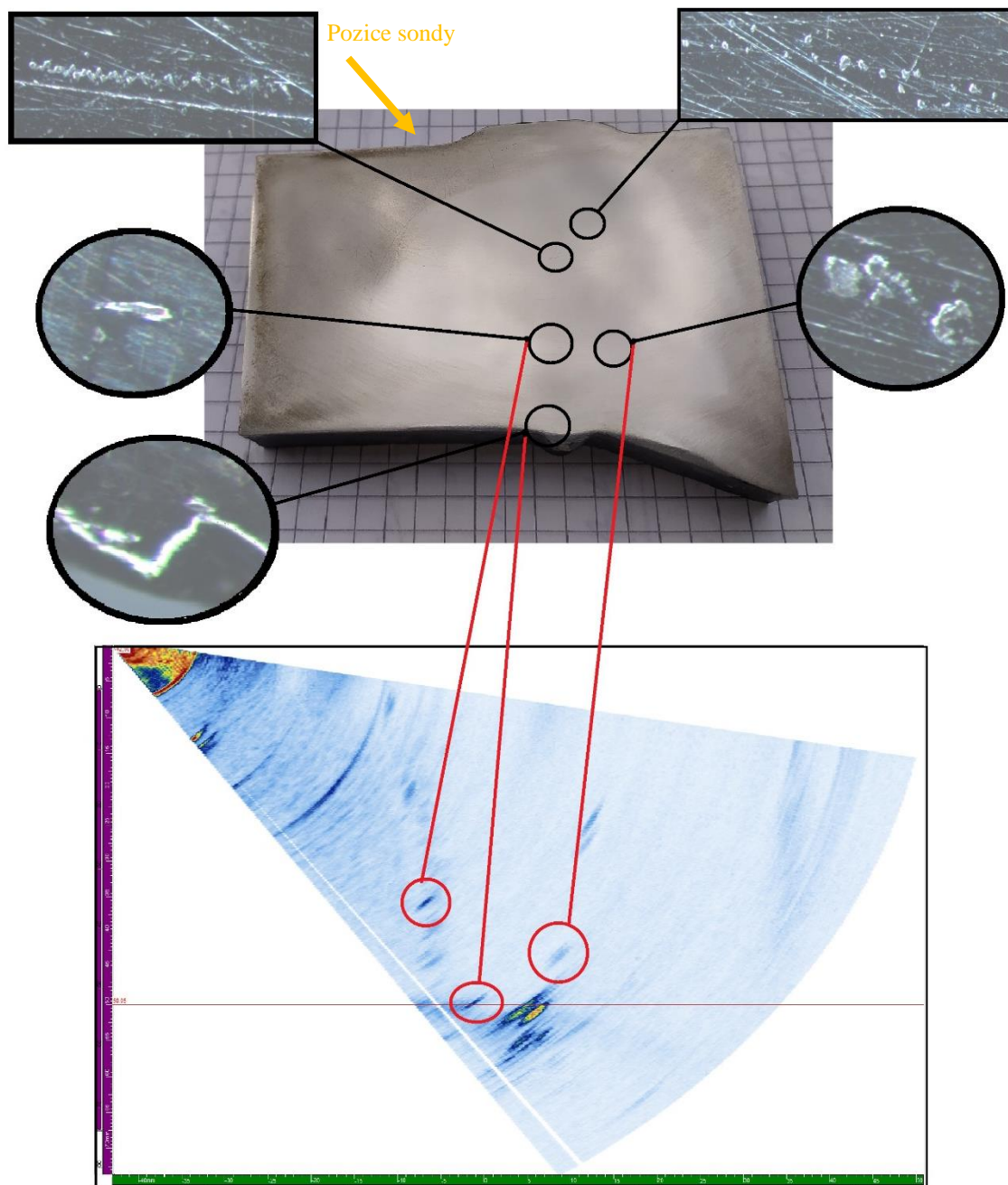
Zde jsou dále uvedeny výsledky z hodnocení vad materiálu, snímky poškození ze stereoskopického mikroskopu a fotky z ultrazvukové sondy včetně popisu poškození. Za účelem hodnocení z metalografického hlediska byly zpracovány a analyzovány vzorky A, B a C. Pozice sondy při měření je na obrázku vyznačena oranžovou šipkou.

9.1 Analýza vzorek A



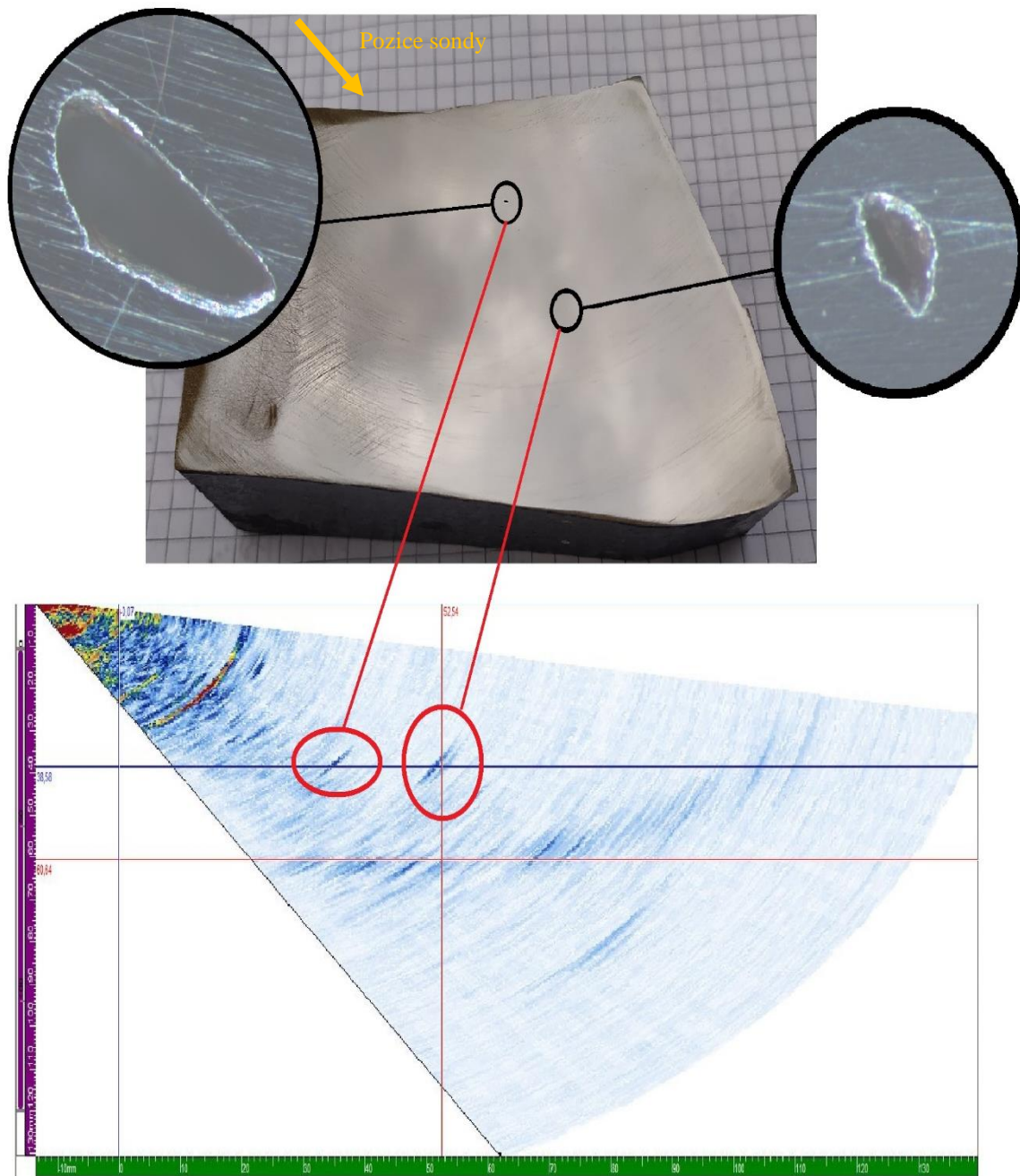
Obr. 15. Vzorek A, indikace nalezené metodou Phased Array, vyznačení vad na metalografickém výbrusu, zdroj: vlastní.

9.2 Analýza vzorek B



Obr. 16. Vzorek B indikace nalezené metodou Phased Array, vyznačení vad na metalografickém výbrusu, zdroj: vlastní.

9.3 Analýza vzorek C



Obr. 17. Vzorek C, indikace nalezené metodou Phased Array, vyznačení vad na metalografickém výbrusu, zdroj: vlastní.

9.4 Vyhodnocení vzorků

9.4.1 Vzorek A

Na obr. 15 je možné vidět makrografii analyzovaného vzorku společně se snímkem z měření ultrazvukem v místě vzorku s rozsahem ultrazvukového snímku 16 mm. Na vzorku byly označeny vady a byl k nim přidán jejich detail z mikroskopu. Zachycené vady byly následně porovnány s výsledkem z ultrazvukového šetření a vady jsou, jak je patrné, také označeny na vzorku.

Analyzovaný vzorek A byl opatřen jedním svarem, jehož hranice jsou velmi dobře patrné z ultrazvukového snímku. Celkem byly nalezeny 3 vady. Ultrazvuková kontrola zde může potvrdit výskyt pouze dvou vad, jelikož třetí vada indikace byla na protější straně úkosu a vzhledem k zvolené šířce ultrazvukového svazku nebyla potvrzena. Dvě majoritní vady potvrzené metodou Phased array byly nalezeny a následně potvrzeny na řezu při použití kapilární metody, viz předchozí kapitola číslo 8. Nalezené vady jsou dutiny či vměstky s největší pravděpodobností výrobního charakteru vzniklé při tvorbě svaru. Vady se vyskytují v místě přechodu svaru a základního materiálu, tedy z mechanického hlediska ve velmi nebezpečných místech.

9.4.2 Vzorek B

Na obr. 16. je uveden analyzovaný vzorek B. Rozsah ultrazvukového snímku je zde 21 mm. Vzorek je zde jako v případě A také opatřen jedním svarem. Je k dispozici makrofotografie vzorku společně s ultrazvukovým snímkem s vyznačenými vadami, které byly objeveny na metalografickém výbrusu. Opět se vady vyskytovaly majoritně v oblasti na pomezí mezi svarem a základním materiálem. Bylo nalezeno celkem 5 vad. Dvě vady označené ve čtvercích vykazují známky creepového poškození, jedná se o takzvané laminární řádkovité creepové dutiny. Na ultrazvuku však bohužel tyto řádkovité vady vzhledem k jejich orientaci vůči ultrazvukovému svazku nebylo možné identifikovat. Creep je na ultrazvuku oproti výrobním vadám slabě detekovatelný při srovnání s detekcí výrobních vad a dutin. Zbylé tři vady, pravděpodobně opět dutiny výrobního charakteru, byly detekovány ultrazvukem spolehlivě. Vlevo je poměrně velká dutina, jedná se o neprůvar mezi svarovými housenkami, vlevo dole je pak označena vada v oblasti kořene svaru, pravděpodobně dutina. Vada označená na pravé straně je shluk menších dutin s vměstkem.

9.4.3 Vzorek C

Na obr. 17. je analyzovaný vzorek označený jako C. Jako v předchozích případech je zde opět makrofotografie vzorku a následně ultrazvukový snímek s rozsahem 15 mm. Rozdíl od dvou předchozích vzorků A a B je takový, že u tohoto vzorku byla pravděpodobně dříve nalezena nějaká vada, která již byla dříve opravena. Místo vzorku s vadou bylo tedy vybroušeno a znovu zavařeno sérií svarových housenek. Z důvodu této opravy je tedy velmi pravděpodobné, že creepové poškození nebude v tomto případě možné v této oblasti spolehlivě analyzovat.

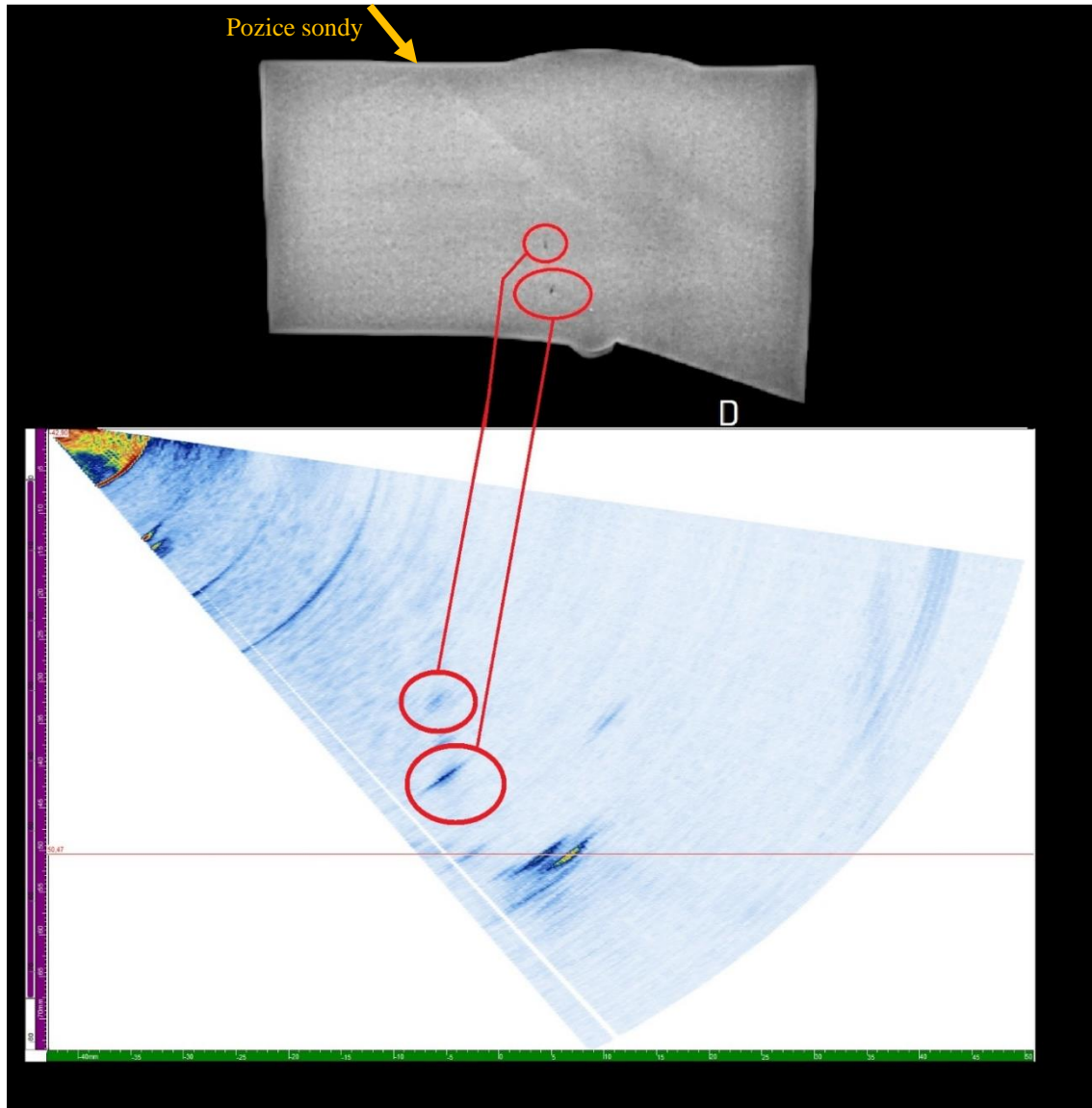
Na vzorku však byly nalezeny dvě hlavní vady. Jedná se o dutiny, výrobní vady v oblasti uvnitř svaru. Indikace jsou zároveň potvrzeny i kapilární metodou a jsou velmi dobře patrné i na snímku z metody Phased Array.

10 Prozařovací RTG metoda

Za účelem zjištění specifických vad u dvou vzorků byla vybrána nedestruktivní prozařovací metoda v rentgenovém kabinovém systému. Pro pozařovací metodu jsou vhodné tenké vzorky pro menší chybovost při následné analýze vlivem bludných proudů. Tloušťka materiálu byla konkrétně u vzorků D a E 11 a 15 mm. Tyto dva vzorky jsou vybrány pro tuto metodu pro svůj výrazný prvek, tedy velké přetečení kořene svaru, což je nejvíce patrné u vzorku E. Nedestruktivní kontrola byla zvolena právě z důvodu zjištění vady v této oblasti. Pro porovnání indikací byla zároveň na těchto vzorcích provedena analýza technikou Phased Array.

Pro analýzu těchto vzorků byl zvolen rentgenový kabinový systém s přímou detekcí obrazu pro nedestruktivní kontrolu materiálů. Zařízení disponuje rentgenovou kabinou pro rentgenování v horizontální poloze vzorků o maximální hmotnosti 40 kg. Kabina je osazena rentgenovou lampou ERSCO 42 MF-4 s výkonem 900 W a rozsahem prozařování od 1 do 42 mm při použití u čistého železa. Lampa disponuje velkým pracovním rozsahem, díky kterému je možné prozařovat materiály o různých tloušťkách. Dále je osazen detektorem GE DXR250U-W který disponuje aktivní plochou 410x410 mm s formátem 2048x2048 pixelů s roztečí jednotlivých bodů 200 μm . Tento přístroj je dostatečně vhodný pro analýzu kovových materiálů za účelem zjišťování povrchových nebo podpovrchových vad.

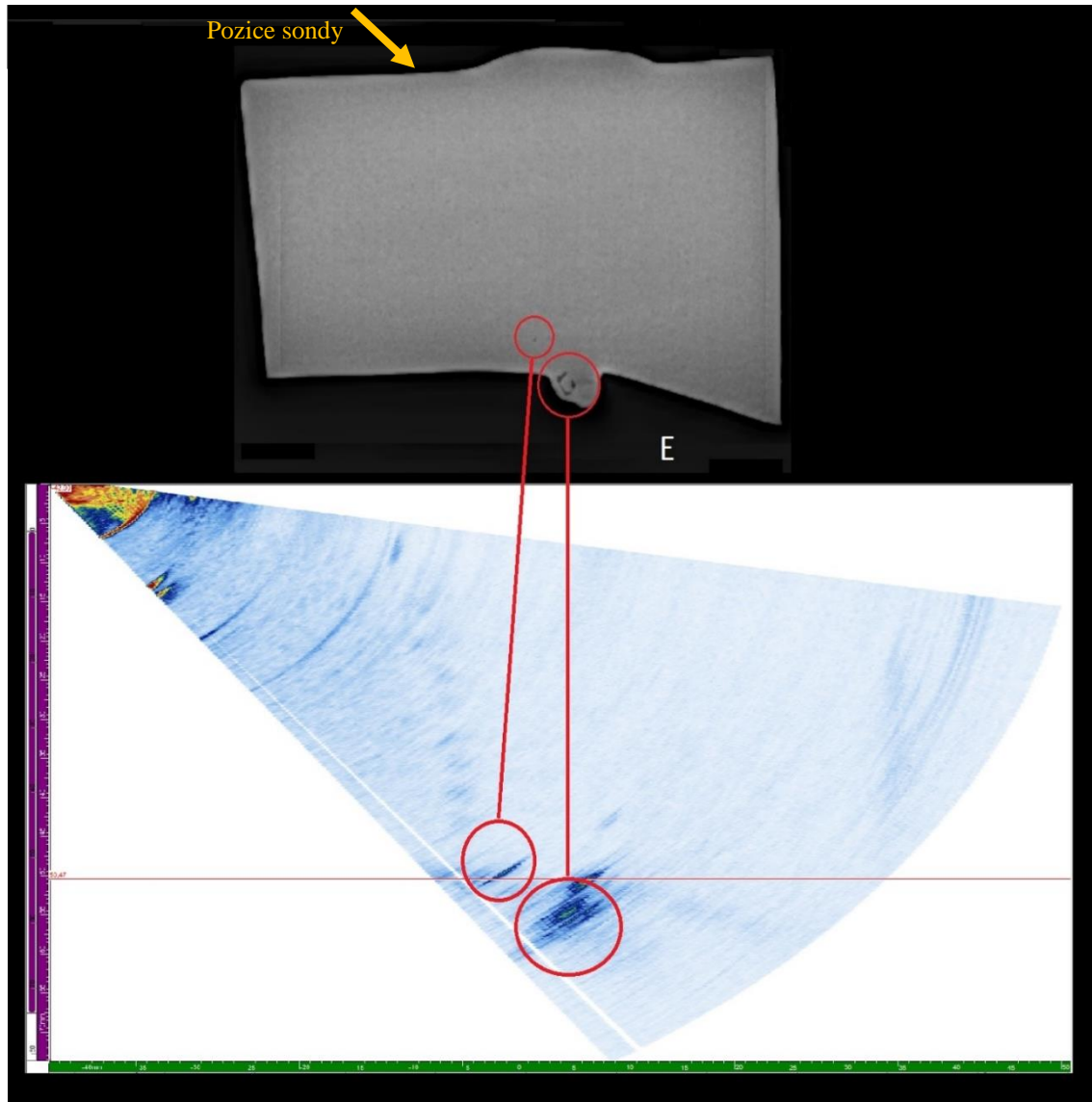
10.1 Vzorek D:



Obr. 18. Rentgenogram svaru vzorku D a ztožnění nalezených indikací pomocí metody Phased Array, zdroj: vlastní.

Z rentgenového snímku vzorku D (obr. č. 18) jsou patrné celkem dvě hlavní vady, dutiny. Jak je vidět, obě vady, tedy dutiny, se vyskytují v oblasti nad kořenem svaru ve spodní polovině součásti. Indikace jsou na rentgenovém snímku vyobrazeny tmavě. Vyskytují se v místě, kde dochází k přechodu mezi svarem a základním materiálem. Tato oblast obecně je pro výskyt vad z hlediska pevnostních charakteristik velice kritická. Technika ultrazvuková s rozsahem snímku 7 mm nalezené vady potvrzuje. Vady jsou zde označeny a spojeny s indikací na rentgenovém snímku. Obě vady jsou vzhledem k základnímu materiálu poměrně velké, a tím pádem relativně nebezpečné pro vznik lomu.

10.2 Vzorek E



Obr. 19. Rentgenogram svaru vzorku E a ztotožnění nalezených indikací pomocí metody Phased Array, zdroj: vlastní.

U vzorku E je z vytvořeného rentgenového snímku (obr 19.) patrný výskyt dvou majoritních vad. U tohoto vzorku je, jak již bylo zmíněno, velmi výrazné přetečení kořene svaru. V této oblasti na základě rentgenového snímku můžeme najít velkou oblast s patrnou porézností v kořeni. Tato vada však vzhledem ke své pozici a povaze nenarušuje vlastnosti součásti tak jako vada druhá. V případě druhé vady u tohoto vzorku se jedná opět o dutinu, která se vyskytuje v oblasti kořene svaru materiálu na hranici svaru a základního materiálu. Vady jsou opět potvrzeny ultrazvukovou metodou na snímku s rozsahem 10 mm, přičemž vada v oblasti kořene svaru je zde opravdu velmi výrazná.

Zjištěné vady by mohly vést ke vzniku a šíření mikrotrhlin vedoucím k postupnému poškození, až do vzniku dalších trhlin od místa kořene svaru, v tomto případě od vnitřního průměru potrubí.

Vady zjištěné rentgenovou metodou velice dobře odpovídají skutečné pozici a velikosti vad, což je velkou výhodou této metody. Na základě toho je pak možné velmi jednoduše určit přesnou povahu vady a velmi spolehlivě ji lokalizovat. V obou případech byly nalezeny dvě vady, obě v oblasti kořene svaru či spodní polovině součásti. Oblasti kořene svaru u těchto součástí jsou v místě vnitřního průměru potrubí, které je nejbližší přepravovanému médiu a působení vlivů, jako je vysoká teplota a tlak. Tyto dutiny by mohly vést ke vzniku dalších postupných poškození případně až majoritních trhlin vedoucích k povrchu součásti.

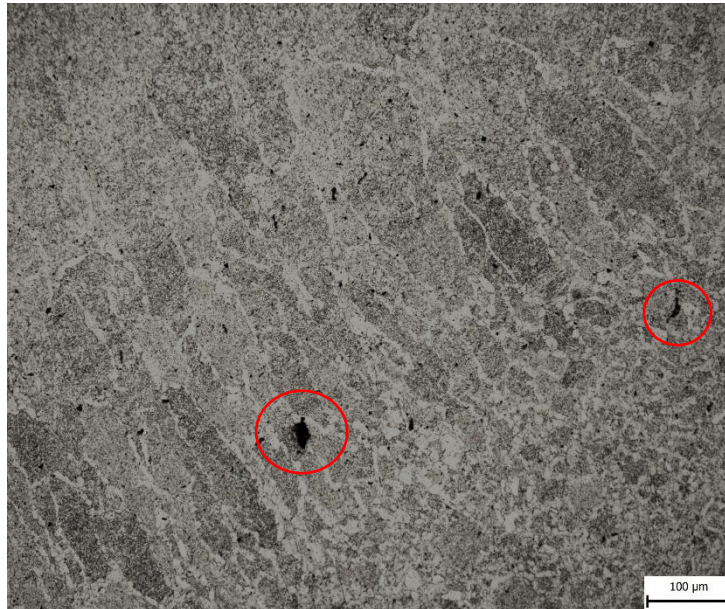
11 Metalografická analýza

Na vzorcích byly provedeny metalografické výbrusy. Tyto výbrusy byly před pozorováním leptány 15% roztokem Nitalu (HNO_3). Tato analýza byla zaměřena na zkoumání struktury materiálu a analýzu výrobních a dalších vad ve vzorku, jako jsou například heterogenity, dutiny, vměstky, poškození na hranicích zrn, a hlavně pak na poškození creepovým mechanismem. Velká pozornost je přitom kladena na výskyt creepového poškození a kavit, které jsou jedním z hlavních projevů creepového poškození. Analýza byla provedena na příčném řezu součástí, tedy z oblasti uvnitř materiálu. Vzhledem k podobnosti vzorků jsou na obrázcích níže jsou uvedeny jen některé ze získaných fotografií struktur. Velkou vadu pozorovanou v materiálu je možné vidět na obr. č. 20.



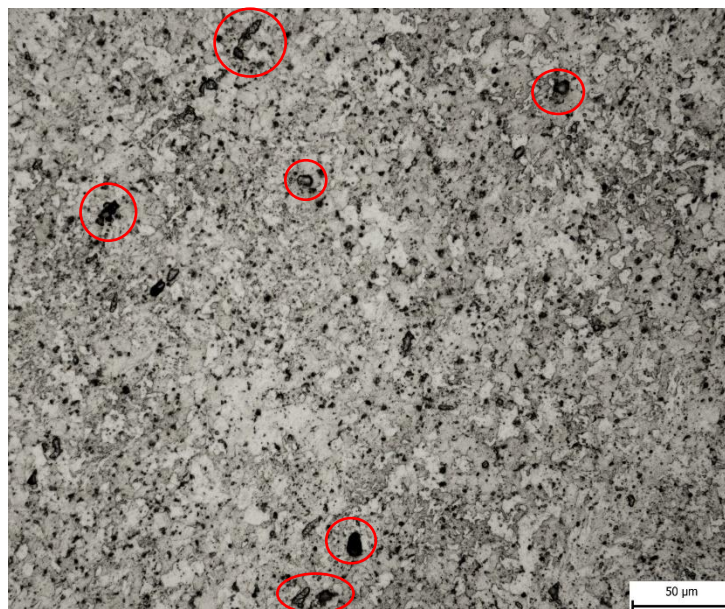
Obr. 20. Metalografie 1, zdroj: vlastní

Jedná se o velkou vadu představující spojené dutiny tvořící řádkovité poškození. Je to poškození v oblasti na hranici mezi základním materiálem a svarem. Takové poškození podstatným způsobem ovlivňuje vlastnosti celé součásti.



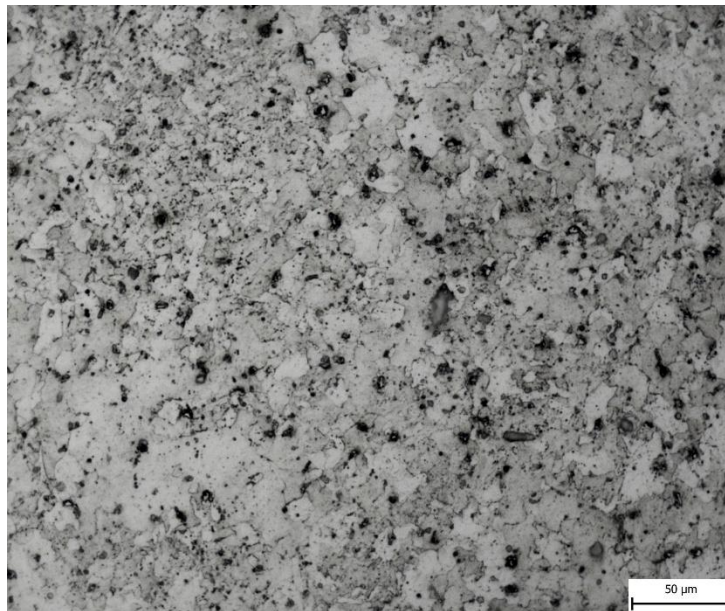
Obr. 21. Metalografie 2, zdroj: vlastní

Na detailu mikrostruktury na obr. č. 21 jsou velmi dobře vidět výrobní vady, v tomto případě zvýrazněné červeně a kavitační poškození a globulární karbidy v materiálu, které představují malé tmavé tečky.



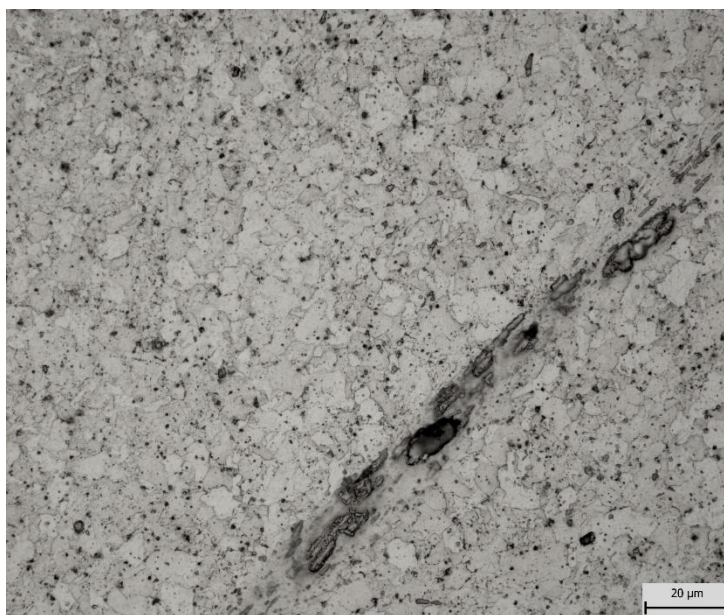
Obr. 22. Metalografie 3, zdroj: vlastní

Na dalším, ještě detailnějším snímku struktury (obr. č. 22) je lépe patrné samotné strukturální složení materiálu. Mikrostruktura obsahuje ferit a popuštěný bainit s disperzí globulárních karbidů či karbonitridů. Opět jsou zde zároveň vidět některé větší vady (zvýrazněné červeně)



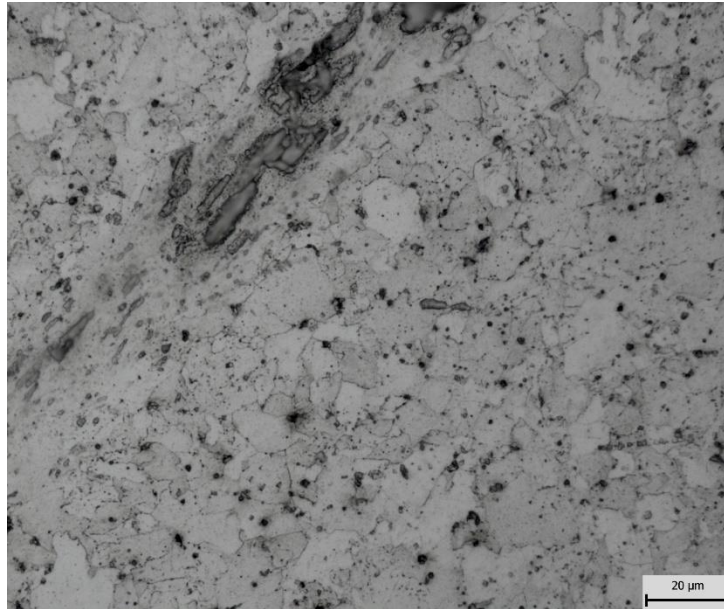
Obr. 23. Metalografie 4, zdroj: vlastní

Na obr. č. 23 mikrostruktury jsou velmi dobře patrné hranice zrn feriticko-bainitické struktury s velkým množstvím dutin a velmi dobře patrným výskytem blíže neurčených karbidů či karbonitridů.



Obr. 24. Metalografie 5, zdroj: vlastní

Na tomto obr. 24 je vidět detail feriticko-bainitické struktury. Jak je patrné z obrázku, obsažené karbidy se vyskytují primárně v oblasti hranice zrn. V tomto detailu je také velmi dobře vidět velké poškození vytvořené creepem, jelikož zde jsou patrné spojené dutiny tvořící tuto velkou vadu materiálu.



Obr. 25. Metalografie 6, zdroj: vlastní

Na obr. 25 je vidět opět detail poškození. Jsou vidět zřetelně zrna, karbidy po hranicích zrn a opět majoritní vada tvořená spojenými pravděpodobně kavitačními dutinami.

Jak je patrné z obrázků 20 až 25, struktura materiálu vzorků je tvořena feritickou maticí s obsahem popouštěného hrubozrného bainitu s vysráženými karbidy ve feritické matici. Hrubozrný bainit ve struktuře vzniká vlivem tepla způsobeného tvorbou svarového spoje. Dále jsou ve struktuře dobře patrné dutiny a vady způsobené kavitací. Kavity by se dle tabulky hodnocení materiálu daly posuzovat jako izolované, avšak v některých případech tvoří už i řetězce čili řádky creepových dutin. Pomocí optického mikroskopu lze však jen obtížně přesně charakterizovat karbidy a karbonitridy ve struktuře. Pro tento popis by bylo nutné použít jiných analyticko-zobrazovacích technik. Vzhledem k tomu, že toto nebylo součástí této práce, nebyla provedena analýza těchto částic.

12 Využití replik

Metoda replik se používá při studiu materiálů k nepřímému zkoumání povrchů a materiálů, které je velmi obtížné z různých důvodů zkoumat v laboratořích. Většinou to bývá z důvodu nutnosti demontáže a destrukce součásti za účelem získání vzorku, zatímco u replik nedojde k žádnému poškození. Pro účel této práce bylo provedeno několik otisků metodou replik na povrchové vnější části potrubí za účelem zjištění výskytu kavit na povrchu. Pro repliky byla zvolena sada pro odebrání otisku, tedy otisky do fólií. Fólie jsou vyrobeny z umělé hmoty a jejich tloušťka se pohybuje okolo 0,05 mm. Na folii se nanese rozpouštědlo za účelem změkčení materiálu repliky a přípravy na následný otisk. Takto připravená fólie se přitlačí na zkoumaný povrch, který je předtím pro tento účel obroušen na malou drsnost a leptán. Po otisku je replika materiálu, tedy otisk na fólii dále zkoumán v mikroskopu.

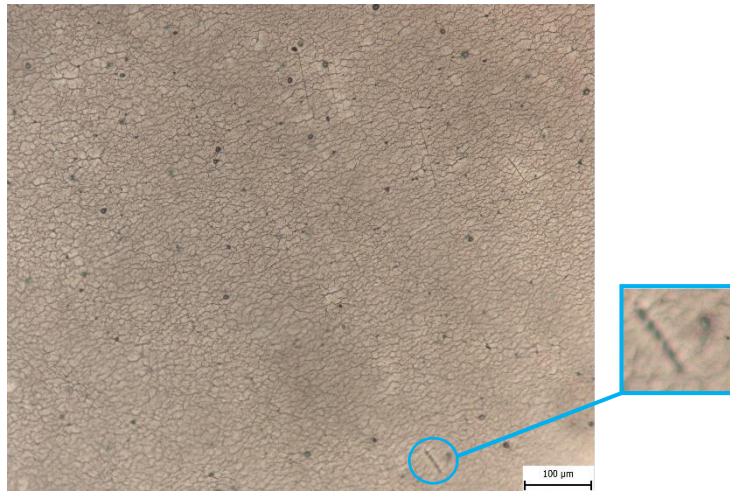
Výhodou této metody je to, že sada na odběr replik je poměrně malá a metoda jednoduchá. Je tedy možné tuto nedestruktivní zkoušku provádět i rovnou na součástech v energetických zařízeních. Hlavní výhodou je, že zkouška probíhá bez nutnosti demontáže či omezení provozu dané součásti, tedy například i na potrubí za provozu při dodržení všech bezpečnostních opatření. [43].

Repliky byly hodnoceny na základě tabulky hodnocení takzvaných Neubauerových tříd poškození viz tabulka 8. Poškození se hodnotí dle výskytu, rozsahu a povahy poškození. Od výskytu creepového poškození ve třídě 1 přes kavity ve třídách 2 a 3 až po majoritní poškození materiálu ve formě mikro a makro trhlin.

Třída poškození	Popis poškození	Doporučení dle Nordtest	Odhadovaná životnost dle poškození
0	Nový materiál, bez poškození	Žádné	100%
1	Materiál vystavený creepovému poškození, bez kavit	Žádné	86-100%
2a	Samostatné izolované kavity	Znovu zkontrolovat po 20 000 h provozu	53-95%
2b	Větší množství kavit bez přednostní orientace	Znovu zkontrolovat po 20 000 h provozu	53-95%
3a	Větší množství kavit s přednostní orientací	Znovu zkontrolovat po 15 000 h provozu	47-73%
3b	Řetězce kavit či oddělené hranice zrn	Znovu zkontrolovat po 15 000 h provozu	47-73%
4	Mikrotrhliny	Znovu zkontrolovat po 10 000 h provozu	16-71%
5	Makrotrhliny	Varování pro přerušování provozu	0-30%

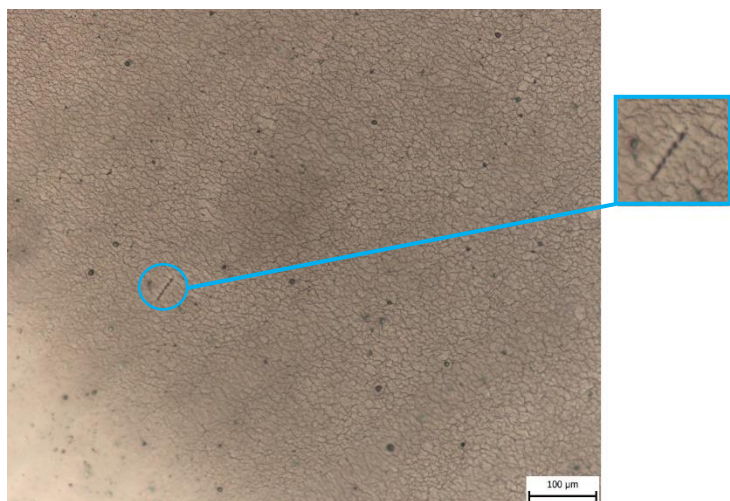
Tab. 8. Hodnocení poškození – Neubauerovy třídy [42]

V této části dále budou vyobrazeny fotografie z odběru replik na povrchu materiálu na vzorcích A-C z oblastí povrchu v těsné blízkosti svaru. Na strukturách byly pozorovány poškození třídy 2 a 3, tedy nejčastěji izolované kavity. Místy avšak velmi řídké je možné pozorovat i poškození z kategorie 3, tedy řetězce kavit. Tyto řetězce jsou však velmi malé.



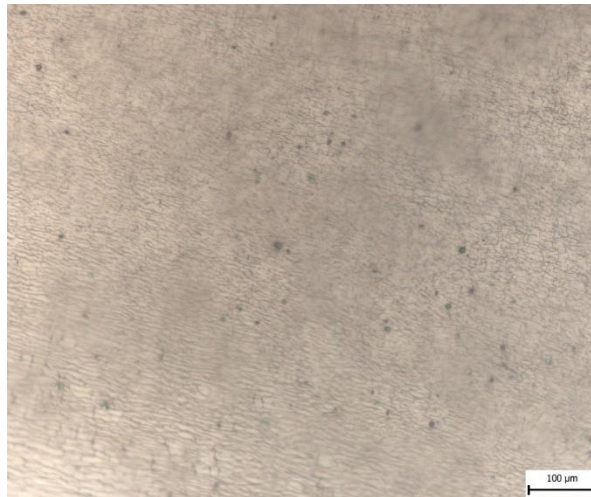
Obr. 26. Replika vzorku A, zdroj: vlastní

Na obr. 26, tedy replice vzorku A, jsou výrazným prvkem kavitační dutiny. Dobře patrné jsou zde také hranice zrn, které jsou ještě zvýrazněné leptáním před aplikací repliky. Na tomto obrázku je také možné vidět malou creepovitou řádkovitost, která je zvýrazněna modře. Jinak je na této replice většina kavit samostatných, izolovaných v oblastech hranic zrn.



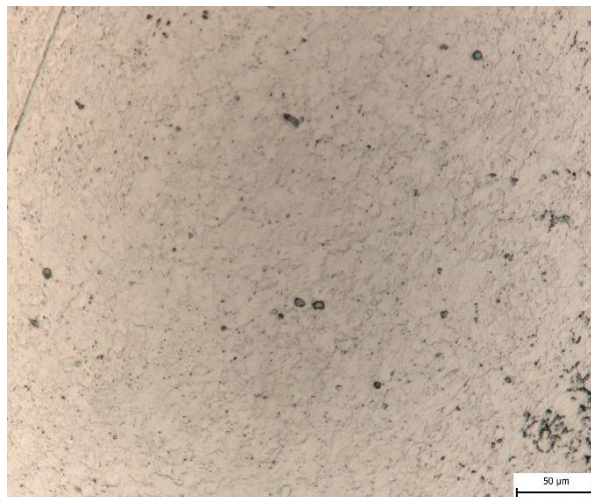
Obr. 27. Replika vzorku B, zdroj: vlastní

U obr. č. 27, tedy replice vzorku B, je situace velmi podobná jako u fotografie předcházející. Na replice struktury je možné pozorovat výrazné izolované kavitační dutiny v oblasti hranic zrna. Opět se zde vyskytuje také případ řádkovitosti (vyznačené modře), který odkazuje na přítomnost creepového poškození ve struktuře materiálu.



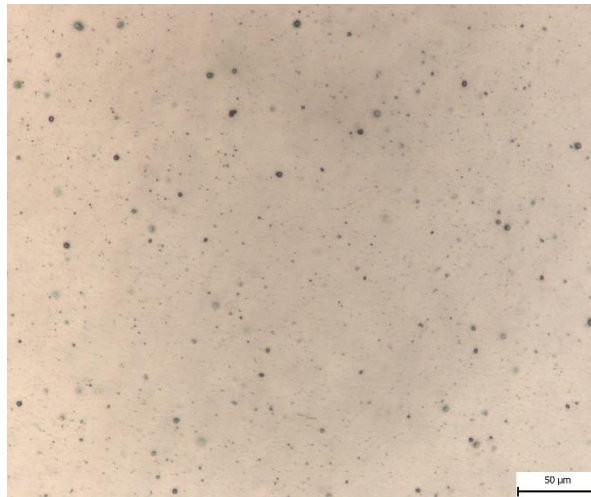
Obr. 28. Replika vzorku C, zdroj: vlastní

Na obr. 28, replice vzorku C, jsou na rozdíl od předchozích dvou vzorků nejvíce patrné pouze izolované kavity a dutiny na hranicích zrn.



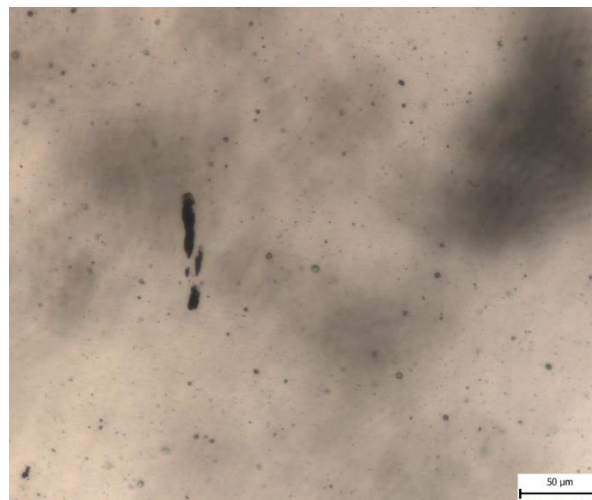
Obr. 29. Detail struktury A, zdroj: vlastní

Na obr. 29, tedy detailu struktury vzorku A, jsou dobře vidět hranice zrn materiálu. Velmi dobře je patrné kavitační poškození s rozestými poměrně hlubokými izolovanými kavitami. Velmi malé částice ve struktuře by mohly být pravděpodobně karbidy.



Obr. 30. Detail struktury B, zdroj: vlastní

Na tomto detailu struktury B (obr. 30) je možné vidět detail velkého množství pravděpodobně karbidických vměstků a dále také rozestých kavit.

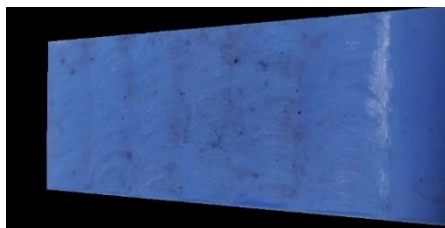


Obr. 31. Detail struktury C, zdroj: vlastní

Na obr. 31 u detailu struktury C je kromě kavitálního poškození velmi dobře patrná poměrně velká vada vzniklá spojením větších dutin. Tato vada vzhledem k poměrné velikosti oproti ostatním kavitám na obrázku je poměrně velká, a proto může podstatným způsobem negativně ovlivnit chování materiálu v tomto místě a bude mít velký vliv na vlastnosti v tomto místě součásti.

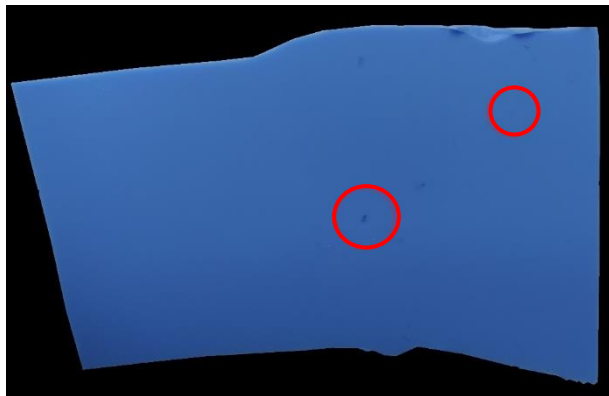
Jak je patrné z obrázků 26-31 na povrchu materiálu, tedy respektive z odebraných replik, byl zjištěn výskyt kavit v materiálu v poměrně velkém rozsahu a zároveň v některých místech i řádkovitých creepových trhlin. Kavitační poškození je přímým ukazatelem výskytu creepu, jelikož creep není homogenní, a proto nejdříve vznikají creepové dutiny, tedy kavity. Kavity se majoritně vyskytují v oblasti hranic zrn. Čím větší je počet kavit, tím spíše roste pravděpodobnost vzniku trhlin a jejich následného šíření materiálem. Podle výskytu kavit se proto může dále určovat zbytková životnost. Je velmi důležité, že creepové kavity se většinou vyskytují až v době těsně před koncem životnosti materiálu. Proto je velmi obtížné toto poškození zachytit a včas na něj reagovat a předejít tak větším škodám. Mohou se však objevovat i v počátečních fázích poškození. Hodnocení kavitačního poškození probíhá na základě poměru rozsahu kavitačního poškození a hodnoty předpokládané životnosti závislé na již uběhnutém čase provozu součásti. Další způsob hodnocení je založený na principu poměru zrn napadených kavitačním poškozením vzhledem k celkovému počtu zrn v určitém místě. Ze zkušeností je však známo, že se při analýze zbytkové životnosti musí pro přesnější výsledky zohledňovat i další parametry jako chemické složení materiálu, tepelné zpracování a další. Další důležitý poznatek je také ten, že hodnocení metodou replik analyzuje povrch součásti, tedy rozsah poškození pouze v oblasti povrchu.

Za účelem zjištění kavit na povrchu materiálu byla na jednom vzorku provedena pro porovnání metod ještě kaučuková replika. Pro repliku byla použita kaučuková pasta od společnosti Lukopren. Postup tvorby repliky je takový, že se kaučuková hmota Lukopren N super rozmíchá a nadávkuje se dané množství do předem připravené nádoby. V tomto případě to bylo 20g hmoty. Do takto odvážené a rozmíchané hmoty se přidá Lukopren N katalyzátor, v tomto případě 27 kapek, který vlivem chemické reakce způsobuje vytvrzení hmoty. Opět se směs řádně rozmíchá a následně opatrně nalije na předem očištěný povrch materiálu. Po určité době začne kaučuková hmota vulkanizovat čili se vytvrzovat. Pro dostatečnou vulkanizaci hmoty je nutné počkat 24-48 hodin. Po uplynutí doby se hmota opatrně odstraní z povrchu materiálu.



Obr. 32. Silikonová replika povrchu materiálu, zdroj: vlastní.

Replika dále popsaná níže byla odebrána z povrchu vzorku za účelem zjištění kavit na povrchu svaru. Jak je vidět na obrázku č. 32, otisk repliky obsahuje velké množství pórů o různé velikosti, od velmi malých až po některé větší. Problémem je, že některé póry v replice jsou způsobeny pravděpodobně otiskem kuliček, které vznikají na povrchu svaru při procesu svařování vlivem rozstříku. Dalším problémem je pak to, že některé póry mohou být způsobeny plyny, které se emitovaly z chemické reakce v hmotě při vytvrzování či tam zůstaly po aplikaci surové kaučukové hmoty. Z tohoto odběru proto není možné s jistotou určit, zda se ve svaru na povrchu materiálu vyskytuje nějaké kavitační poškození.



Obr. 33. Silikonová vzorku A, zdroj: vlastní.

Dalším způsobem využití této metody bylo ověření vad zjištěných na vzorku A. Opět byla využita replika z kaučuku. Repliku tohoto vzorku je možné vidět na obrázku č. 33. Replika je přesným negativem vybroušené boční strany součásti. Jsou zde patrné vady, které jen potvrzují indikace zjištěné kapilární zkouškou a metalografií. Další dvě pouhým okem patrné vady na povrchu repliky jsou patrně způsobeny vytvrzováním či povahou kaučukové hmoty pro repliky. Nicméně hlavní povrchové vady vzorku A jsou touto metodou potvrzeny.

13 Diskuse výsledků

Úkolem této práce bylo se zabývat poškozením potrubí v tepelných elektrárnách se zaměřením na creepové poškození. V úvodní části, po krátkém seznámení s aktuálním stavem problematiky, byl vysvětlen pojem životnost a objasněna problematika hlavních vlivů, které působí na životnost materiálů a součástí. V několika následujících kapitolách byly popsány procesy, které při provozu na součásti působí či mohou působit, a tím je znehodnocovat či poškozovat. Zde byly zmíněny pojmy, jako je koroze, eroze, kavitace a podrobněji pak problematika creepového poškození. Aby bylo možné předcházet nehodám spojeným s procesy, které materiál poškozují, je nutné materiály určitými způsoby kontrolovat. Na tuto problematiku se zaměřily následující kapitoly, kde došlo k rozdělení metod na destruktivní a nedestruktivní a byli popsáni někteří hlavní zástupci těchto dvou kategorií. U nedestruktivních metod to byla zkouška rentgenem, zkouška ultrazvukem a kapilární metoda. U destruktivních pak protlačovací zkouška, popis metalografického hodnocení materiálů, a nakonec creepové zkoušky. Následoval krátký popis nejčastěji používaných materiálů obecně v energetice a elektrárenském průmyslu, jejich vlastnosti a složení. Dále pak směry nebo trendy, kterými tato oblast dále směřuje a dále se zabývá. Další kapitoly již spadaly do praktické části této práce. Na úvod jsou zde popsány vzorky poskytnuté pro účely této práce od výzkumného ústavu Centra výzkumu Řež s.r.o. Bylo provedeno seznámení s materiálem vzorků, tedy konkrétně s materiálem dle ČSN 15 128. Na materiálu byla změřena v několika místech tvrdost dle Vickerse podle normy ČSN EN ISO 9015-1. Bylo to v místě svaru, v tepelně ovlivněné oblasti a v základním materiálu. Změřená tvrdost v základním materiálu dle materiálové normy 41 512 8 odpovídala danému rozmezí. Pro oblast svaru byla mezní hodnota daná normou ČSN EN ISO 15614-1 a opět hodnoty tohle rozmezí nepřekročily. Další zkouška vzorků spočívala v analýze chemického složení optickou emisní spektrometrií v doutnavém výboji. Touto analýzou bylo zjištěno, že chemické složení hodnotám z normy ve většině případů odpovídá, kromě prvků síry, chromu a molybdenu, kde byly zjištěny obsahy rozdílné. Následoval podrobný popis degradačních procesů materiálu vzorku pro následné přesnější hodnocení degradace. V další části práce bylo vypočteno několik faktorů, které vycházely z chemického složení materiálu. Konkrétně to byly faktory CEF, tedy náchylnost materiálu ke zkřehnutí vlivem působení vysokých teplot (Creep Embrittlement faktor).

Dle výsledku tohoto faktoru se dala uvažovat nízká náchylnost materiálu ke zkřehnutí. Dalším faktorem byl takzvaný Bruscattův faktor. Ten se zabývá chemickým složením, které ovlivňuje creepovou tažnost materiálu. Tato hodnota vyšla podstatně vyšší, tedy se dá očekávat vyšší tažnost. V neposlední řadě byl vypočten J faktor, což je označení pro citlivost oceli na popouštěcí křehkost. Tato hodnota opět vyšla podstatně vyšší, takže se dá očekávat vyšší citlivost oceli při popouštění. Na poskytnutých vzorcích byla následně provedena kapilární zkouška za účelem zjištění majoritních povrchových vad. Na dvou třetinách vzorků tato metoda spolehlivě našla vady. Na posledním vzorku nebyly nalezeny žádné indikace pravděpodobně z důvodu povahy vady, které neměly dostatečnou hloubku pro penetrant. V další kapitole byla popsána metoda hodnocení vad dle německé směrnice VGB TW- 507, jež popisuje poškození a dělí jej do několika kategorií, takzvaných Neubauerových tříd poškození. V další části jsou pak popsány jednotlivé nálezy na analyzovaných vzorcích, a to metalografickou analýzou vad v kombinaci s hodnocením ultrazvukovou metodou. Zde byla většina nalezených vad potvrzena jak kapilární, tak ultrazvukovou metodou, a nakonec i metalografií. Většina vad jsou pak dutiny výrobního charakteru či jiné výrobní vady, které se vyskytovaly primárně v oblasti přechodu mezi svarem a základním materiálem. U jednoho vzorku však byly nalezeny řádkovité kavity ve svaru odkazující na přítomnost creepového poškození, které však nebyly potvrzeny ultrazvukovou metodou. Některé vzorky také byly analyzovány metodou rentgenovou. Zde byly nalezeny opět dutiny výrobního charakteru v oblasti hranice svar a základní materiál. V jednom případě bylo nalezeno značné přetečení svaru v oblasti kořene a neprůvar této oblasti. Následující kapitola se zabývala metalografickou analýzou vzorků, konkrétně tedy analyzovala metalografické výbrusy naleptané 15% roztokem Nitalu. Na strukturách byly nalezeny známky rozsáhlého kavitačního poškození po hranicích zrn s heterogenitami v oblasti zrna. Struktura byla rozpoznána feriticko-bainitická s hrubým popuštěným bainitem a množstvím karbidů či karbonitridů. V poslední kapitole byla využita metoda replik na vnějším povrchu součásti za účelem zjištění kavit, které předpovídají creepové poškození v materiálu. Byly odebrány repliky fóliovou metodou, díky kterým byl vytvořen přesný negativ povrchu. Otisky na fóliích byly následně zkoumány světelným mikroskopem a byl potvrzen výskyt kavitačního poškození v poměrně velkém rozsahu v oblasti hranic zrn. V některých místech byla zároveň zjištěna přítomnost creepových řádkovitých kavit.

Opět byly na otiscích vidět karbidy po hranicích zrn. Pro porovnání byly dále také uvedeny silikonové repliky povrchu, kde však výsledky nebyly vypovídající. Je důležité uvést, že v oblasti materiálu pod povrchem může být poškození v úplně jiném rozsahu, než jaké bylo zjištěno replikami na povrchu. Dle vytvořených replik na povrchu bylo zjištěno velké množství kavit a na některých místech i řádkovitého charakteru potvrzující výskyt creepového poškození v materiálu.

14 Závěr

Tato diplomová práce se zabývala problematikou hodnocení creepového poškození ve svarových spojích. Tato problematika podstatným způsobem ovlivňuje životnost součástí v teplárenském průmyslu. V první části práce, tedy v teoretické, se tato práce zabývala popisem životnosti a jejími druhy. Dále byly popsány procesy, které způsobují znehodnocování materiálu, majoritně tedy koroze a creep. Poté následovalo seznámení se způsoby kontroly materiálu a vad součástí. Jednalo se o zkoušky nedestruktivní, kam patří například kapilární zkouška či prozařovací RTG metoda, a dále zkoušky destruktivní, mezi které se řadí například metalografické zkoušky. V poslední kapitole teoretické části byly zmíněny materiály používané v energetice a současné trendy v této oblasti. Následovala druhá část práce, tedy část praktická. Po krátkém seznámení se zkoumanými vzorky byla provedena série zkoušek (tvrdost, chemické složení), které potvrdily, že materiál zkoumané součásti má správné vlastnosti a chemické složení. Následně byla provedena série testů na zjištění přítomnosti vad v materiálu, kdy se jednalo o hodnocení kapilární metodou, technikou Phased Array a také prozařovací RTG metodou. Na vzorcích bylo nalezeno několik vad, které byly pomocí více analytických metod zároveň i mezi sebou ve většině případů potvrzeny. V poslední části práce byla analyzována struktura metalografickým výbrusem a metodou replik. Zde bylo zjištěno rozsáhlé kavitační poškození, které předchází a evokuje poškození creepové. Creepové poškození bylo následně potvrzeno nálezem několika případů creepové řádkovitosti. Většina ostatních nalezených vad byla pouze výrobního charakteru, které vznikly při tvorbě svarového spoje. Cíl práce byl tedy splněn.

15 Seznam použitých zdrojů

- [1] KUDĚLKA, Vladimír. Bezpečnost, trvanlivost, životnost a spolehlivost výrobků: E-konstrukter [online]. 2018 [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/bezpecnost-trvanlivost-zivotnost-a-spolehlivost-vyrobku>
- [2] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. Úvod do studia materiálů. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. s.177 ISBN 80-7080-568-4.
- [3] VLK, Miloš, FLORIAN Zdeněk. Mezní stavy a spolehlivost. Brno: Vysoké učení technické, 2007.
- [4] NOVÁK, P. Druhy koroze kovů. Koroze a ochrana materiálu. 2005, roč. 49, čís. 4, s. 75–82. ISSN 0452 - 599X.
- [5] NOVÁK, Pavel. Koroze kovů. Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství, Fakulta chemické technologie Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2008.
- [6] Research Gate: Corrosion in steam pipe [online]. 2014 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Corrosion-in-a-steam-pipe-downstream-of-a-wash-water-injection-point_fig8_283084139
- [7] Nitty Gritty: Corrosion - Erosion [online]. 2018 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.nitty-gritty.it/en/corrosion-erosion/>
- [8] Eroze oběžných lopatek parních turbín [online]. Plzeň, 2020 [cit. 2021-12-06].
- [9] Aktivnizona.cz: Jak se sledují potrubní systémy v elektrárně. Aktivní zóna - Online časopis jaderné elektrárny Dukovany [online]. 06.04.2013 [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://www.aktivnizona.cz/cs/zpravy/jak-se-sleduji-potrubni-systemy-v-elektrarne-17188>
- [10] JUREČKA, Martin. Erozivní účinky kavitace. Brno, 2010. Bakalářská. Vysoké učení technické Brno. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27956.
- [11] Creepové poškození [online]. Brno, 2016 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0-K/07_MS6K.ppt

- [12] ZOUHAR, Michal. DEFORMAČNĚ NAPĚŤOVÁ ANALÝZA A HODNOCENÍ MEZNÍCH STAVŮ ČÁSTÍ TLUSTOSTĚNNÉHO POTRUBÍ V OBLASTI CREEPU. Brno, 2009. Diplomová. Vysoké učení technické Brno. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/30306726.pdf>.
- [13] VESELÁ J., MAREŠ P. a ŠPIRIT Z. Prvotní výsledky diagnostiky creepového poškození svarového spoje ultrazvukem, Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách. 2020.
- [14] Creep Fatigue Damage Interaction: Fatigue Deformation and Failure. EPRI product ID 1018439, 2008.
- [15] MEDRAJ M. Creep and High Temperature Failure [online]. 2018 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: http://users.encs.concordia.ca/~mmedraj/mech321/lecture_12_creep.pdf
- [16] ŠTUKAVEC, Karel. Mikrosegregace [online]. Brno, 2010 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: Zdroj: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5342
- [17] FIŠER, Kamil. Lomová mechanika a lomy [online]. 2015 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2789444/>
- [18] LOŠÁK, Pavel. Řízení životnosti procesních zařízení v průmyslové praxi. Brno, 2016. Dizertační. Vysoké učení technické v Brně.
- [19] MAREŠ, Pavel, Jana VESELÁ a Zbyněk ŠPIRIT. Creepové poškození v parovodech a využití metalografie při ověřování možností zkoušení. Přínos metalografie. 2021.
- [20] Cirex.cz: Nedestruktivní zkoušky [online]. Kopřivnice, 30.09. 2015 [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://cirex.cz/spoluprace-pri-vyvoj/hodnoceni-vyrobku/nedestruktivni-zkouseni/>
- [21] MARTINÁK, Milan. Kontrola a měření pro 3. ročník SPŠ strojnických. 1. vydání. Praha: SNTL, 1989. 216 s. ISBN 80-03-00103-X.
- [22] OLYMPUS CORPORATION: Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Québec, 2004.
- [23] ŠULC, Jan. Technologická a strojnická měření pro SPŠ strojnické. 2. vydání. Praha: SNTL, 1982. 420 s.

- [24] PALÁT, Hynek. Nedestruktivní zkoušky [online]. 2012 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://www.sspuopava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/STT_I/VY_32_INOVACE_B-06-10.pdf
- [25] Weldinspect s.r.o: Kapilární zkoušení [online]. 2020 [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://www.weldinspect.cz/kapilarni-zkouseni>
- [26] BUNDA, Zbyněk, Josef VOLÁK a Václav MENTL. Nedestruktivní hodnocení součástí energetických zařízení pomocí metody metalografických replik. All for power: Defektoskopie, 2019. Dostupné z: <http://old.allforpower.cz/clanek/nedestruktivni-hodnoceni-soucasti-energetickych-zarizeni-pomoci-metody-metalografickych-replik/>
- [27] VODEROVÁ, Milena. Metalografie I. VŠCHT Praha, 2013: Dostupné z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Metalografie%20I.pdf?redirected>.
- [28] ARUNKUMAR, S. Overview of Small Punch Test. Met. Mater. Int. 26, 719–738 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00454-5>
- [29] LIČKOVÁ, Dagmar. Vlastnosti a zkoušení materiálu: Creep. 2016. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~lic098/files/13.cviceni_VZM.pdf.
- [30] HAKL, Jan, Tomáš VLASÁK a Jiří KUDRMAN. Creepové vlastnosti a struktura oceli P91 [online]. Praha, 2008 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: http://konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/metal_08/Lists/Papers/134.pdf
- [31] Virgamet: 14MOV6-3, 1.7715 - BOILER STEEL [online]. 2022 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://virgamet.com/14mov63-1-7715-14mo6-bs-660-uns-k11591-boiler-pressure-vessel-steel>
- [32] CIESLAR, Stanislav. Rostou požadavky na materiály pro energetiku [online]. 2008 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/rostou-pozadavky-na-materialy-pro-energetiku/>
- [33] ČSN 41 5128 (415128): Ocel 15 128 Cr-Mo-V. 1986.
- [34] DVOŘÁČEK, Ondřej. Modelování fázového složení žárupevných ocelí a jejich spojů. Brno, 2009. Diplomová. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Vít Jan, Ph.D.

- [35] PURMENSKÝ, J. Strukturní stabilita CrMo a CrMoV ocelí a její vliv na životnost energetických a chemických zařízení. Brno: Akademie věd České republiky, Ústav fyziky materiálů, 1992. (Disertační práce.)
- [36] TRI ISO 15608: Svařování - Směrnice pro zařazování kovových materiálů do skupin. 2008.
- [37] ČSN EN ISO 15614-1(050313): Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 1: Obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu. 2018.
- [38] GDOES: Optická emisní spektrometrie s buzením v doutnavém výboji (GDOES) [online]. 2022 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/gdoes/>
- [39] FORET, Rudolf. Strukturní stabilita žárupevných ocelí a jejich svarových spojů [online]. Brno, 2005 [cit. 2022-04-19]. ISSN 1213-418X.
- [40] Hutnické listy: Hodnocení zbytkové životnosti trubkové oceli 15 128 pomocí zkoušek malých vzorků [online]. LXXI. Ostrava, 2018 [cit. 2022-04-19]. ISSN 0018-8069. Dostupné z: <https://www.hutnickelisty.cz/wp-content/uploads/2020/06/Kubon-HL6-2018.pdf>
- [41] VGB TW 507. Microstructure Rating Charts for Evaluating the Microstructure and Creep Damage of High-Temperature Steels for High-Pressure Piping and Boiler Components, 2nd Edition, VGB Powertech, 2005.)
- [42] JANOVEC, Jiří, Daniela POLÁCHOVÁ a Michal JUNEK. Lifetime Assessment of a Steam Pipeline. Acta Polytechnica Vol. 52. Praha, 2012(4)
- [43] DIN 54150 Abdruckverfahren für die Oberflächenprüfung (Replica-Technik)