



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**OPRAVA TS TRUBEK PAROGENERÁTORU RUČNÍM
SVAŘOVÁNÍM**

REPAIR TS TUBES OF THE STEAM GENERATOR BY MANUAL WELDING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Zeman

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Tomáš Zeman**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Jaroslav Kubíček**
Akademický rok: 2019/20

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

Oprava TS trubek parogenerátoru ručním svařováním

STRUČNÁ CHARAKTERISTIKA PROBLEMATIKY ÚKOLU:

Parogenerátor je v jaderné elektrárně jednou z nejdůležitějších strojních součástí. Spolehlivost zařízení je z hlediska jaderné bezpečnosti prioritní, protože převádí tepelnou energii z primárního okruhu reaktoru na sekundární. Přesto je nutná oprava netěsností a BP se zabývá procesem od vzniku vady, rozbořem opravy, tvorbou postupu opravy, provedením kontrolního svarové spoje včetně zkoušek (VT, PT, makro), až po vlastní realizaci opravy.

CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE:

1. Literární studie problematiky svažitelnosti oceli a technologie svařování.
2. Návrh experimentální práce.
3. Provedení experimentu a požadovaných zkoušek.
4. Vyhodnocení výsledků.

SEZNAM DOPORUČENÉ LITERATURY:

ASM handbook Welding, brazing, and soldering Volume 6. 10th editon. Materials Park, Ohio: ASM International, 2016. ISBN 978-0871703828.

KOUKAL, Jaroslav a kolektiv autorů. Materiály a jejich svažitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2. upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3.

AMBROŽ, Oldřich a kolektiv autorů. Technologie svařování a zařízení. 2. upr. vyd. Ostrava ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.

HRIVŇÁK, Ivan. Zváranie a zvariteľnosť materiálov, 2vyd. Bratislava: Citadella, 2013, ISBN 978-8-89628-18-6.

BARTÁK, Jiří a kolektiv autorů. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2000. ISBN 80-85771-72-1.

KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. Technologie svařování: Svařování v ochranných atmosférách. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, ISBN 80-708-2697-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

.....
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

ředitel ústavu

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

děkan fakulty

ABSTRAKT

ZEMAN Tomáš: Oprava TS trubek parogenerátoru ručním svařováním

Bakalářská práce se zabývá opravou teplosměnných trubek parogenerátoru Jaderné elektrárny Dukovany. Vady v materiálu kolektoru parogenerátoru byly takového rozsahu, že bylo nutné přistoupit k ruční opravě pracovníky uvnitř kolektoru. K získání kvalifikace opravy byla provedena řada kontrolních svarových spojů, důkladný trénink a příprava. Po opravě následoval sled zkoušek a testů, které skončily vyhovujícím výsledkem a zařízení bylo předáno do provozu.

Klíčová slova: Parogenerátor, ruční svařování, manipulátor, TIG, kontrolní svarový spoj

ABSTRACT

ZEMAN Tomáš: Repair TS tubes of the steam generator by manual welding

This bachelor thesis deals with repair of heat exchange tubes of steam generator of Dukovany Nuclear Power Plant. Defects in the material of the collector of the steam generator were to such an extent that it was necessary to proceed with manual repair by workers inside the collector. A number of inspection welds, thorough training and preparation were performed to obtain the qualification of the repair. The repair was followed by a series of tests and trials, which ended in a satisfactory result and the equipment was put into operation.

Keywords: Steam generator, manual welding, manipulator, TIG, check weld joint

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZEMAN, Tomáš. *Oprava TS trubek parogenerátoru ručním svařováním* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125042>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Třebíči dne 20.06.2020

Tomáš Zeman

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Jaroslavovi Kubíčkovvi za hodnotné připomínky a pomoc při zpracovávání bakalářské práce. Děkuji své rodině, za její trpělivost a podporu. A v neposlední řadě děkuji Vojtěchu Palarčíkovi, Pavlu Mlynářovi, Zdeňku Čančurovi a Jiřímu Hajdíkovi za jejich technickou pomoc, připomínky a důležité podněty při tvorbě bakalářské práce.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD.....	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
1.1 Variantní řešení	10
2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ A SVAŘITELNOST OCELÍ	13
2.1 Technologie svařování	13
2.1.1 Svařování za pomoci manipulátoru ZOK – (142)	14
2.1.2 Svařování TIG – (141).....	17
2.1.3 Svařování MMA – (111)	19
2.2 Svařitelnost austenitických ocelí.....	22
3 EXPERIMENT RUČNÍHO SVAŘOVÁNÍ PAROGENERÁTORU.....	27
3.1 Zaslepování TS trubek	28
3.1.1 Postup zaslepení TS trubek	29
3.2 Zjištění indikací v PG.....	30
3.3 Ruční oprava kolektoru	32
3.4 Kontrolní svarové spoje	33
3.4.1 KSS 1.....	35
3.4.2 KSS 2.....	37
3.4.3 KSS 3.....	38
3.4.4 KSS 4.....	39
3.4.5 KSS 5.....	40
3.5 Oprava PG.....	41
3.5.1 Závěrečné kontroly	43
4. ZÁVĚRY	44

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

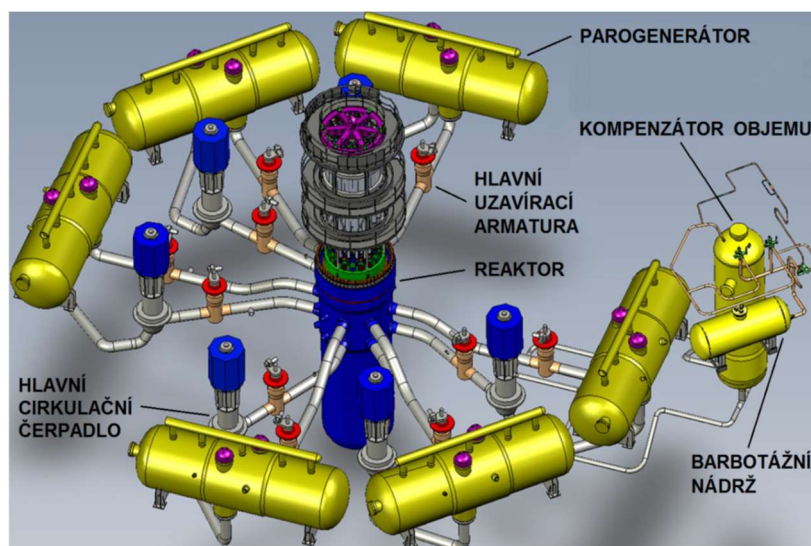
Seznam tabulek

Seznam příloh

ÚVOD [1], [2], [3]

V České republice se na výrobě elektrické energie, velkou měrou, podílejí jaderné elektrárny. Jsou dvě, v Dukovanech a Temelíně. Jejich společný výkon překračuje 4000 MW. Z celkové elektrické produkce ČR zauímají cca 35 % výroby (údaj z roku 2019). Elektrárny tohoto druhu jsou velice složitá zařízení s velkou provázaností různorodých technologií. I přes svoji složitost, jako absolutní prioritu, volí bezpečný, spolehlivý a dlouhodobý provoz. Přes všechnu snahu obsluhujícího personálu, technologie i stavby stárnou, tudíž vyžadují důslednější a preciznější péči.

Mezi nejdůležitější zařízení jaderné elektrárny zcela jistě patří reaktory, parogenerátory a parní turbogenerátory (obr. 1). Jejich údržba je, z hlediska náročnosti zařízení, velikosti, hmotnosti a radiační situace, velice náročná a nákladná. Většina instalovaných technologických zařízení má tu výhodu, že jdou, za určitých podmínek, vyměnit za nový výrobek. Toto pravidlo, ale neplatí např. pro reaktor a parogenerátor. Pro tyto zařízení jsou stanoveny postupy pro opravu, protože výměna je buď zcela nemožná nebo natolik časově a finančně náročná, že se oprava záměnou za nový výrobek nerealizuje.

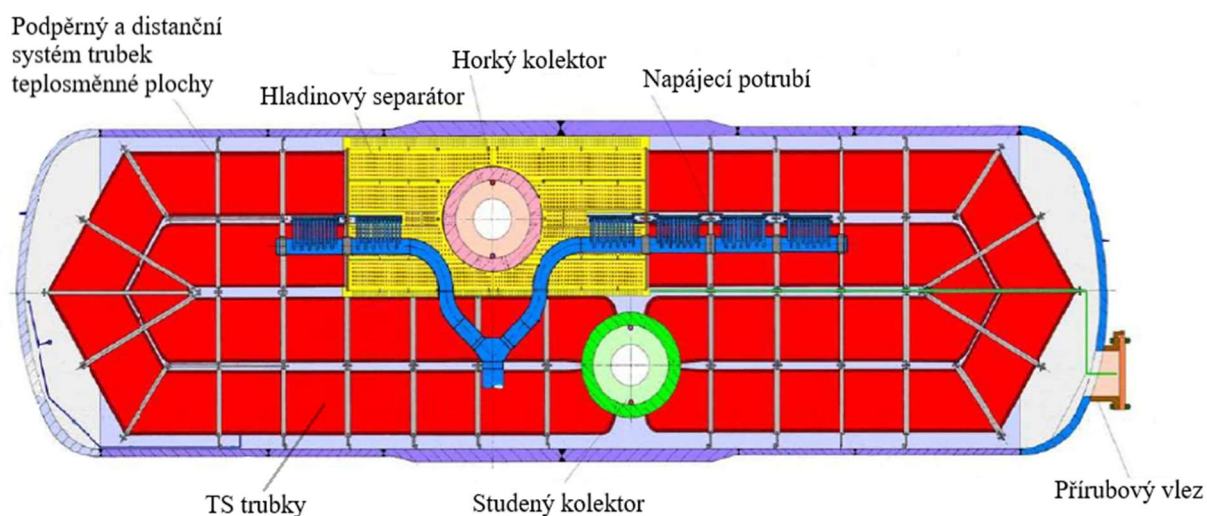


Obr. 1 Nejdůležitější zařízení jaderné elektrárny [3]

1 ROZBOR ZADÁNÍ [1], [2], [3], [22], [30]

Jaderná elektrárna Dukovany byla uvedena do provozu v letech 1985-1987. Během uplynulých 35 let provozu proběhlo mnoho údržbářských činností, při kterých byly systémy nejen opravovány, ale i modernizovány. Jak bylo uvedeno výše, některá zařízení je možno pouze opravovat. Jejich výměna není možná. I tak se obsluha snaží udržovat dotčená zařízení v dobré kondici. V experimentu je vysvětlována oprava teplosměnných (TS) trubek – parogenerátoru (PG).

PG je zařízení, které je v přímém kontaktu s primárním, radioaktivním chladivem. Proto jakákoli kontrola nebo oprava je, díky zdravotně závadnému prostředí, velice ztížená. TS trubky jsou zaústěny do dvou kolektorů (obr. 2).



Obr. 2 Parogenerátor – řez [3]

Jakékoli manipulace, prováděné uvnitř kolektorů, byly až donedávna prováděny pomocí automatu. Ten umožňoval provádět veškeré běžné kontroly i opravy. Po zjištění vady, indikace na TS trubce, která je součástí řešení experimentu, byl navrhnout a vyzkoušen způsob kontrol i oprav pomocí pracovníka, který je dostatečně vyškolen a vybaven potřebnými zkušenostmi a nářadím, a to mu umožňuje operace provést. Nedílnou součástí takové opravy je i legislativní schválení. Jde o nastavení všech činností, aby byly v souladu s normami a předpisy.

1.1 Variantní řešení [3], [5], [22], [30]

Poškozené TS trubky lze opravit jediným způsobem a to, vyřadit je zcela z provozu. Tato metoda spočívá v zaslepení celé trubky z obou stran. TS trubky slouží k přenosu primární tepelné energie vznikající v reaktoru, sekundární vodě, která se mění v páru. Pára předává svoji kinetickou energii lopatkám turbíny.

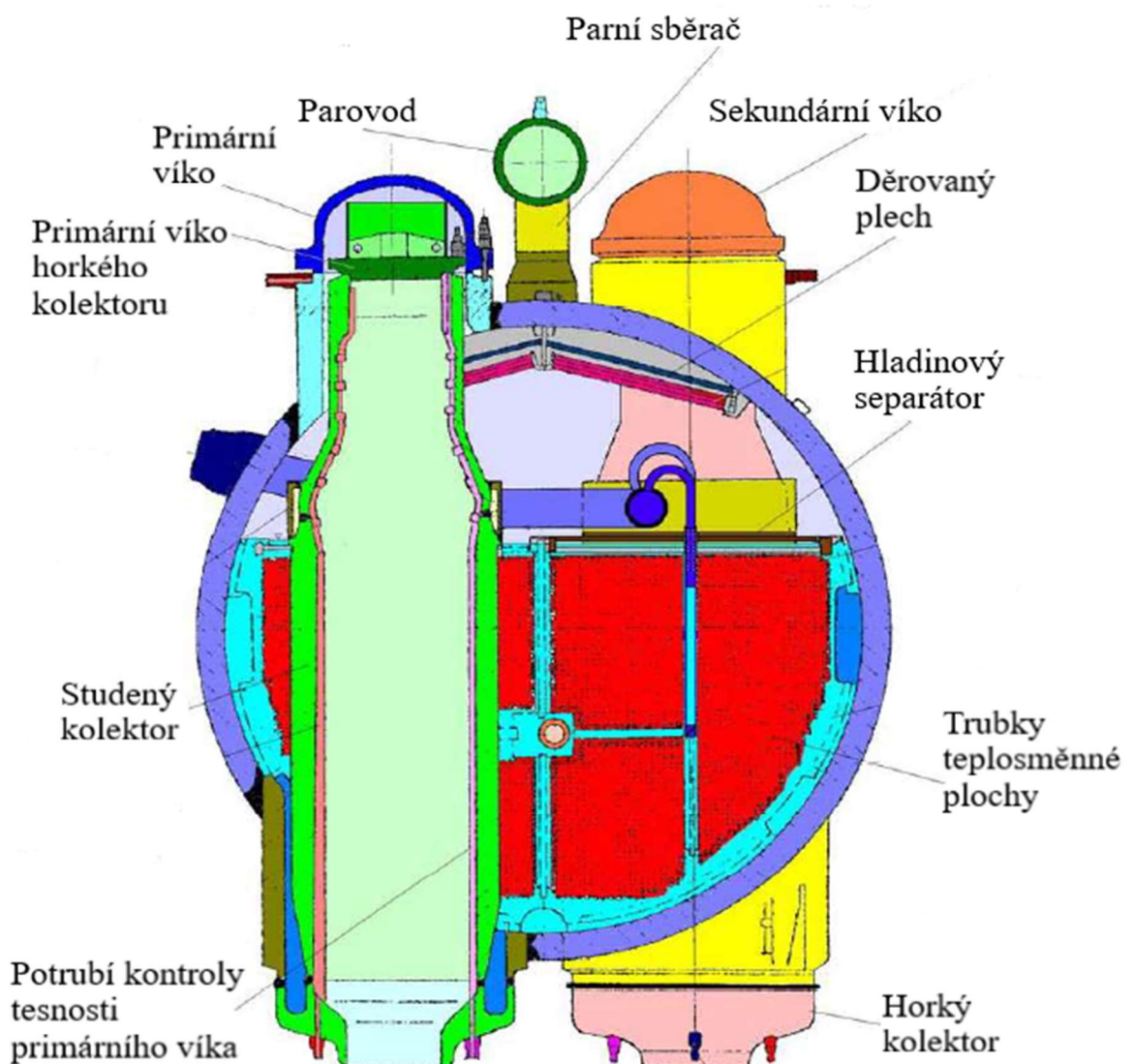
Zaslepení TS trubky lze definovat jako utěsnění konců trubek v horkém i studeném kolektoru (obr. 2), zastrčením normalizované zátky a zavařením těsnícího svaru. Tento proces se provádí pomocí manipulátoru typu ZOK. Práce spojené se zaslepováním TS trubek má na jaderných elektrárnách kvalifikována firma Škoda JS, a.s.

Použití manipulátoru je nutné z několika důvodů:

- Radiační situace – Oba kolektory i TS trubky jsou za provozu v přímém styku s primárním médiem. Kyselina boritá (H_3BO_3), která je obsažena v primárním médiu, ulpívá na stěnách kolektorů a kontaminuje tak povrch.
- Stísněné prostory – Kolektory mají vnitřní průměr pouze 800 mm, proto je každá

operace prováděná pracovníkem velice problematická (obr. 3). Navíc vstupní otvor do kolektoru má průměr pouze 450 mm (obr. 4), takže už vstoupit je problematické. Dalším problémem je vstup pracovníka k opravovanému místu. Kolektor je 4,7 m vysoký a uvnitř není nainstalován žebřík, tudíž je nutné použít pro spuštění pracovníka kladkostroj.

- Pád cizího předmětu – Ve spodní části je kolektor zaústěn do potrubí vstupu a výstupu primárního chladiva, proto je velký důraz kladen na nebezpečí pádu předmětu do primárního okruhu. V případě provozu svářečského automatu je manipulátor vybaven záchytnou vanou. Pokud by byl nutný zásah pracovníka, musí se podniknout kroky k zamezení pádu předmětu do potrubí.



Obr. 3 Parogenerátor-řez kolektorem [3]

Běžné zaslepování se provádí pomocí typizované zátky (obr. 5), která se vsunutá, přiváří k TS trubce zaválcované v kolektoru (obr. 6). Postup zaslepování je popsán v kapitole 2.1.1.

Ve výjimečných případech může dojít k nedokonalému odvrtní TS trubky nebo těsnostní svar vykazuje určitou vadu. V tomto případě lze opravu provést pomocí zátky s větším

průměrem. Postup je stejný, jako u základní zátky, jen je třeba vyvrtat větší otvor.

Při zaslepování může dojít k situaci, kdy pomocí manipulátoru není možné pracovní operaci provést. V tomto případě musí operaci provést ručně pracovník realizační firmy. Tento proces je předmětem této bakalářské práce.

Ruční oprava sebou přináší mnoho příprav a prověřování. Všichni zúčastnění musí podstoupit rozsáhlé školení, jak teoretické, tak i praktický nácvik. S ohledem na složitost zařízení, kolektor PG, tak i na stáří materiálu, je zcela nutné navrhnout a vyzkoušet postupy svařování. Tyto postupy musí splnit náročná kritéria na kvalitu provedení, legislativní pravidla a šetrnost opravy, aby nemohlo dojít k ještě většímu poškození.

Kvalita provedení se získá použitím pracovníků s dlouholetou praxí a dostatečnou kvalifikací.

Legislativa je předem nastavena pravidly, kterými se řídí veškeré opravy a rekonstrukce na primárním okruhu jaderné elektrárny.

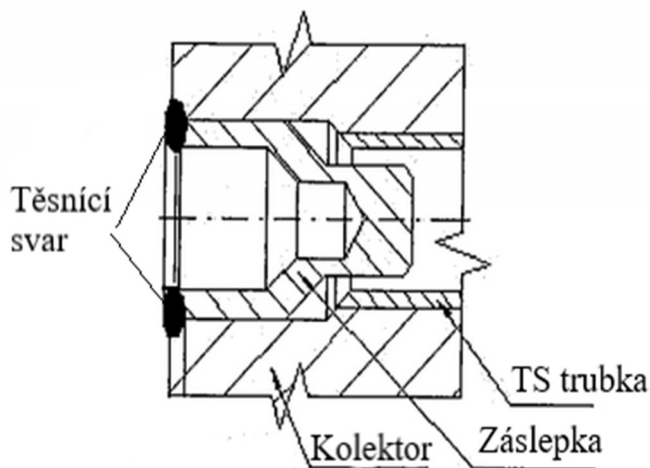
Aby bylo možné provést opravu, musí být navržena série zkoušek, která ukáže, zda navrhované řešení je správné a dostatečně šetrné ke stávajícímu zařízení.

Sérií zkoušek, které nazýváme Kontrolní svarové spoje (KSS), získáme jasný ukazatel, zda materiály, použité při KSS, budou vyhovovat navrhovanému řešení. Následné testy, jako např. makrostruktura, odhalí případné nedostatky nebo porušení v materiálu po svařování. Jednou z nejdůležitějších hledisek přípravy je zjistit, zda nebo jak bude oprava působit na okolní materiál a jestli ho nebude nepřijatelně deformovat.

Z navrhované série KSS bude na konci vybrán ten způsob provedení, který v testech nejlépe obstojí a jeho provedení bude nejlépe vyhovovat požadovaným parametrům.



Obr. 4 Vstup do PG



Obr. 5 Zaslepená TS trubka [30]

2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ A SVAŘITELNOST OCELÍ [4], [9], [15], [17]

Svařování kovů a jejich slitin je nadefinováno jako nerozebíratelné spojení, při kterém využíváme tepelnou, mechanickou nebo radiační energii. Ke spojení dochází za působení meziatomových sil, při aktivaci tepelné nebo tlakové energie na kontaktních svařovaných plochách.

Svařování, jako strojní výrobní a opravárenský obor, má stále velké uplatnění. Svařování se objevuje ve strojní výrobě, stavebnictví, letecké i kosmické technologii a elektronice i elektrotechnice.

Svařence, svařované díly, bývají ve většině případů, vyrobeny z jednotlivých dílů hutního materiálu, ale zvláštností nejsou ani součásti z výkovků a odlitků.

Výhody svářečského odvětví:

- zjednoduší provádění konstrukcí, uplatňování nových výhodnějších řešení
- nahrazování kovaných a litých dílců
- možnost vyrábět lehčí a složitější výrobky díky příhradové, skříňové či skořepinové konstrukci
- navýšení výrobní produktivity díky mechanizaci a automatizaci svařování
- výrazné snížení nákladů
- zrychlení montáže před vyrobených dílů

Nevýhody svařování:

- vznikající napětí a deformace svařovaných dílů
- tepelné ovlivnění místa svaru a tím vznikající změna struktury a vlastností v materiálu
- možnost vzniku vnitřních vad vlivem ohřevu a chladnutí materiálu při svařování

2.1 Technologie svařování [7], [9], [10], [13], [15], [27]

Při svařování používáme různé druhy aktivační energie.

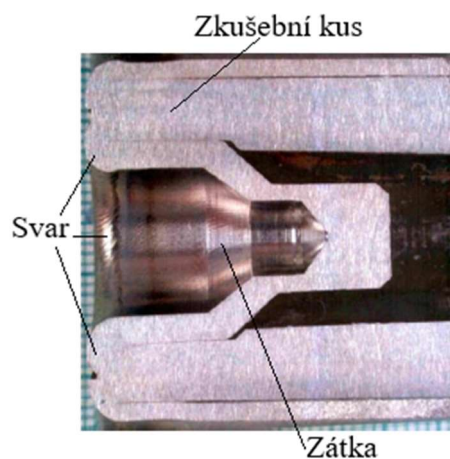
- Termická aktivace → tavné svařování
- Mechanická aktivace → tlakové svařování
- Radiační aktivace → tavné svařování

Základním rozdělením svařování je na tavné a tlakové.

Tavné svařování dosahuje spojení materiálu přívodem tepelné energie do místa svařování. Použitím tepla dochází k natavení základního a popřípadě přídavného materiálu, který se promíchává a při chladnutí vytváří svarový spoj.

Tlakové svařování je možné za použití mechanické energie. Tlakem materiálů o sebe se vytváří povrchové deformace, které zapříčiní přiblížení ploch svařovaných materiálů na meziatomové vzdálenosti a aktivaci meziatomových sil. Tímto procesem vzniká svarový spoj. Běžné je svařované plochy před procesem ohřát až pod teplotu tavení, což podstatně sníží tlakové síly nutné pro svaření materiálů.

V rámci experimentu této bakalářské práce byly použity tři metody svařování.



Obr. 6 Řez zavařenou zátkou

2.1.1 Svařování za pomoci manipulátoru ZOK – (142) [5], [6], [30]

Metoda svařování elektrickým obloukem netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu za pomoci manipulátoru ZOK (obr. 7).

Při kontrole a opravách teplosměnných trubek v parogenerátorech JE se používá manipulátor ZOK firmy VUJE. Radiační situace nedovoluje, bez předchozích náročných příprav, svařování ruční metodou. Manipulátor ZOK je ucelený systém pro NDT zkoušení teplosměnných trubek, materiálu kolektoru a opravy teplosměnných trubek PG jak v JE Dukovany, tak v JE Temelín.

Základní funkce manipulátoru ZOK:

- kontrola TST použitím metody NDT vířivé proudu (zjišťování průchodnosti, zeslabení nebo místní porušení TST)
- sušení a profukování pracovního prostoru kolektoru
- odstranění starého svaru a části zaválcování TST odvrtáním (obr. 9)
- zavedení nové zátky do předem odvrtaného otvoru – (obr. 10)
- provedení těsnícího svaru zátka-trubkovnice - (obr. 11)
- vizuální kontrola provedení svaru - (obr. 12)
- video záznam celého procesu opravy

Nadstandardní funkce manipulátoru ZOK:

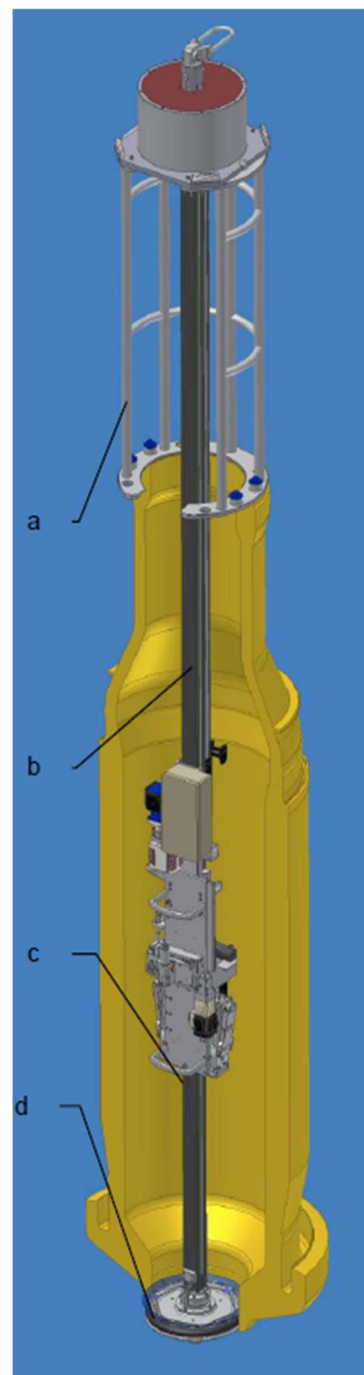
- možnost očištění svarových ploch použitím kartáčového nástavce
- penetrační kontrola svarových a základních ploch
- možnost odvrtání a vytažení staré zátky
- použití vizuálního modulu pro kvalitnější kontrolu

Všechny tyto operace je možné provádět pomocí výměnných modulů na manipulátoru. Tyto moduly může obsluha vyměnit vně parogenerátoru. Manipulátor poté modul dopraví do kolektoru PG a provede požadovanou operaci. Celý proces provádění operací je řízen dálkově z reaktorového sálu, kde není obsluha vystavována radiačnímu záření. Prováděné operace obsluha řídí a kontroluje pomocí několika obrazovek, které zobrazují snímání kamer umístěných na manipulátoru. Kamery jsou instalovány tak, aby byla možná korekce umístění modulů manipulátoru.

Konkrétní postup opravy manipulátorem ZOK bude popsán v experimentální části bakalářské práce.

Základní části manipulátoru jsou zobrazeny na obr. 2

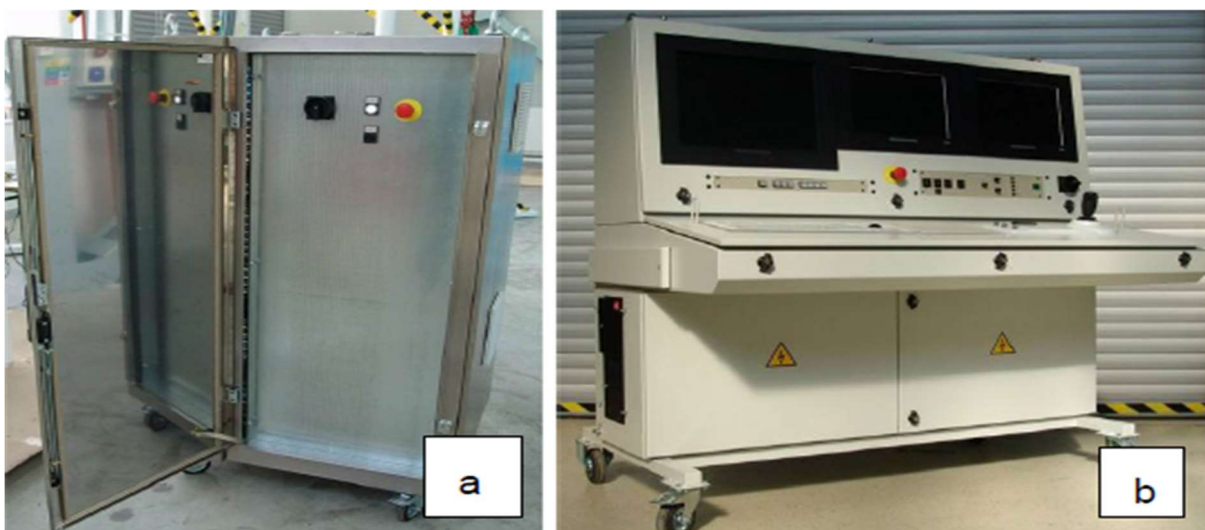
- Stojan (a) → pomocí stojanu se manipulátor upevňuje na primární přírubu PG. Vyrobený je z austenitické oceli.
- Nosný sloup (b) → Slouží jako nosná část manipulátoru. Hliníkové vedení zajišťuje pohyb nosného vozíku a uložení kabelového nosiče. Otočný mechanismus, který je upevněn v horní části sloupu a přes ozubený řetěz elektromotoru, zajišťuje rotaci sloupu. I při tomto pohybu je tuhost sloupu dostatečná.



Obr. 7 Manipulátor ZOK [5]

Pouze při vrtání se používá opěrný mechanismus.

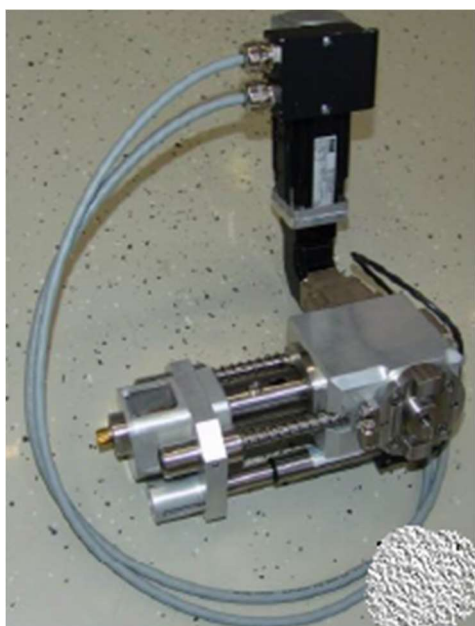
- Nosný vozík (c) → Je upevněn na sloupě. Vertikální pohyb zabezpečuje elektromotor přes pastorek a ozubený hřeben. Výměnné moduly se upevňují na vozík v horní koncové poloze. Systém upevňování umožňuje rychlou výměnu.
- Centrovací uzel (d) → Je upevněn ve spodní části sloupu a je určen k vycentrování manipulátoru v kolektoru. Jeho instalace dále zabraňuje pádu cizího předmětu do primárního potrubí při pracovním procesu manipulátoru. V tělese uzlu je umístěn ventil, který umožňuje kontinuální vypouštění média v průběhu UT zkoušení.
- Řídicí jednotka → Umožňuje napájení a ovládání manipulátoru, ale zdroj svářecího proudu (obr. 13) není jeho součástí. Je rozdělena dle (obr. 8) na výkonovou jednotku (a) a ovládací pult (b). Řídicí jednotka umožňuje ovládat všechny dodané moduly.



a) Výkonová jednotka

b) Ovládací pult manipulátoru

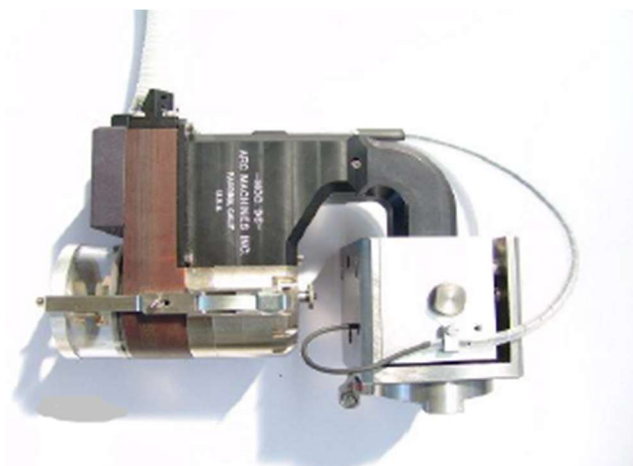
Obr. 8 Napájení a ovládání manipulátoru [5]



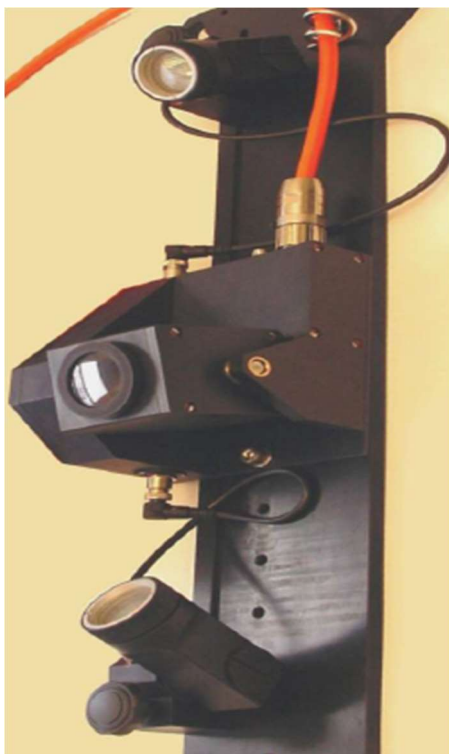
Obr. 9 Vrtací hlava [5]



Obr. 10 Nasazovací hlava [5]



Obr. 11 Svařovací hlava a těsnící svar [5]



Obr. 12 Vizuální modul [5]



Obr. 13 Svařovací zdroj [5]

Svařování pomocí manipulátoru ZOK je založeno na metodě svařování 142 - TIG. Netaví se wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu, bez použití přídavného materiálu. Jde o natavení a promísení částečně materiálu zátky a částečně materiálu kolektoru. Výsledkem je těsnící svar.

Provedení svaru je následující:

- Nastavení wolframové elektrody → pomocí měrek se nastavuje jak vysunutí elektrody z držáku, tak i vzdálenost elektrody od osy svařování
- Nasazení svařovacího modulu → po nasazení na nosný vozík modul sjede do kolektoru a nastaví se do předem určené pozice
- Vycentrování → trn modulu se zasune do zastrčené zátky a přisune se kryt argonu
- Svařování → po zapálení oblouku elektroda provede zavaření přejetím obvodu zátky. Elektroda obvod přejede cca o čtvrtinu od zapálení pro kvalitní ukončení svaru

- Ukončení → po zhasnutí oblouku následuje dojezd proudění inertního ochranného plynu a poté se kryt plynu vrátí do původní polohy a následuje nepřímá vizuální kontrola svaru

Metoda TIG bude popsána níže.

2.1.2 Svařování TIG – (141) [4], [6], [8], [10]

Metoda svařování elektrickým obloukem netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu (obr. 14).

Základní princip:

Je založen na obloukovém svařování, kdy oblouk hoří mezi netavící se elektrodou a základním materiálem. Pro znemožnění přístupu vzduchu je okolo oblouku vytvářena inertní ochranná atmosféra (argon, helium a jejich směsi). Tato metoda dovoluje jak ruční, tak automatické svařování s nebo bez přídavného materiálu.

Dle druhu používaného proudu dělíme svařování na střídavé (hliník, hořčík a jejich slitiny) a stejnosměrné (legované oceli, měď, nikl, titan, zirkon, molybden a další).

Touto metodou můžeme svařovat i různorodé materiály (ocel s mědí, niklem a dalšími slitinami) a můžeme provádět různé návary v oblasti renovací a oprav (niklové a kobaltové tvrdonávary).

Výhody svařování metodou TIG:

- plynová ochrana svarové lázně a její okolí chrání před nežádoucími účinky kyslíku

- inertní plyn brání propalování prvků čímž zabraňuje vzniku strusky a povrch svarového kovu je velmi čistý

- inertní atmosféra také příznivě ovlivňuje formování svarové housenky, jak ze strany

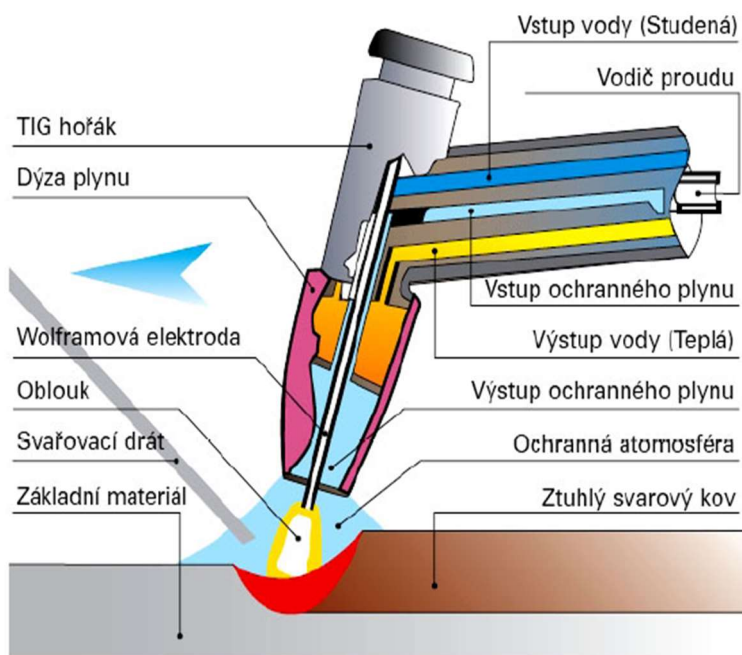
- elektrický oblouk se vyznačuje vysokou stabilitou a širokým rozsahem svařovacích proudů

- možnost svařování ve všech polohách

- obsluha je poměrně jednoduchá a tím je zabezpečena i přesná a plynulá regulace svářecích parametrů

- oblast svaru je málo tepelně ovlivněna a vytváří minimální deformace

- místo svařování je dobře viditelné a svarová lázeň se tudíž výborně ovládá



Obr. 14 Princip svařování TIG [4]

Nevýhody svařování metodou TIG:

- složitost svařovacího zařízení → komplikovanější a dražší než zařízení ostatních metod svařování
- nízká produktivita → jde o poměrně pomalý druh svařování, zejména ruční svařování, zapříčiněná hlavně precizností při svařování. Tato metoda se nehodí pro velkosériovou a hromadnou výrobu.

Ochranné plyny

Stěžejní úlohou ochranných plynů je znemožnit přístupu vzdušného kyslíku ke svařovacímu oblouku a svarové lázni. Další významnou funkcí je vliv na přenos oblouku a tepelné energie, zapálení oblouku a jeho stabilita, tvorba a chování tavné lázně, hloubka závaru, svařovací rychlost a mnoho dalších parametrů svařování.

Netečné neboli inertní plyny (argon, hélium) nereagují se svarovým kovem a díky jim je propal prvků na nízké hladině. Netečnost plynů také neovlivňuje výsledné chemické složení svarového kovu. Ochranné plyny se používají při svařování všech materiálů. Z hlediska vysoké ceny plynů je nutné dávat větší důraz na volbu typu, který bude používán.

Argon → Ar

Bezbarvý plyn s malou reaktivitou. Jedná se o plyn bez chuti, zápachu a je těžší než vzduch. Má malou tepelnou vodivost a nízkou ionizační energii, a proto usnadňuje zapálení i stabilizaci oblouku. Tvoří asi 1% zemské atmosféry. Výroba argonu se provádí frakční destilací kapalného vzduchu po odstranění kyslíku a dusíku. Argon bohužel obsahuje nežádoucí prvky jako jsou N, O, H a vzdušnou vlhkost, a to má špatný vliv na kvalitu svarových spojů. Pro svařování se vyžaduje argon vysoké čistoty, minimálně v rozmezí 99,7 – 99,999 %. Při volbě plynu je třeba brát zřetel na kvalitu základního a přídatného materiálu. Obecně platí pravidlo, že čím kvalitnější svařovaný materiál, tím se musí volit čistější plyn.

Helium → He

Bezbarvý plyn, bez chuti a zápachu, chemicky zcela inertní. Patří mezi vzácné plyny a jedná se o druhou nejvíce zastoupenou složkou vesmírné hmoty. Helium se získává z ložisek zemního plynu. Od metanu a dalších plynů se odděluje frakční destilací.

Svařovací proudy

Stejnoseměrný proud

Jedná se o základní zapojení při svařování metodou TIG. Elektroda je připojena na záporný pól zdroje a základní materiál je připojen na pól kladný. Jde o přímou polaritu. Rozložení tepla svářecího oblouku je nerovnoměrné a to 1/3 připadá na svařovací elektrodu a 2/3 jsou přenášeny do základního materiálu. Výhodou tohoto způsobu je méně tepelně zatížená elektroda, přičemž svarová lázeň má vysokou hloubku závaru. Použití stejnosměrného proudu umožňuje svařování všech typů ocelí, niklu, mědi, titanu a jejich slitin. Pro svařování hliníku tímto proudem je nutné použít ochrannou atmosféru směsi argonu a minimálně 75% helia. Využívání nepřímé polarity zapojení je takřka nulová z důvodu vysokého tepelného zatížení elektrody.

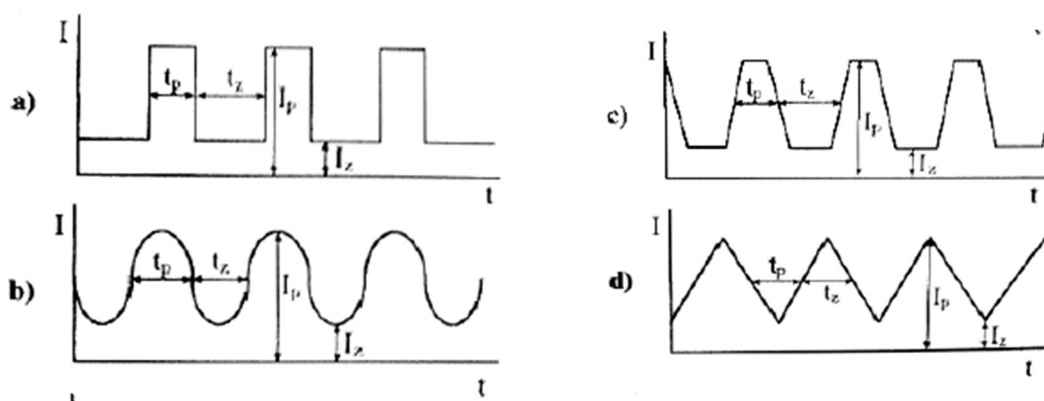
Střídavý proud

Tento způsob svařování se používá pro dobrý čistící účinek. Při připojení elektrody na kladnou polaritu, je tento způsob vhodný pro svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin. Svařování hliníku sebou nese zásadní problém a tím je vrchní vrstva oxid hliníkový Al_2O_3 . Tato vrstva chrání povrch hliníku před další oxidací. Al_2O_3 má vysokou teplotu tavení (2050 °C) a

pokud bychom použily stejnosměrný proud nedojde k metalurgickému spojení, protože Al_2O_3 pokrývá povrch taveniny hliníku a ta má teplotu tavení jen $658\text{ }^\circ\text{C}$.

Impulsní proud

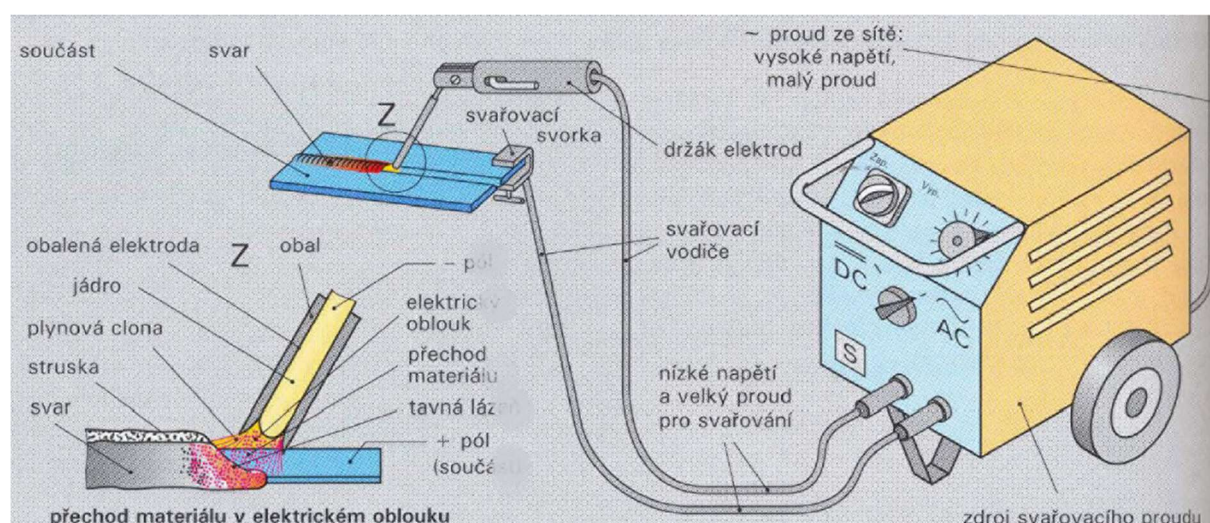
Svařování tímto druhem proudu je založeno na střídání intenzity proudu, která se mění pravidelně s časem mezi základním a impulzním proudem. Průběhy impulzního proudu můžou mít různé charakteristiky zobrazené na obr. 15.



a) pravoúhelníkový, b) sinusový, c) lichoběžníkový, d) trojúhelníkový
Obr. 15 Průběhy impulzního proudu [4]

2.1.3 Svařování MMA – (111) [4], [7], [10], [11], [12], [14], [16]

Metoda svařování elektrickým obloukem obalenou elektrodou. Stěžejním prvkem této metody je tzv. elektroda. Jde o ocelové jádro, na které je nanesen obal. Jádro elektrody je typizované na rozměry 1,6 2,0 2,5 3,2 4,0 5,0 6,0 mm. Elektroda je připojena na jeden pól zdroje pomocí svářečských kleští. Druhým pólem jsou zemní kleště, které připojujeme na svařovanou konstrukci. (obr. 16)



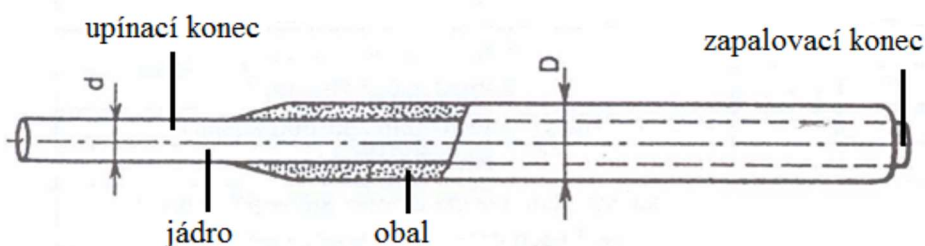
Obr. 16 Schéma svařování obalenou elektrodou [10]

Základní princip:

Oblouk se zapaluje při dotyku obalenou elektrodou a základního materiálu. Při vzniku oblouku dochází k vytvoření svarové lázně. Jádro elektrody pak tvoří nezbytnou složku přídavného materiálu. Při procesu chladnutí je svar chráněn povrchovou struskou. Po procesu chladnutí je doporučeno strusku mechanicky odstranit. Obloukové svařování obalenou elektrodou je typický proces pro ruční svařování. Obalená elektroda (obr. 17, 19) je vyráběna v předem stanovených délkách

(350-450 mm), to značí, že proces je často přerušován pro výměnu elektrody. Proto je tedy, z hlediska produktivity, tato metoda označována jako proces s nízkou

produktivitou. V poměru je pak produktivita hoření oblouku vyjádřena pouze mezi 20 až 60 % z celkového pracovního fondu.



Obr. 17 Obalená elektroda [4]

Oblast využití:

Obloukové svařování pomocí obalené elektrody bývá primárně používáno pro svařování nelegovaných, nízko legovaných i vysoce legovaných materiálů při tloušťce od 2 do 50 mm. Technologie se využívá zejména pro svařování ocelových konstrukcí, potrubí (obr. 18), tlakové nádoby nebo v lodním průmyslu.

Výhody metody svařování elektrickým obloukem obalenou elektrodou – (111)

Svařovací zařízení je relativně jednoduché a přenosné. Svařování nevyžaduje externí přívod plynů pro ochranu svarové lázně, tu zajišťuje plynotvorná funkce obalu potažmo struska na povrchu svaru. Výrobní proces je relativně odolný vůči povětrnostním vlivům, odfouknutí ochranného plynu. Svařování lze provádět v různých i stísněných polohách. Metoda dovoluje svařovat různé i různorodé materiály, jako běžné oceli, austenitické oceli, litiny, hliníkové slitiny atd.



Obr. 18 Svařování potrubí metodou 111 [16]

Nevýhody metody svařování elektrickým obloukem obalenou elektrodou – (111)

Strusku je třeba, po dokončení svaru, mechanicky odstranit. Snížená produktivita práce pro časté měnění elektrod. Vysoké vnesené teplo. Nemožnost použití metody na svařování reaktivních prvků, jako zirkonium, tantalum, titanium pro možnost reakce s kyslíkem.

Druhy obalů elektrod:

Bazický obal → svarový kov této elektrody obsahuje nízký obsah difuzního vodíku, to má vliv na vrubovou houževnatost při snížených teplotách a malou náchylnost k trhlinám za tepla i za studena. Bazický obal umožňuje svařovat vyšší rychlostí a má tudíž větší výkon navařování hlavně v polohách zdola nahoru. Struska se vyznačuje horší odstranitelností. Obal je dále velmi citlivý na vlhkost a výrobce udává podmínky pro uskladňování a přesušování elektrod. Základ obalových směsí tvoří hlavně z uhličitany, jako vápenec, mramor, křída. Dezoxidace se provádí ferosiliciem a ferotitanem. V současné době jde o elektrody s nejpoužívanějším obalem. Využívají se ke svařování tlakových nádob, konstrukcí, stavbě lodí apod.



Obr. 19 Obalené elektrody [14]

Rutilový obal → díky obalu dochází ke snadnému zapalování oblouku a je vhodný ke zhotovení krátkých svarů. Rozstřík svarového kovu bývá minimální a plocha svaru hladká. Tyto elektrody jsou snadno ovladatelné v různých polohách a struska je snadno odstranitelná. Svarový kov má hustou konzistenci a rychle tuhne, proto umožňuje překlenutí větších mezer při nedokonalé přípravě. Obal má relativně dobrou odolnost vůči vlhkosti. Základem je oxid titaničitý tedy rutil. Ve spolupráci se silikáty, uhličitany a jinými vhodnými přísadami, vytváří obal strusku s velice kvalitními redukčními a fyzikálními vlastnostmi. Pro nízkou hloubku záváru není vhodná pro svařování silných plechů a tlakových celků.

Kyselý obal → zapalování oblouku je snadnější než u bazické, ale obtížnější než u rutilové. Povrch kovu je lesklý a hladký a struska snadno odstranitelná. Kov i struska jsou poměrně tekuté, a proto nejsou vhodné pro svařování v polohách. Vyznačují se velkým svářecím výkonem, velkým závarem a oblouk je tedy velice teplý a stabilní. Obal obsahuje oxidy železa. Dezoxidace se provádí feromanganem.

Funkce obalů elektrod

Plynotvorná → při svařování se z obalu uvolňují plyny a kouře, které tvoří ochranou atmosféru a zabraňují přístupu kyslíku a dusíku k místu svarové lázně. Tato výhoda zlepšuje plastické vlastnosti svarového kovu.

Ionizační → tato funkce usnadňuje zapálení a hoření oblouku.

Metalurgická → zajišťuje ochranu před propalováním některých prvků při průchodem elektrickým obloukem. Jedná se hlavně o mangan, chrom a křemík.

2.2 Svařitelnost austenitických ocelí [12], [17], [18], [19], [20], [21], [29]

Jde o jednu z nejdůležitějších vlastností u většiny kovových materiálů. Svařitelností rozumíme vytvoření kvalitního nerozebíratelného spoje, svaru. Ve většině případů je tato vlastnost chápána jako metalurgická.

Oceli s vysokým obsahem legujících prvků jako je chrom, nikl, mangan, molybden apod. jsou jedny z nejpoužívanějších konstrukčních materiálů. Dělíme je na dvě hlavní skupiny, feritické a austenitické oceli. Vlastnosti ocelí jsme schopni regulovat výše zmíněnými prvky. Hlavní vlastnosti jsou odolnost proti korozi, žáruvzdornost, žárupevnost a z fyzikálních vlastností například modul pružnosti nebo svařitelnost.

Mezi austenitotvorné prvky patří nikl a mangan s uhlíkem. Mezi feritotvorné prvky patří chrom, křemík a molybden.

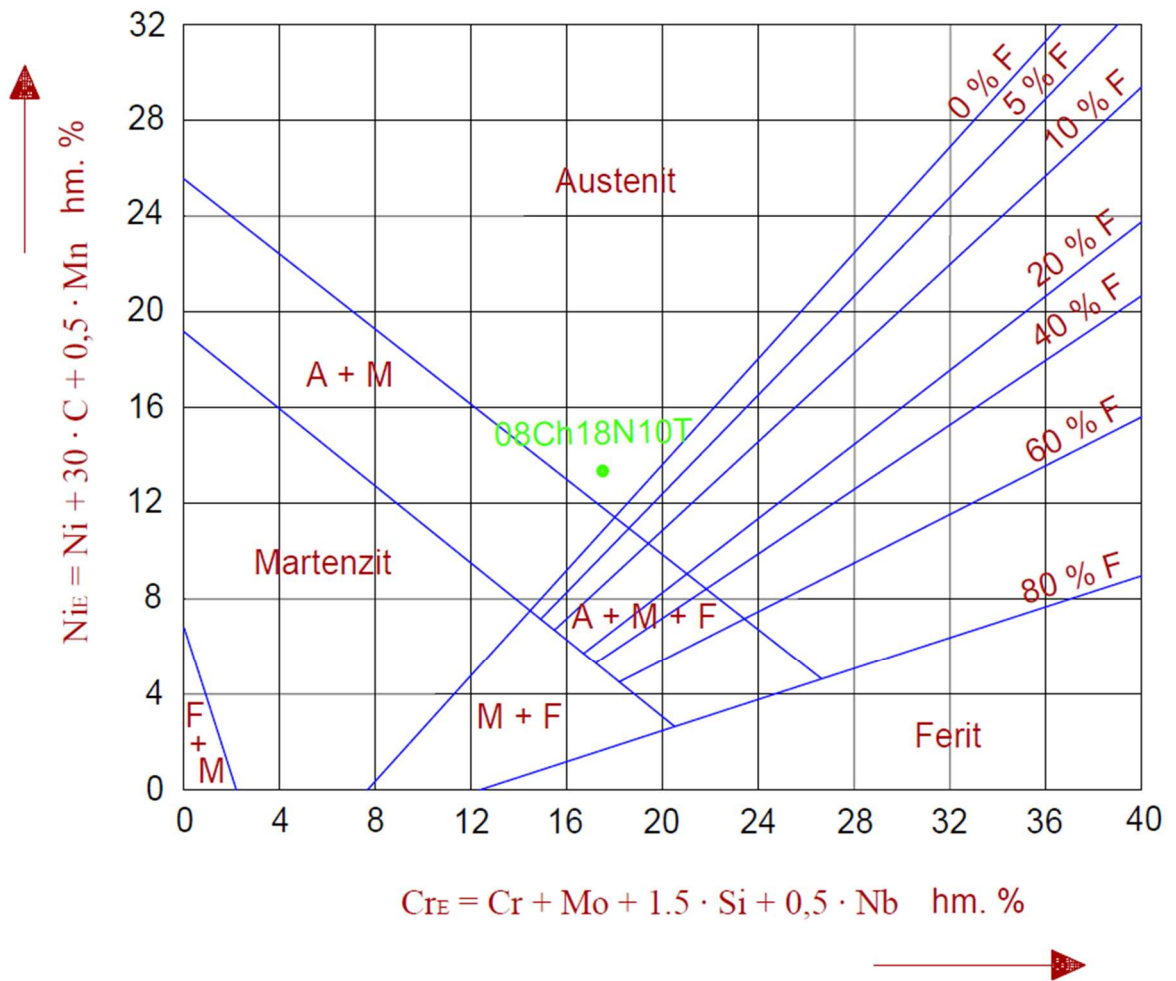
Vliv vybraných prvků na kvalitu a vlastnosti austenitických ocelí:

- Chrom → Zvyšuje prokalitelnost, pevnost v tahu, schopnost pasivace (min. 11,5 % Cr) a odolnost proti korozi.
- Nikl → Zvyšuje korozní odolnost, stabilizuje austenit při normálních teplotách. Je druhým nejdůležitějším prvkem. Bývá nahrazován manganem pro svoji vysokou cenu.
- Mangan → Snižuje náchylnost k praskání svarů. Zhoršuje obrobitelnost oceli.
- Dusík → Silně austenitotvorný prvek. Zvyšuje hodnoty pevnosti a ve spolupráci s molybdenem zvyšuje odolnost proti korozi.
- Molybden → Zvyšuje korozní odolnost ve všech prostředích a žárupevnost. Jako feritotvorný prvek potřebuje kombinaci např. s niklem.
- Křemík → Způsobuje praskavost svarů. Při obsahu 3-4 % snižuje náchylnost proti korozi.
- Měď → Zlepšuje korozní odolnost a obrobitelnost. Je součástí legování vytvrditelných ocelí.
- Niob → Má vysokou afinitu k uhlíku tudíž tvoří v oceli karbidy. Snižují tím obsah uhlíku v matici a upevňují stabilizaci ocelí.

Konečná struktura materiálu je odvislá na vzájemném poměru a množství jednotlivých prvků. Pro možnost posouzení strukturních změn, které probíhají při svařování navrhl v roce 1949 pan Schaeffle strukturní diagram (obr. 20). Dle tohoto diagramu je patrné, že největší vliv na strukturu kovu po svařování má chrom a nikl. Jaký je další účinek ostatních prvků se vyjadřuje jako ekvivalent chromu a niklu (Cr_E a Ni_E). Ekvivalenty stanovují, zda je struktura oceli martenzitická, feritická nebo austenitická.

Materiálem zkoumaným v experimentu byla 08Ch18N10T což je vysoce legovaná austenitická ocel. V obr. 20 je vyznačeno umístění této oceli.

Pro zpřesnění Schaefflerova diagramu se užívá De Longův diagram (obr. 21). Pan De Long zařadil do výpočtu Ni_E další významně austenitotvorný prvek, dusík. Tento diagram je možné použít pro austenitické Cr-Ni oceli s dusíkem. Má dostatečnou přesnost pro určení mikrostruktury s obsahem feritu v rozmezí 0-15 %. Ale není vhodný pro oceli s vyšším obsahem manganu. Zjišťované množství feritu odpovídá materiálu s cca 1 hm. % manganu. Když došlo k optimalizaci magnetometrických metod měření množství feritu, byl DeLongův diagram přepracován tak, aby zobrazoval tzv. Feritové číslo (FN) místo množství feritu v procentech.



Obr. 20 Schaefflerův strukturní diagram [17]

Svařitelnost závisí na mnoha faktorech.

Těmi hlavními jsou: Způsob provedení svaru; chemické složení základního a přídavného materiálu; struktura materiálu, z které vyplývají pevnostní vlastnosti a silové procesy, probíhající při svařování; používané parametry; tvar a rozměr svaru.

Obecně rozeznáváme tyto druhy svařitelnosti, přenesené z vyjádření výrobců:

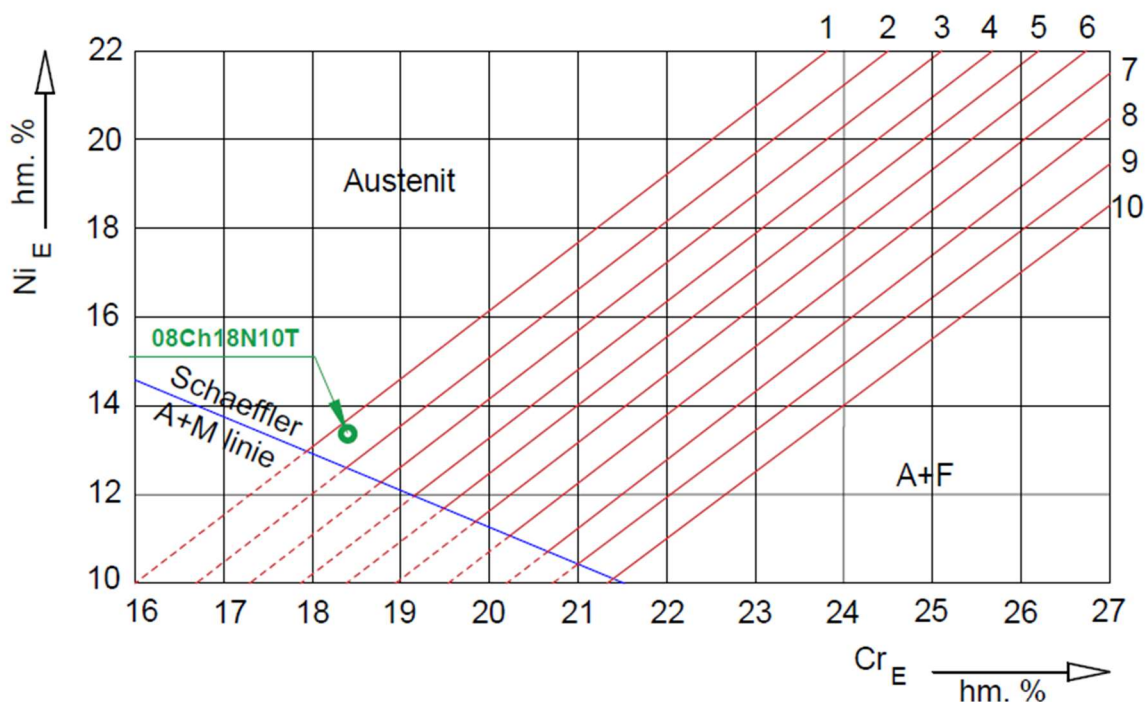
Zaručená → Svařitelnost bez povinnosti dodržení předem daných, podmínek.

Podmíněná → Svařitelnost při dodržení předem určených podmínek (např. předehřev)

Dobrá → Svařitelnost nezaručená, ale svarový spoj vykazuje vyhovující jakost.

Obtížná → Svařování materiálu se nedoporučuje. Svařování pouze při opravách a za dodržení předem ověřených podmínek.

Materiály vhodné ke svařování nezjistíme např. pomocí výpočtu uhlíkového ekvivalentu, jako to lze u nelegovaných ocelí. Pro chromniklové austenitické oceli není tento výpočet zatím stanoven, ale pokud jsou dodržena základní pravidla, jako: svařovací postup, druh ocelí a její zpracování, je svařitelnost velmi dobrá. Tyto oceli lze svařovat všemi běžnými způsoby a nejsou třeba dodržovat žádné speciální požadavky. Oproti feritickým ocelím mají austenitické o cca 50 % větší tepelnou roztažnost a také asi o 30 % menší tepelnou vodivost. Při svařování jsou tyto vlastnosti zřejmé ze vzniku větších deformací a napětí. Pro svoji strukturu mají austenitické oceli vyšší tažnost a vrubovou houževnatost než běžné oceli.



Číslo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F [%]	0 %	2 %	4 %	6 %	7,6 %	9,2 %	10,7 %	12,3 %	13,8 %	
FN	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18

Obr. 21 De Long diagram [17]

Svařitelnost ovlivňují tři zásadní faktory:

Náchylnost ke tvorbě teplých trhlin

Je ovlivňována prvky: S, P, Si, Ti, Nb. Snižují plastické vlastnosti kovu při tuhnutí a zároveň mohou vytvářet nízko tavitelná eutektika v kombinaci s prvky Fe a Ni. Eutektika omezují pevnost hranic zrn. Vliv těchto prvků je třeba eliminovat. Nižší obsah síry se docílí vazbou k manganu. Ten vytváří se sírou sloučeninu MnS, která se vylučuje ve formě strusky. Vliv fosforu je možné snížit rozpustností v δ -feritu. Obsah křemíku omezuje na maximální hodnotu 0,5 hm. %, doporučeno je však pouze 0,3 hm. %. Obsah titanu a niobu se omezuje na množství nutné pro stabilizaci oceli.

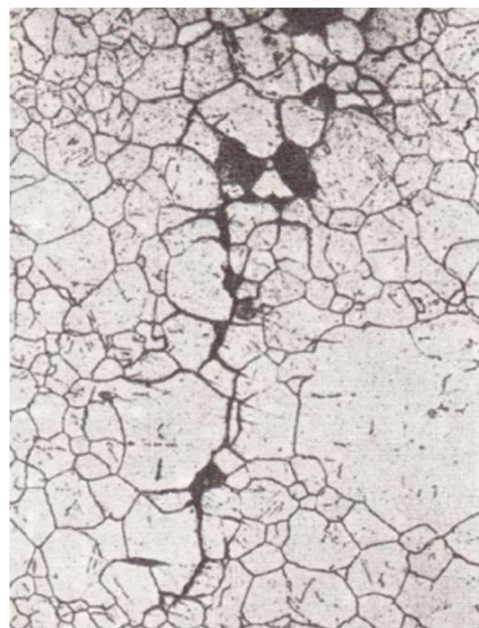
Nejdůležitější pobídkou pro snížení náchylnosti je strukturní obsah δ -feritu. Po svařování je, při teplotě cca 20 °C, ve smíšených kovech vyžadován obsah δ -feritu 2–6 hm. % a v základních materiálech kolem 3 hm. %. Větší množství vede ke snížení antikoročních vlastností ocelí. Nízká úroveň δ -feritu při normálních teplotách odpovídá přibližně 10-ti násobku obsahu, který vzniká při tuhnutí kovu. Při chladnutí se rozpustnost niklu v δ -feritu snižuje a δ -ferit se přeměňuje na austenit. Množství δ -feritu se ve struktuře, při normálních teplotách, zjišťuje

metalograficky – plošně nebo magnetometricky – objemově. Dnes je větší důraz kladen na magnetometrickou metodu. Tato vede k použití tzv. Feritového čísla – FN. FN odpovídá objemového podílu δ -feritu ve struktuře.

Mezikrystalová koroze (MKK)

Vznik MKK (obr. 22) je zapříčiněn vznikem karbidů chromu a nitridů na hranicích zrn austenitu. Vyskytuje se převážně v tepelně ovlivněné oblasti svaru. Pásmo, kde vzniká MKK se nazývá zcitlivění, při teplotách 425-815 °C. Výzkum MKK se zabýval několika teoriemi vzniku:

- Teorie ochuzení → Množství chromu klesá při vylučování karbidů v povrchové vrstvě na hranicích zrn. Oslabená vrstva není schopna důkladné pasivace a vzniká koroze.
- Teorie pnutí → V místech vylučování sekundární fáze vznikají velké energetické rozdíly. Tyto rozdíly jsou iniciovány vznikajícím vysokým pnutím, to se opět projevuje nízkou pasivací a následnou korozi na hranicích zrn.
- Teorie článků → Místní články vznikají vlivem rozpouštění rozhraní zrn. Tato teorie udává, že ve většině případů ušlechtilější karbid nebo nitrid funguje jako katoda a ostatní okolní obvyčejnější materiál jako anoda. Na rozhraní těchto dvou materiálů se předpokládá článek, v němž ušlechtilější okolí velmi koroduje.



Obr. 22 Mezikrystalová koroze [21]

Všechny teorie mají společný atribut vzniku MKK a tím je precipitace karbidu a nitridu chromu. Řada činitelů ukazuje, že potlačením vzniku precipitace je možné zvýšit odolnost proti MKK. Tyto činitele dělíme do následujících skupin:

- Chemické složení oceli → Na MKK a zcitlivění austenitické oceli má velký vliv působení uhlíku. Usnadňuje vznik karbidů na hranicích zrn. Tento vliv snížíme redukcí množství uhlíku pod 0,02 hm. %, poté MKK nenastává.
- Čas žhání → Při ohřevu austenitické oceli probíhají dva děje, které mají vliv na strukturu materiálu. Jeden MKK posiluje a druhý oddaluje. Oba děje jsou zcela závislé na teplotě a rychlosti ohřevu. Pokud na materiál působí nižší teploty působí první děj, pokud je materiál v oblasti vyšších teplot působí děj druhý. Nejcitlivější oblastí teplot je pro MKK žhací teplota v okolí 650 °C. Tato teplota způsobuje nejrychlejší zcitlivění. Pokud by se jednalo o teploty nad nebo pod touto teplotou, časy pro stejné zcitlivění by byly mnohem delší.
- Stabilizace oceli → Cesta ke snížení obsahu uhlíku pod 0,02 hm. % je velice náročná. Tento problém řeší, přidání prvků do oceli, které mají větší afinitu k uhlíku než chrom. Mezi tyto prvky patří: titan, niob, tantal, atd. Prvky vytváří karbidy titanu, niobu nebo tantalu (TiC, NbC, TaC), tím snižují vznik karbidu chromu a zabraňují ochuzování hranic zrn o prvek chrom. Závažným poznatkem je, že karbidy TiC a NbC, precipitují v celém objemu zrn a ne jen na hranicích. Pro potřeby svařování austenitů se přídatné materiály legují niobem, který působí jako stabilizační prvek. Pro svoji vysokou afinitu ke kyslíku se ocel leguje titanem, ten ale během svařování rychle vyhořívá.

- Tepelné a mechanické zpracování
 - a) Žihání rozpouštěcí je považováno za výborné tepelné zpracování stabilizovaných ocelí. Při tepelných hodnotách tohoto tep. zpracování se uvolňuje uhlík z vazby chromových karbidů, a proto způsobuje jeho vazbu na karbidy stabilizačních prvků při žihání kolem 900 °C po nutně dlouhou dobu. Precipitaci karbidů chromu toto žihání zcela určitě nevyvolá, pouze karbidy titanu nebo niobu, které jsou mnohem jemnější a tvoří se v celém objemu zrn.
 - b) Regenerace struktury austenitických ocelí nastává při žihání na teplotě 650 až 700 °C po dobu kolem 1000 hodin. V tomto případě difunduje chrom a uhlík. Regeneraci lze urychlit předešlým tvářením materiálu za studena.

Fáze δ feritu a její vznik

δ ferit je křehká, tvrdá intermetalická sloučenina. Má přímý vliv na zkřehnutí austenitických ocelí. Vznikat může ve svarech v oblasti teplot 500 až 820 °C. Fáze δ je do teploty 820 °C stabilní a projevuje se hlavně při obsahu chromu větším než 10 hm. %. δ ferit má také rozhodující faktor k tvorbě teplých trhlin u austenitických ocelí.

Vznik δ feritu podporuje:

- Prvky podporující tvorbu feritu (Si, Al, Ti, Mo) – vyvolávají vznik α feritu, který je bohatší na chrom a snadněji se přemění v δ ferit.
- Prvky podporující růst karbidů (Ti, Zr, Nb, Ta) – dokážou posunout obsah chromu výše bráněním vazby chromu na karbidy
- přesycení chromem při rychlém ochlazení
- značné tvářením za studena
- únavové namáhání za tepla
- teplotní vliv ohřevu v kritické oblasti, ta umožňuje zrychlení difuze a tím vyšší množství vyloučeného δ feritu

Při svařování austenitů se používají přídavné materiály (PM) se stejným nebo podobným složením. Zvyklostí je volit PM s lepšími vlastnostmi a složením, než je základní materiál (ZM). Důležitým parametrem je požadované množství δ feritu ve svarovém kovu.

Svařovat lze takřka všemi běžnými metodami, ale nezbytné je zabezpečit dokonalou ochranu svarové lázně. Při procesu svařování není nutný předehřev, oceli nejsou kalitelné a náchylné na tvorbu studených trhlin pro vysokou rozpustnost vodíku.

Problémem je naopak náchylnost ke vzniku trhlin za tepla. Předejít tomu lze kontrolou tepelného příkonu (2.1) a teploty interpass. Snahou je nepřesáhnout $Q = 15 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ a interpass max. 150 °C.

$$Q = \frac{I \cdot U}{1000 \cdot v} [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (2.1)$$

kde: Q – tepelný příkon při svařování
 I – svařovací proud [A]
 U – svařovací napětí [V]
 v – rychlost svařování [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]

Teplotou interpass se rozumí mezi housenková teplota svaru, těsně před zahájením svařování další vrstvy u vícevrstvého svaru.

3 EXPERIMENT RUČNÍHO SVAŘOVÁNÍ PAROGENERÁTORU

[3], [22], [23], [24], [25], [26]

Experimentem této práce je kvalifikování vhodné opravy kolektoru teplosměnných trubek parogenerátoru. Toto potrubí slouží jako dělicí část primárního a sekundárního média jaderné elektrárny. Uvnitř trubek proudí primární voda z reaktoru, která má teplotu cca 297 °C a tlak 12,26 MPa. Vně trubek je sekundární voda, která se, při chlazení primární vody, mění na páru. Teplota páry, vystupující z parogenerátoru se pohybuje od 164 do 223 °C při tlaku 4,7 MPa. TS trubky i kolektory jsou z oceli 08Ch18N10T (tab.1, 2 a př. 1). Počet trubek je 5563 a mají rozměr $\varnothing 16 \times 1,4$ mm. Jsou zaústěny do horkého a studeného kolektoru, což jsou válcová tělesa zapuštěná do tělesa parogenerátoru. TS trubky mají tvar písmene U a ve stěně kolektoru jsou zaválcovány a z vnitřní strany přivařeny. Mezi kolektory mají TS trubky podpěrný systém, který udržuje TS trubky příčně i podélně a umožňuje dostatečnou teplotní dilataci včetně případných vibrací.

Tab. 1: Chemické složení oceli **08Ch18N10T** - hodnoty požadované normou [23], [24], [26]

Chem. složení	C	Mn	Si	P	S	Cu	Mo
hm. %	0,08	1,5	0,8	0,035	0,02	0,3	0,3
Chem. složení	Ti	Co	N	Ni	Cr	V	
hm. %	0,6	0,05	0,05	10-11,5	17-19	0,2	

Tab.2: Vlastnosti oceli **08Ch18N10T** [23]

Veličina	Značka	Jednotka	Hodnota při t 20 °C	Hodnota při t 300 °C
Pevnost v tahu	Rm	MPa	627	412
Smluvní mez kluzu	R _{p0,2}	MPa	272	227
Tažnost	A5	%	44	minimálně 26
Kontrakce	Z	%	55	52
Součinitel délkové teplotní roztažnosti	α_t	K ⁻¹	16,4·10 ⁶	17,4·10 ⁶

3.1 Zaslepování TS trubek [3], [4], [5], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28]

Nutnost zaslepování určí předešlé zkoušky. Jde o zkoušky porušení integrity TS trubek nebo zeslabení jejich stěny. Metody, kterými se zjišťují nevyhovující trubky, jsou bublinková zkouška těsnosti trubkového svazku a vířivé proudy.

- Bublinková metoda: Plášť PG se napustí stlačeným vzduchem (1,4 MPa) a kolektory demineralizovanou vodou s příměsí kyseliny borité. Výskyt netěsnosti je provázen únikem bublin, stoupajících k hladině. Lokalizace netěsnosti se provádí pomocí televizní kamery ve vodotěsném obalu.

- Vířivé proudy: Tento způsob měření nastiňuje tloušťku stěny zkoušené trubičky. Provádí se pomocí manipulátoru ZOK, měřicího a vyhodnocovacího modulu TEDDY (obr. 23) a vnitřní průchozí sondou typu BOBBIN (obr.24). Systém má možnost prověřit všechny trubičky v trubkovém svazku po celé délce, přičemž měření probíhá ze strany studeného i horkého kolektoru, pokaždé do poloviny délky trubičky.



Obr. 23 Modul TEDDY [4]

Výstup z měření zajišťuje systém pro analýzu dat TEDDY-EVA-GV. Software je určen zejména pro sběr a vyhodnocení dat z TS trubek parogenerátoru. Umožňuje kompletní analýzu zkoušených trubek. Software také dokáže zobrazení historických dat, generování reportu, zobrazení mapy vad, automatickou kalibraci, lokalizaci podpěrných prvků a zobrazení geometrie trubek.

Měření probíhá, dle dosavadních zkušeností, od koncového U ohybu až po konec upevnění v kolektoru. Sondy zkoušení jsou vodotěsné s centrováním. Tato vlastnost dokáže minimalizovat efekt oddálení. Optimalizovaný koeficient zaplnění 0,78 umožňuje měření s dobrou citlivostí při zachování průchodnosti trubkou. Všechny sondy splňují, z hlediska obsahu halogenidů, požadavky na materiály pro použití v radiačním prostředí jaderné elektrárny.



Obr. 24 Měřicí sonda [4]

Po vyhodnocení dat z měření jsou jasné určeny trubky s indikací. Ty jsou určeny k zaslepení. Zaslepování je nutné provést v obou kolektorech, aby došlo k úplnému oddělení poškozené trubky od sekundárního okruhu.

3.1.1 Postup zaslepení TS trubek [27]

Před započítím prací musí dojít k přesnému popsání souřadnic poškozené trubky. To je určeno na základě potvrzeného protokolu z vířivých proudů. Dle protokolu správce primárního okruhu zakreslí polohu trubek a schválí jejich zaslepení (obr. 25). Poloha místa zaslepování je popsána předem dohodnutým způsobem:

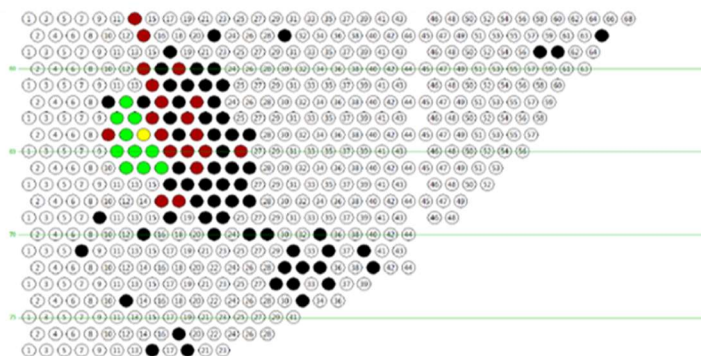
- Kolektory mají válcový tvar a TS trubky jsou zaústěny v jejich spodní polovině
- Pro identifikaci byl, již při výrobě, zaveden souřadnicový systém.
Trubky ve sloupcích se značí (S) a to vždy přes jednu řadu, neboť v řadách (Ř) jsou posunuty vždy o polovinu průměru trubky, než je řada pod i nad (obr. 25).
- Sloupce i řady jsou označeny vyraženým číslem vždy nahoře → u sloupců a po stranách → u řad (obr. 26)

V dalším kroku realizátor prací vytvoří dokumentaci svařování. Tato projde schvalovacím procesem, kdy dokumentaci zkontrolují a schválí jednotlivé skupiny odborníků, zainteresovaných ve schvalovacím procesu.

V rámci zahájení prací, realizátor provede sestavení a kontrolu manipulátoru ZOK i všech potřebných komponent. Po všech nezbytných kontrolách začíná samotný proces zaslepení TS trubek. Tento postup byl popsán v kapitolách 2.1.1 a 2.1.2.

V průběhu realizace prací jsou všichni zúčastnění povinni postupovat dle schváleného Typového technologického postupu - TTP a všechny splněné úkoly zaznamenat do Plánu kontrol a zkoušek - PKZ.

Po dokončení všech činností, týkajících se opravy, proběhnou všechny předepsané zkoušky a testy, dle PKZ. Výstupem zkoušek a testů je protokol. Pokud jsou všechny protokoly vyhovující, je možné přistoupit ke tvorbě Konečné zkoušky – KZ. Součástí KZ jsou všechny části dokumentace (TTP, PKZ, WPS, výkresy, rozpiska materiálu, záznamový list o svarech, protokoly zkoušek, atesty a certifikáty a pověření). Pokud KZ splňuje všechny předpoklady a je formálně v pořádku, následuje několika stupňová kontrola. Správnost se potvrzuje podpisy. Poté je možné zařízení uvolnit do provozu.



Obr. 25 Označení trubek v kolektoru [27]



Obr. 26 Označení sloupce trubek

3.2 Zjištění indikací v PG [27]

Dne 7.7.2019 započaly práce na zaslepení TS trubek na parogenerátoru PG26. V původním plánu bylo rozhodnuto o zaslepení 10-ti TS trubek, které byly nevyhovující po kontrole vířivými proudy. Těsně před realizací byl počet TS trubek navýšen na 20 kusů. Došlo k tomu inženýrským rozhodnutím, které tak učinilo po zjištění stavu již zaslepených TS trubek v PG26. V průběhu let se totiž ve spodní části kolektoru vytvořila oblast zaslepených TS trubek (obr. 25). Inženýrské rozhodnutí určilo preventivně zaslepit dalších 10 TS trubek, které byly v dotčené oblasti.

Během provádění svařování byl zjištěn proud vody vytékající tlakem ze svaru trubky na pozici S14/Ř64 (obr. 27), která se nalézala v bezprostřední blízkosti svařované trubky. Zaslepovací práce byly zastaveny a porada vedení rozhodla o následujícím postupu. Další TS trubky se zaslepi dle plánu a poškozená bude opravena. Oprava byla provedena odvrtáním a vytažením staré záslepky. Na stejné místo byla vložena nová záslepka a zavařena těsnícím svarem (obr. 28). Pro odstranění vrchní vrstvy, zbytku původního svaru, bylo použito vrtáku $\varnothing 24$ mm. Proto byla zátka a svar mírně utopen pod úroveň kolektoru. Po zavaření zátky proběhly všechny běžné kontroly (nepřímá vizuální kontrola), ale při provádění zkoušky těsnosti pomocí bublinkové metody (LTB), byla zjištěna netěsnost ve stejném místě, jako při prvním zjištění (obr. 29). Nevyhovující LTB zkouška ukázala nedokonale zavařený těsnící svar, proto došlo k opětovnému převaření tohoto svaru. Tato oprava, bohužel neprošla vizuální zkouškou. V závislosti na možnosti opravit svar dvěma převařeními, byl svar převařen znovu. V následujících dnech proběhly kontroly nepřímá vizuální, těsnosti trubek, LTB a aktivita sekundárního média. Všechny s vyhovujícím výsledkem.



Obr. 27 Zjištěná netěsnost [27]

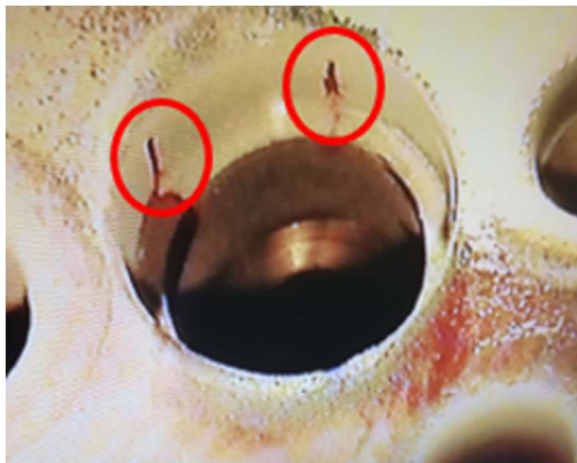


Obr. 28 Oprava č. 1 [27]



Obr. 29 Bublínková netěsnost [27]

Při náběhu bloku byl signalizován přítomnost nepřijatelného množství radioaktivních izotopů v sekundárním médiu. Blok byl znovu odstaven a dochlazen. V průběhu kontrol, které po odstavení následovaly, bylo zjištěno, že netěsnosti nejsou ve svaru zátky na pozici S14/Ř64,



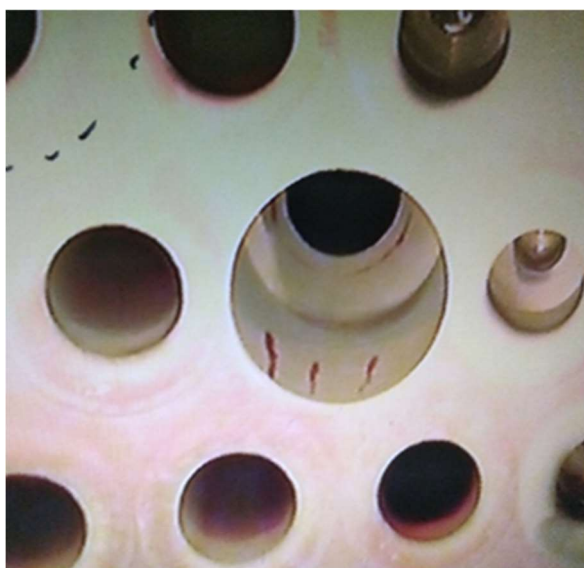
Obr. 30 Indikace po PT [27]



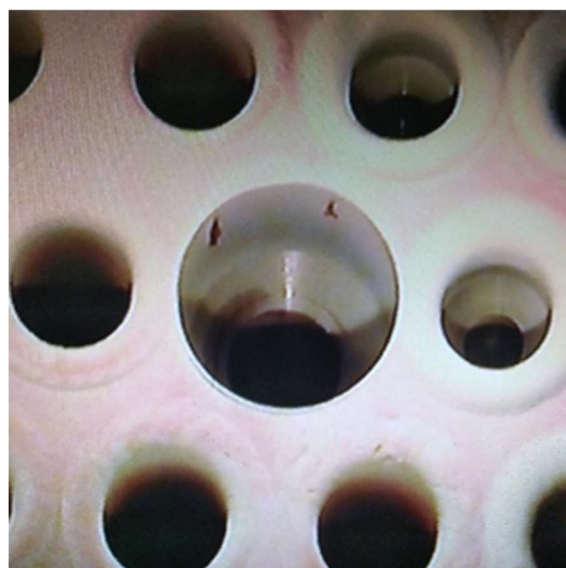
Obr. 31 Indikace po PT [27]

ale v okolí svaru, můstku mezi zátkami.

Opravy postupovaly opětovným odvrtáním zátky a provedením kapilární kontroly (PT) poškozeného místa. (obr. 30 a 31) V horní a dolní části otvoru, po zátce, se zobrazilo 5 indikací. Indikacemi byly trhliny v základním materiálu kolektoru.



Obr. 32 Indikace po PT \varnothing 24 mm [27]



Obr. 33 Indikace po PT \varnothing 24 mm [27]

Jedna z možností, jak opravit poškozenou zátku, je převrtání otvoru na \varnothing 24 mm a vložení atypické, velké zátky (příloha 2). Při použití velké zátky je nutné nejen předvrtat větší díru, čímž odstraníme větší množství materiálu, ale i přenastavit svařovací program a změnit i nastavení svářecí elektrody. Proto bylo rozhodnuto pro provedení opravy vložení větší zátky. Po odvrtání otvoru \varnothing 24 mm byla provedena kapilární kontrola otvoru a jeho okolí. Výsledek ukázal, že k odstranění dříve indikovaných trhlin, nedošlo (obr. 32 a 33).

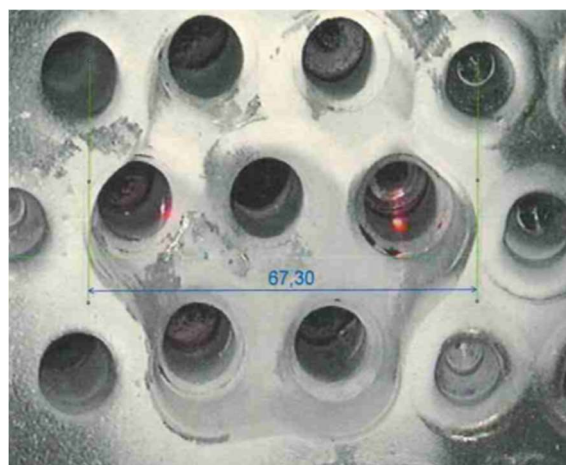
3.3 Ruční oprava kolektoru [5], [27]

Vyhodnocení výsledků jasně ukázal, že další postup prací bude muset pokračovat, už za přímé účasti pracovníků v kolektoru. Doposud se veškeré práce a kontroly odehrávaly za pomoci manipulátoru ZOK. Indikace v tělese kolektoru neodstranilo ani odvrtání díry s větším průměrem. Proto se přistoupilo k ručnímu vybrušení míst s indikacemi. Vybrušování probíhalo s ohledem na okolní trubičky a výsledkem byl tvar zakulaceného šestihranu (obr. 34 a 35). Při odstraňování indikací broušením proběhlo několik kapilárních kontrol, u kterých bylo kritériem vybrušený kov bez indikací.

Ruční práce v kolektoru sebou nesla řadu problémů a důkladných příprav. Nejprve začala důkladná dekontaminace kolektoru, kterou prováděli pracovníci radiační kontroly ČEZ.



Obr. 34 Vybrušená plocha [27]



Obr. 35 Vybrušená plocha [27]

Pracovníci provedli kompletní ostřík kolektoru dekontaminačním roztokem a měřily hladinu kontaminace. Tuto činnost opakovali několikrát. Radiační situace, poté, byla mnohem příznivější než na počátku.

Ve stejném čase probíhala, v pracovní hale Heřmanice, u firmy Škoda JS, příprava a nácvik oblékání, vstupování, vystupování a manipulace pracovníků (obr. 36), kteří budou provádět pracovní operace uvnitř kolektoru. Příprava a nácvik spočíval v tom, že bylo třeba připravit kompletní vybavení, které si pracovníci nejen obléknou, ale i budou používat. Pracovník může vstoupit do kolektoru pouze pokud má na sobě několik vrstev ochranného oblečení. Dále musí být pevně spojen s venkovním prostředím, což zajišťuje úvazkový postroj, který je spojen lanem k navijáku, a ten umožní spouštění a vyzdvihování pracovníka nebo nouzové vytažení v případě pracovníkovi nevolnosti.



Obr. 36 Nácvik přípravy pracovníků

Jedním z nejdůležitějších ochranných prostředků je ochrana dýchání. Ta byla zabezpečena přívodem stlačeného vzduchu do dýchací masky hadicí vedoucí mimo prostor PG. Při ostrém provozu budou přívod vzduchu zajišťovat a kontrolovat hasiči ze záchranného sboru elektrárny. Přípravy byly důkladné a bylo potřeba i některé části výstroje upravit (obr. 37) dle potřeb a možností. Příkladem může být svářečská kukla, kterou svářeči, v původním stavu, nemohli

použit z důvodu stísněného prostoru v kolektoru. Původní kukla byla rozebrána a použit byl pouze samo zatemňovací panel, který byl připevněn na koženou masku, uzpůsobenou k nasazení na hlavu svářeče.

Neméně důležitým aspektem byl i nácvik pomocného personálu. Ti zajišťují veškerý servis pracovníkům před a po práci v kolektoru. Jakmile pracovník, který bude pracovat v kolektoru, vstoupí na plošinu, zbudovanou na PG, nesmí se již ničeho dotýkat. Vše včetně oblékání, vysvlékání, nasazování OOPP prostředků, za něj dělá podpůrný tým.

Jakmile bylo vedení zúčastněných firem spokojené s úrovní příprav a nácviku, mohlo se přikročit k samotnému výkonu pracovních činností v kolektoru. Vše bylo znovu vyzkoušeno a překontrolováno. Začaly práce na vybrušování indikací v kolektoru.

Odstranění indikací se provádělo pomocí ručních brusek. Výsledkem byl vybrušený útvar ve tvaru zakulaceného šestihranu (obr. 34 a 35) o hloubce cca 20 mm. Tento tvar byl vytvořen, aby došlo k co nejmenšímu narušení okolních trubiček a okolních můstků.



Obr. 37 Upravená maska

3.4 Kontrolní svarové spoje [27], [28], [33], [34], [35]

Oprava na kolektoru PG byla nejen jedinečná, ale i velice náročná a nákladná. Pro první případ, jedinečnost, bylo nutné předem důkladně vyzkoušet a prověřit způsob, jakým bude oprava provedena. K tomuto zkoušení existuje nástroj pod názvem Kontrolní svarový spoj – KSS. Jde o pracovní postup, při kterém se provádí svařovací operace dle předem přesně stanoveného postupu. Svařování se provádí na vzorcích a v prostředí, které co nejvíce simulují skutečnou opravu. Vzorky se svaří a poté prověří všemi dohodnutými kontrolami, potřebnými pro konkrétní způsob opravy. Po celou dobu provádění KSS jsou přítomni pracovníci realizátora (ŠJS), odběratele (ČEZ) i autorizované osoby (TÜV). V případě, že všechny kontroly prováděné v rámci KSS skončí s vyhovujícím výsledkem, používá se jako podklad pro opravu a jako kvalifikace, umožňující opravu provést. K získání kvalifikace pro opravu PG bylo potřeba uskutečnit 5 KSS.

Průběh KSS:

- Realizátor připraví, vytvoří kompletní průvodní dokumentaci k provedení KSS:
 - Program KSS (příloha 3) → základní popis, včetně norem a vyhlášek, dodavatele, metod svařování, jmen svářečů, ZM, PM, zkoušek NDT a laboratorních zkoušek.
 - PKZ → Plán kontrol a zkoušek → Seznam prováděných operací, které vyžadují vyhodnocení nebo potvrzení.
 - pWPS (příloha 4) → předběžná specifikace postupu svařování.
 - Výkres (příloha 5).
- Odběratel (ČEZ, a.s.) prověří celou složku schvalovacím procesem. Tím je myšleno, že složku překontroluje a schválí předem určená skupina odborníků odběratele.

- Příprava vzorků → dle normy nebo smlouvy, realizátor připraví potřebný počet vzorků, veškeré přípravky a pomůcky potřebné k realizaci.

- Výběr personálu → na provedení KSS je třeba nachystat dostatečný počet svářečů, kteří disponují potřebnými certifikáty a jmenováními, NDT pracovníků, kteří jsou dostatečně vyškoleni k provádění předepsaných zkoušek a kontrolních pracovníků, kteří budou dohlížet na korektní průběh KSS.

- Provedení svářečských prací → svářeči dle pWPS zavaří vzorky. Pokud parametry na pWPS nevyhovují svařovacímu procesu, mohou si je změnit a použité zaznamenat.

- NDT → Po zavaření projdou vzorky sérií předem stanovených zkoušek. Dle výsledku se postupuje dále nebo svařování zopakuje.

V našem experimentu budou provedeny:

- Vizuální kontrola
- Rozměrová kontrola
- Kapilární kontrola

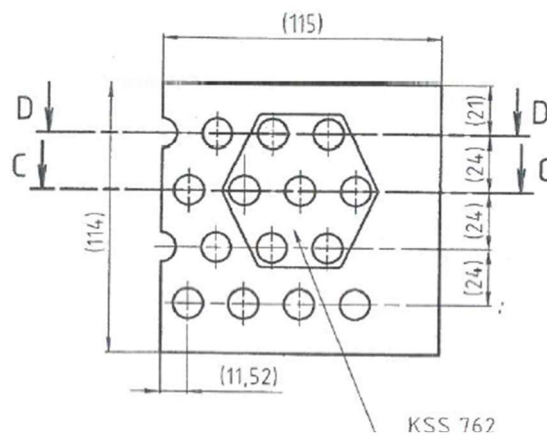
- Laboratorní zkoušky → Vzorky se podle rozřezového plánu (obr. 38 a 39) třískově rozdělí, popřípadě vybrousí. Takto připravené vzorky převezme zkušební laboratoř, která provede předepsané testy.

V experimentu bude požadováno:

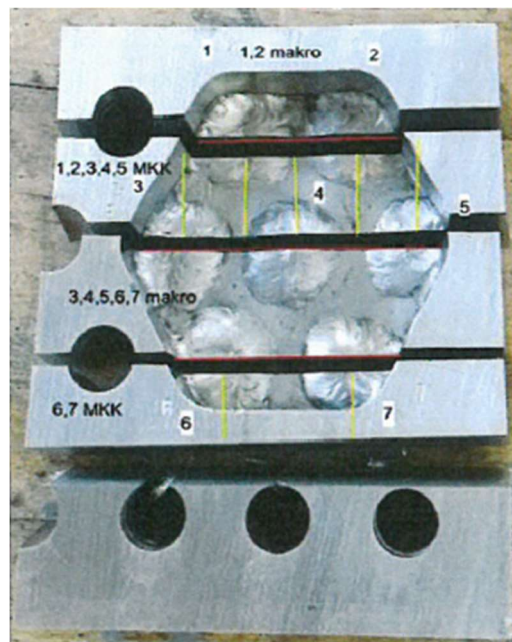
- Metalografická zkouška (makro)
- MKK → Zkouška mezi krystalové koroze

- Autorizovaná osoba (AO) → KSS se připravuje pro práci podléhající vyhlášce č. 358/2016 Sb. 12, odst. 2, písm. a, proto je nutná, po celou dobu průběhu KSS, přítomnost autorizované osoby. AO dohlíží na regulérní průběh KSS a vypracovává závěrečnou zprávu.

- Inspekční zpráva (IZ) → Závěrečný přehled o KSS včetně provedených zkoušek. IZ je již vypracována na konkrétního svářeče, který KSS prováděl. AO potvrzuje, že vše proběhlo dle požadavků.



Obr. 38 Rozřezový plán [33]



Obr. 39 Rozřezaný vzorek [33]

3.4.1 KSS 1 [28], [30], [31]

První kvalifikace spočívala v zaslepení TS trubek uvnitř vybroušeného prostoru pomocí záslepek, vyrobených z materiálu 1.4541 o tloušťce 3 mm. Záslepky byly přivařeny metodou 141 přídatným materiálem (PM) Sv-04Ch19N11M3 (příloha 6). Pokračováním bylo vyplnit zbytek výbrusu metodou 111 s PM FOX EAS-4M (příloha 7).

Celý experiment se prováděl v simulovaném prostředí, které bylo vytvořeno plechovým tubusem (obr. 40), tento simuloval prostor kolektoru (obr. 41). Tubus byl svitek plechu o průměru cca 800 mm a v dolní části měl vyříznutý otvor s poličkou, na kterou se umísťoval vzorek (obr. 42), na kterém svářeči a připraváři trénovali. Vzorek byl zhotoven tak, aby napodobil co nejvěrněji vybroušené místo v PG a byl vyroben z materiálu 08Ch18N10T.

Podstatou KSS 1 (KSS 760) bylo do děr ve vzorku, simulujících TS trubky, vložit ocelový plíšek (záslepku) tvaru mince, z materiálu 1.4541 (tab. 3, 4 a příloha 8).

Jedná se o austenitickou, chromniklovou ocel, stabilizovanou titanem. MKK odolává i po svařování, a to i bez tepelné úpravy. Ocel je schválena pro tlakové nádoby do 400 °C. Svařitelnost je dobrá všemi metodami vyjma plamenem.

V první fázi svařování byla těsnostním svarem záslepka přivařena ke vzorku metodou 141 (obr. 43), s použitím přídatného drátu Sv-04Ch19N11M3. Povrch zavařených záslepek se dále očistil a začala druhá fáze svařování, výplň obalenou elektrodou. V původním záměru se uvažovalo s elektrodou EA400/10T,



Obr. 40 Cvičný tubus



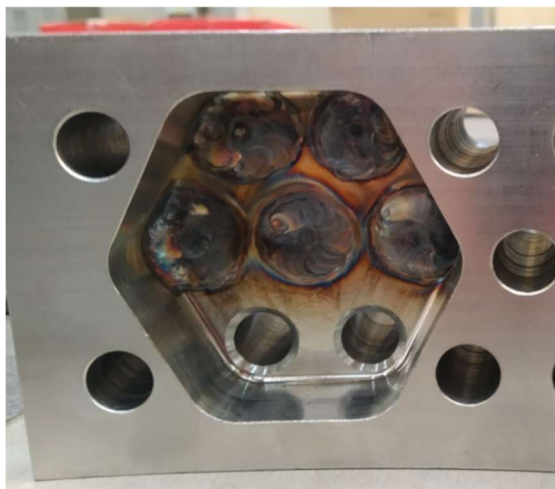
Obr. 41 Svářeč v tubusu



Obr. 42 Vzorek pro KSS [27]

Tab. 3: Chemické složení oceli 1.4541 - hodnoty pož. normou [23], [24]

Chem. složení	C	Cr	Ni	Mn	Si	S	P max
hm. %	≤ 0,08	17 - 19	9,0-12	≤ 2	≤ 1	≤ 0,03	0,045
Chem. složení	Ti		Mo				
hm. %	5xC - 0,7		< 0,8				



Obr. 43 1. fáze svařování KSS 760



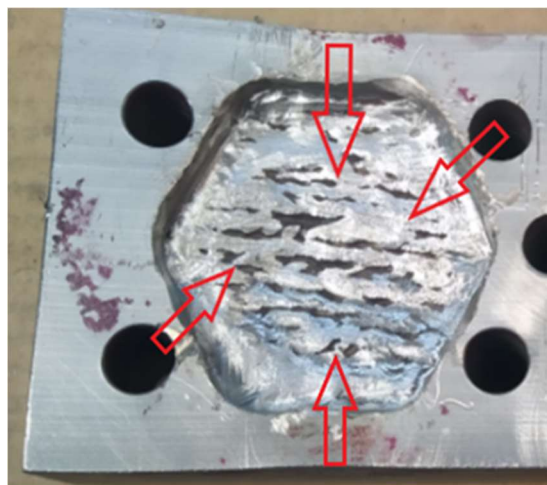
Obr 44 2. fáze svařování KSS 760

rutilovou elektrodou výrobce ŽAZ Vamberk, používanou již při výstavbě elektrárny. Pro svařování byla ale zvolena elektroda FOX EAS-4M (tab. 7 a 8), která má lepší svařovací vlastnosti než výše uvedená původní elektroda. Svařování metodou 111 probíhalo směrem od stěn ke středu. Nejprve došlo k vyplnění kritického místa, setkání dna se stěnou. Další kladení svarových housenek bylo již jen vyplňování středového prostoru (obr. 44).

Tab.4:Vlastnosti oceli 1.4541 [23]

Veličina	Značka	Jednotka	Hodnota při t 20 °C
Pevnost v tahu	Rm	MPa	500-700
Smluvní mez kluzu	R _{p0,2}	MPa	200
Tažnost	A5	%	40

Už v průběhu vyplňování výbrusu elektrodou, bylo patrné, že tato zvolená cesta není ta pravá. Tepelný příkon, přiváděný do materiálu, měl velký vliv na otvory kolem výbrusu. Začalo docházet ke smršťování materiálu směrem do středu výbrusu (obr. 45). Toto je velmi nežádoucí průběh. Deformace okolního materiálu by měly velký vliv na TS trubky a jejich zaústění v kolektoru. V nejhroším případě by mohlo dojít i k deformacím v můstcích mezi trubkami. Provedení vizuální kontroly po rozříznutí vzorku ukázalo další indikace. Tou byly výše zmiňovaná kritická místa, roh výbrusu. Ukázalo se, že svářeči nemají dostatečný prostor k provaření materiálu v kritickém místě (obr. 46). Červeně označené vady jsou nedostatečně odstraněná struska v prostoru rohu vzorku. Modře označené vady je také zavařená struska, ale v místě styku jednotlivých svarových housenek. Při provádění dalších KSS se již svářeči mnohem více zaměřovali na odstraňování strusky a čištění ve všech fázích svařování.

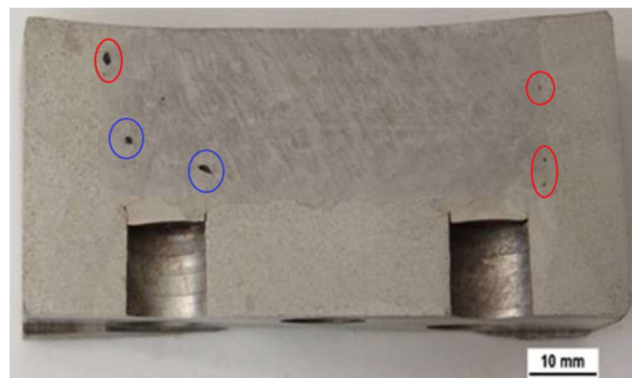


Obr. 45 Smrštění materiálu [27]

3.4.2 KSS 2 [27], [28], [30], [35]

Při provádění druhého KSS 2 (KSS 760/2) se již uvažovalo s menším vneseným teplem. Průběh svařování byl totožný s předešlou verzí, jen s tím rozdílem, že výplň elektrodou bude jen do výšky 7 mm ode dna výbrusu (obr. 47).

První fáze bylo zaslepení TS trubek záslepkou z austenitické oceli 1.4541 a tloušťce 3 mm. Svaření pomocí PM Sv-04Ch19N11M3 (tab. 5, 6 a příloha 6) metodou 141.



Obr. 46 Vady v rozřezu KSS 760 [27]

Tab. 5: Chemické složení PM Sv-04Ch19N11M3 - [Př. 6]

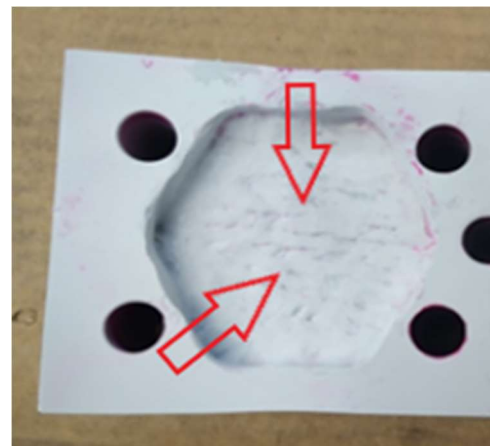
Chem. složení	C	Mn	Si	P	S	Cu	Mo
hm. %	0,046	1,5	0,55	0,009	0,013	0,026	2,47
Chem. složení	Ti	Co	N	Cr	V		
hm. %	0,018	0,014	0,05	18	0,01		

Druhá fáze byla částečná výplň výbrusu do výšky 7 mm ode dna pomocí obalené elektrody FOX EAS – 4M metodou 111.

Na obr. 48 se opět viditelné smrštění materiálu po účinku tepelného příkonu v materiálu.



Obr. 47 Řez KSS 760/2 [27]



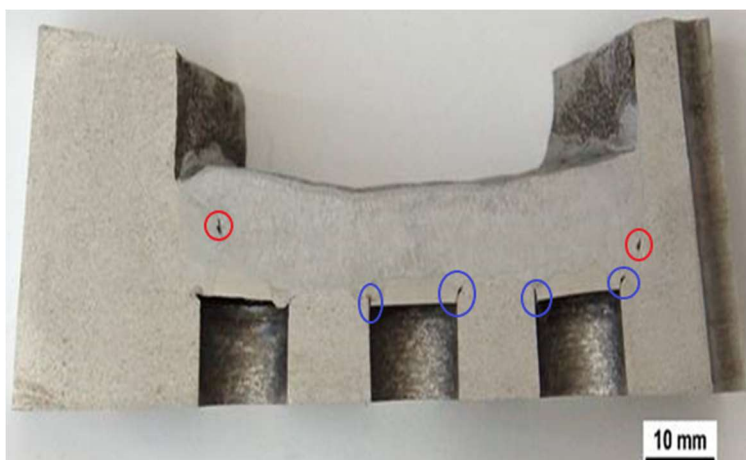
Obr. 48 Smrštění KSS 760/2 [27]

Tab.6: Vlastnosti PM Sv-04Ch19N11M3 [Př. 6]

Veličina	Značka	Jednotka	Hodnota po svařování
Pevnost v tahu	R _m	Mpa	392 - 441
Smluvní mez kluzu	R _{p0,2}	Mpa	245 - 274
Tažnost	A5	%	25
Kontrakce	Z min	%	40
Vrub. houževnatost	KCU2	J·cm ⁻²	49
Teplota	T	°C	20 - 350

Bližší kontrola rozříznutého vzorku ukázala převládající problém se zavařenou struskou v rozích výbrusu a mezi housenkami (obr 49 červená) a také problém s nedostatečným provařením záslepky z první fáze svařování (obr. 49 modrá). Tento problém není možné vyřešit, protože uzavřený kolektor znemožňuje kontrolu provaření záslepky z vnitřní strany.

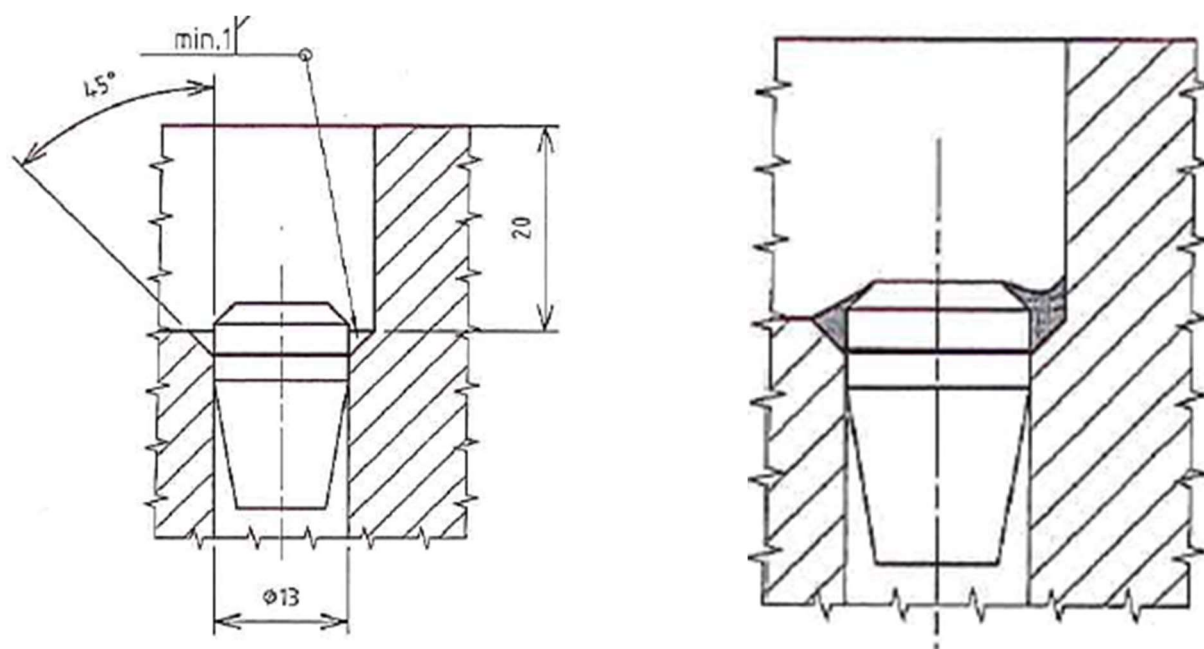
Pro předejití tohoto problému konstruktéři navrhli a začali zkoušet zcela jiný tvar záslepky.



Obr. 49 Vady v rozřezu KSS 760/2 [27]

3.4.3 KSS 3 [28], [30], [34]

Pro KSS 3 (KSS 761) byl navržen nový tvar záslepky. Tato záslepka – zátka, splňuje mnohem lépe než původní záslepka, parametry pro dostatečné provaření s materiálem kolektoru. Zátka má tvar plně kuželky a je z materiálu 08Ch18N10T (obr. 50).



Obr. 50 Zátka KSS 761 [34]

Při tomto KSS byla jen jedna fáze svařování, a to přivaření zátky ke kolektoru metodou 141 pomocí PM Sv-04Ch19N11M3. Provaření materiálu již bylo mnohem zdařilejší, ale zkoušky makrostruktury a mikrostruktury prokázaly, že ne ve všech případech bylo provaření dokonalé. Dále při těchto zkouškách vyšlo najevo, že prosté přivaření zátek ke kolektoru (obr. 51), nebude dostatečné z pevnostního hlediska. Konstrukteři museli přistoupit k vytvoření zátky, která by vyhovovala náročným požadavkům a museli propočítat tepelný příkon dodatečného svařování pro dostatečnou těsnost výbrusu.



Obr. 51 Řez KSS 761 [27]

3.4.4 KSS 4 [27], [28], [33]

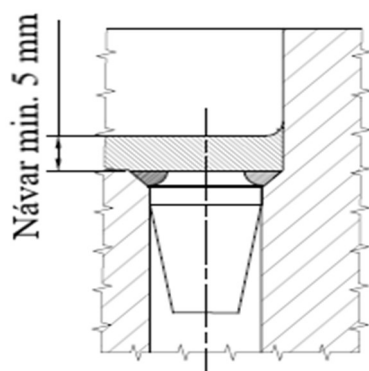
Čtvrtá možnost opravy (KSS 762) (obr. 52) spočívala v 1. fázi, v zavaření upravené vsazené zátky ke kolektoru těsnostním svarem, metodou 141 pomocí PM Sv-04Ch19N11M3. Ve 2. fázi následovalo vytvoření krycí vrstvy o síle 5 mm od dna výbrusu metodou 111 pomocí PM FOX EAS – 4M (tab. 7, 8 a příloha 7).

Tab. 7: Chemické složení PM FOX EAS - 4M - [Př. 7]

Chemické složení	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni
hm. %	0,03	0,8	0,8	18,8	2,7	11,5

Tab.8: Vlastnosti PM FOX EAS - 4M [32]

Veličina	Značka	Jednotka	Hodnota po svařování
Pevnost v tahu	Rm	Mpa	Tento600
Smluvní mez kluzu	R _{p0,2}	Mpa	460
Tažnost	A5	%	36
Vrub. houževnatost	KCU2	J·cm ²	70 (+ 20 °C)

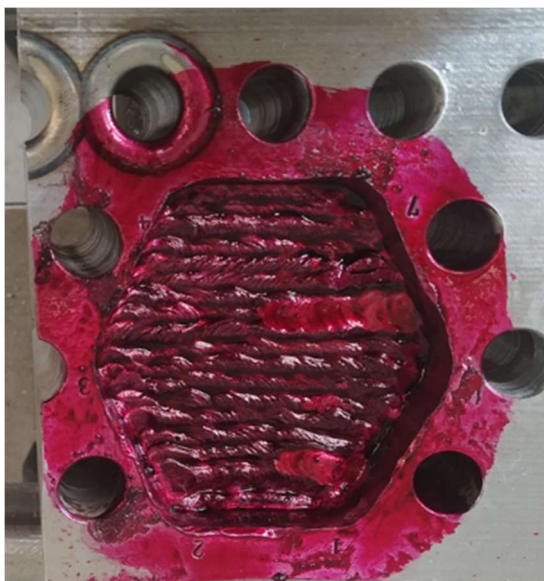


Obr. 52 Zátka KSS 762 [33]



Obr. 53 Provedený KSS 762

Tento způsob opravy se ukázal jako vyhovující (obr. 53 a 54), co se týká provaření zátky a ZM. Ale problém bylo opět smrštění okolních děr vlivem tepelného příkonu (obr. 55).



Obr. 54 PT na KSS 762



Obr. 55 Smrštění viditelné po PT

3.4.5 KSS 5 [27], [28], [30], [33]

Pátým KSS (KSS 762B) a jak se později ukázalo posledním, bylo provedení, kdy byla navržena modifikovaná zátka, která nejlépe vyhovovala požadavkům. Modifikace byla provedena geometrickou úpravou hlavy zátky. Svařování, v tomto případě spočívalo pouze na metodě 141 a PM Sv-04Ch19N11M3. Provedení opustilo od vyplňování výbrusu dalším svařováním a rozhodlo se o použití několika svařovacích průchodů (obr. 56) na každé zátce. Tím se eliminoval neblahý vliv tepelného příkonu na okolní materiál.

Výsledky vyhodnocení KSS 5 splňovali požadované parametry, proto bylo rozhodnuto, že způsob opravy kolektoru PG, bude proveden dle KSS 5.



Obr. 56 Zavařené zátky KSS 762B

3.5 Oprava PG [30]

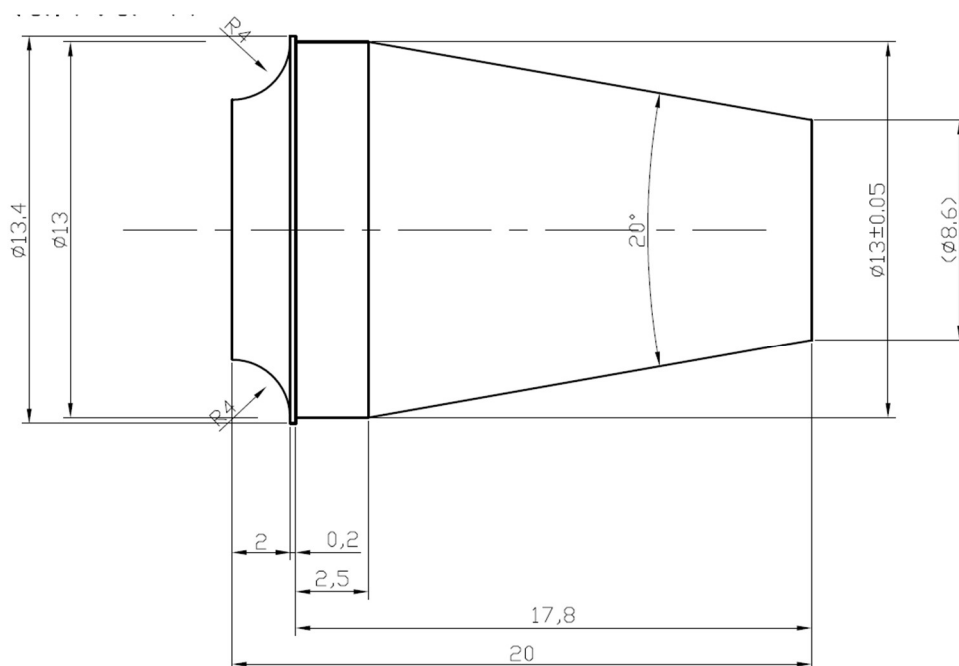
Jak bylo uvedeno výše, před realizací opravy proběhla, kromě KSS, řada dalších příprav. Dotčený kolektor byl důkladně očištěn a dekontaminován. Příprava pracovního prostoru zahrnovala výstavbu pracovní plošiny z lešení, kompletní pokrytí plošiny několika vrstvami igelitu (obr. 57), instalace zdvihacího zařízení a systému dodávání vzduchu, dopravu a kontrolu veškerého vybavení a svářečských zařízení.

Při provádění prací bylo třeba zajistit součinnost několika různých skupin. Svářečská skupina zajišťovala samotnou opravu. Skupina přípravařů prováděla přípravu a dopravu pracovníku v kolektoru. Hasičská skupina měla na starosti obsluhu přívodu vzduchu. Skupina kontrolorů zajišťovala NDT kontroly a dozor nad prováděnými pracemi. V neposlední řadě skupina bezpečnostních pracovníků, kteří dohlíželi nad omezeným vstupem do prostoru opravy.

Po kompletní přípravě se přistoupilo k opravě. První svářeč byl oblečen do třech vrstev oděvu, byla mu nasazena dýchací maska a svářečská kukla. Poté byl spuštěn do kolektoru. Vzduch byl pracovníkům vháněn neustále. Hasičská skupina obsluhovala čerpání vzduchu s dokonalou profesionalitou. I výměna prázdné lahve byla provedena během 5 vteřin.



Obr. 57 Pracovní prostor opravy



Obr. 58 Modifikovaná zátka [30]

V první fázi svářeč umístil do sedmi děr ve výbrusu modifikované zátky (obr 58) z materiálu 08Ch18N10T. Pomocí metody 141 provedl svaření prvního svaru zátka-kolektor (obr. 59). Protože radiální situace byla, v rámci možností, příznivá, průměrná čerpaná osobní dávka 200 μSv , mohl pracovník zůstat v kolektoru přibližně 30 minut. Pokud nebyla kontrolní skupina spokojena se svarem, obsluha poslala svářeči na lanku stopkovou frézku a vadu opravil. Další svářeči provedli v místě opravy druhou vrstvu svaru (obr. 60).

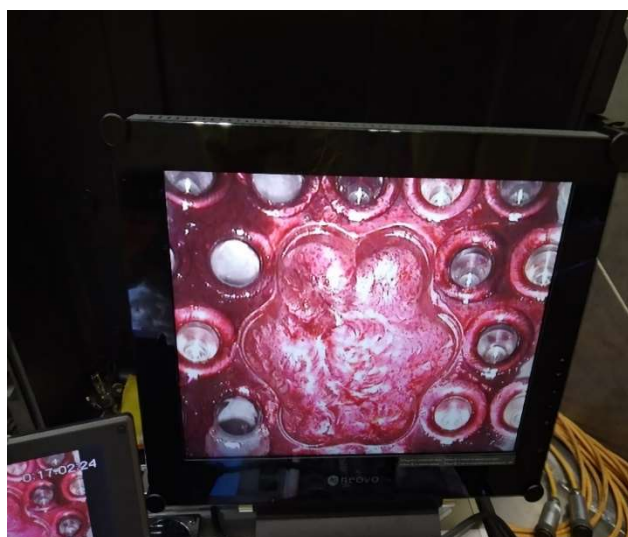
Všechny vrstvy svaru byly hodnoceny pomocí nepřímé vizuální kontroly. Pracovník Speciální kontroly použil zavěšený vizuální modul, který spustil do kolektoru. Místo nasnímal a kontroloři u monitoru (obr. 61) provedli zhodnocení svarů. Tato metoda byla použita, aby se omezil počet osob, které vstupovali do kontaminovaného prostředí.



Obr. 59 Svařování první vrstvy



Obr. 60 Po svaření druhé vrstvy

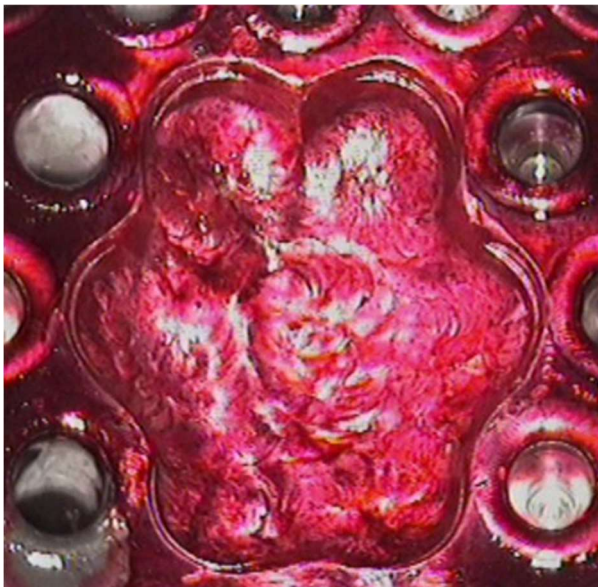


Obr. 61 Vizuální kontrola při NDT

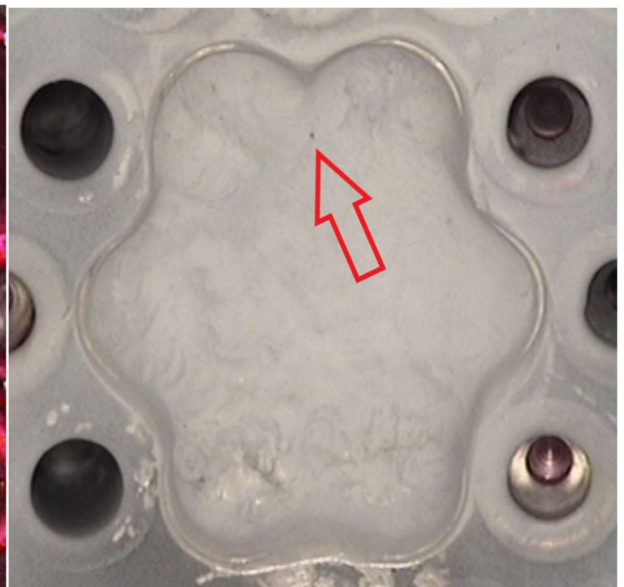


Obr. 62 Zavařená třetí vrstva

Po druhé vrstvě, skupina rozhodla o zavaření třetí vrstvy (obr. 62). Po kontrole svařování nastoupil NDT pracovník, který v kolektoru provedl vizuální a kapilární zkoušku (obr 63). Kapilární zkouška odhalila drobnou vadu v horní části vybroušeného prostoru. Vada se ukázala po druhém nástřiku kontroly, označeno na obr. 64.



Obr. 63 Kapilární kontrola - první nástřik



Obr. 64 Vada po kapilární kontrole

Zjištěnou vadu odstranil svářeč jemným vybroušením. Dalším postupem bylo provedení opětovné kapilární kontroly, která již byla vyhovující (obr. 65). Tímto zjištěním byla oprava vybroušeného místa ukončena. Prostor byl kompletně vyklizen, všechno zařízení uklizeno a kontaminované oblečení a nářadí bylo nashromážděno do igelitových pytlů a transportováno k odborné likvidaci.

3.5.1 Závěrečné kontroly

Po finálním úklidu následovala série zkoušek a testů. Jako první proběhla kontrola pomocí vířivých proudů ve stejném rozsahu, jako před opravou. Ve druhém sledu následovala bublinková metoda. Třetí zkouškou byla penetrační kontrola. Nakonec byl celý primární systém podroben pevnostní tlakovou zkouškou. Veškeré kontroly proběhly s vyhovujícím výsledkem. Po provedených testech byl druhý blok uveden do provozu.



Obr. 65 Vyhovující kapilární kontrola

4. ZÁVĚRY

V experimentu této bakalářské práce bylo představeno a dokázáno, že se současnými zkušenostmi a možnostmi, jsme schopni provést i náročnější opravu kolektoru teplosměnných trubek parogenerátoru. K tomuto zjištění nám dopomohla série svařovacích postupů a zkoušek, což byly kontrolní svarové spoje, důkladná příprava a trénink.

Pomocí KSS bylo testováno 5 různých postupů na opravu kolektoru ručním svařováním. První 4 naznačily, že větší rozsah svařování jako i použití metody 111 mají veliký vliv na smrštění materiálu v okolí svaru, což má neblahý vliv na sousední zaústění TS trubek v kolektoru. Proto byl zvolen pátý KSS, kde byla do kolektoru, zavařena modifikovaná zátka z materiálu 08Ch18N10T, pomocí metody 141 a přídavného materiálu Sv-04Ch19N11M3. Tento postup vyšel nejlépe z pohledu provaření materiálu, zkoušek po svaření i smrštění okolí svaru.

Zkoumání iniciace vady i následné provádění opravy dalo vzniknout řadě nápravných opatření, které byly implementovány do dalších prací na zaslepování TS trubek.

Nápravná opatření:

- Kvalifikace složitějších kontrol na zjišťování vad.
- Změna v postupu svařování – Provádět svařování ve větších délkových i časových rozestupech.
- Pravidelná proškolení personálu a udržování jejich praktických dovedností
- Provést rozsáhlé analýzy vlivu svařování, vybrušování a vícenásobných oprav na životnost kolektorů i celého PG
- Pomocí numerických metod analyzovat celý postup zaslepování a stanovit úroveň zbytkových napětí

Seznam použitých zdrojů [36]

- [1] *Roční zpráva o provozu ES ČR* [online]. Energetický regulační úřad: ERU, 2019 [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/zpravy-o-provozu-elektrizacni-soustavy#2018>
- [2] ČEZ, a.s. *Učební texty pro přípravu personálu JE: Základní schéma jaderné elektrárny Dukovany*. Brno, 2016.
- [3] ČEZ, a.s. *Učební texty pro přípravu personálu JE: PRIMÁRNÍ ČÁST JE VVER 440. Základní zařízení primárního okruhu, obrázková část*. Brno, 2006.
- [4] AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení. Technologie svařování a zařízení*. 2. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, s. 394. ISBN 80-85771-81-0.
- [5] KAŠPAR, Peter. *Návod na obsluhu a údržbu: Manipulátory pre kontrolu parogenerátorov*. NO 0380.095, Rev.1. Trnava, Slovenská republika, 2010.
- [6] KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování: Svařování v ochranných atmosférách*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-708-2697-5.
- [7] BARTÁK, Jiří, Vladimír BUBENÍK, Heinz NEUMANN, Jan BURKOVIČ a Bohumil MÍŠEK. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování*. Ostrava: ZEROSS, 2000. ISBN 80-85771-72-1.
- [8] BALEJ, Zdeněk, Vladimír Kudělka a Jan Opletal. *Svařování metodou 141*. 1. vyd. Ostrava: Nakladatelství Zeross, 2000, 96 s. ISBN 80-85771-80-2
- [9] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ, Milan HORÁČEK, Bohumil KANDUS, Jaroslav KUBÍČEK, Evžen VYPLAŠIL, Ladislav ZEMČÍK a Ladislav ŽÁK. *Technologie I*. Brno: PC-DIR, spol., 1995. ISBN 80-214-0689-5.
- [10] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II: Část svařování I*. VUT Brno, 2011.
- [11] MMA (Manual Metal Arc Welding). *Automig: Internetový magazín* [online]. Teplice: Migatronik CZ, 2010 [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/obalena-elektroda-mma>
- [12] *Katalog přídatných svařovacích materiálů*. ESAB. Vamberk, 2012.
- [13] BENKO, Bernard. *Technológia: Zváranie*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2004. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 80-227-2163-8.
- [14] *Www.wirpo.cz* [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: <https://www.wirpo.cz/eshop/obalena-bazicka-elektroda-pro-svarovani-konstrukcnich-oceli-vandal>
- [15] HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*, 2vyd. Bratislava: Citadella, 2013, ISBN 978-80-89628-18-6.
- [16] Firma Vít Novák. <Http://www.svarovani-nerez.cz> [online]. Jaroměř: Vít Novák, 2020 [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: <http://www.svarovani-nerez.cz/mma-svarovani.html>
- [17] FOLDYNA, Václav, Karel HENNHOFFER, Ivo HLAVATÝ, et al. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2. upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7185-3.
- [18] KUČERA, Drahošlav. *Literární rešerše svařitelnosti materiálů: dílčí výsledky řešení etapy 1.0.1. projektu FR-T11/485*. Brno, 2009. 9 s. Zpráva číslo VUT 485/101/ÚST. Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
- [19] NĚMEC, Josef. *Svařování korozivzdorných a žárovzdorných ocelí*. 2. přeprac. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1975.
- [20] KOUKAL, Jaroslav, Drahošlav SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.

- [21] ČÍHAL, Vladimír. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. Praha: Academia, 1999. Česká matice technická (Academia). ISBN 80-200-0671-0.
- [22] ČEZ, a.s. *Učební texty pro přípravu personálu JE: PRIMÁRNÍ ČÁST JE VVER 440. Základní zařízení primárního okruhu, textová část*. Brno, 2007.
- [23] **NORMATIVNĚ TECHNICKÁ DOKUMENTACE ASOCIACE STROJNÍCH INŽENÝRŮ. Sekce II.: Charakteristiky materiálů pro zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER**. Praha, 2017.
- [24] ČSN EN 10028-2. *Ploché výrobky z ocelí pro tlakové účely – Část 2: Nelegované a legované oceli se stanovenými vlastnostmi pro vyšší teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [25] ČSN EN 10088-3. *Korozivzdorné oceli – Část 3: Technické dodací podmínky pro polotovary, tyče, válcované dráty, profily a lesklé výrobky z ocelí odolných korozi pro obecné použití*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [26] ČEZ, a. s. *Inspekční certifikáty základních materiálů*.
- [27] PALARČÍK, Vojtěch. *Oprava primárního kolektoru na parogenerátoru PG26 blok č.2, JE Dukovany*. Dukovany, 2019.
- [28] ŠKODA JS, a. s. *PKZ – Kontrolní svarový spoj 762B*. Identifikační číslo: Ae 22699T (Rev. 0). 2019.
- [29] OCHODEK, Vladislav. *Vliv teplotního režimu svařování na vlastnosti svarových spojů - I*. VŠB TU Ostrava, 2011.
- [30] *Typový technologický postup: Výměna poškozených záslepek*. JE Dukovany, 2019.
- [31] **CHARAKTERISTIKA KOROZIVZDORNÝCH MATERIÁLŮ**. <https://www.italinox.cz> [online]. Praha: Italinox, 2019 [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-2>
- [32] *BÖHLER FOX EAS 4 M-A* [online]. Příbram: www.voestalpine.com/welding, 2014 [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: www.svarecky-elektrody.cz
- [33] ŠKODA JS. *Kontrolní svarový spoj 762 B*. Brno, 2019.
- [34] ŠKODA JS. *Kontrolní svarový spoj 761*. Brno, 2019.
- [35] ŠKODA JS. *Kontrolní svarový spoj 760/2*. Brno, 2019.
- [36] ČSN ISO 690. *Informace a dokumentace – Pravidla pro bibliografické odkazy a citace informačních zdrojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 40 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Legenda	Jednotka
A ₅	Tažnost	[%]
I	Svařovací proud	[A]
KCU2	Vrubová houževnatost	[J·cm ⁻²]
Q	Tepelný příkon	[KJ·mm ⁻¹]
R _m	Pevnost v tahu	[MPa]
R _{p0,2}	Smluvní mez kluzu	[MPa]
U	Svařovací napětí	[V]
v	Rychlost svařování	[mm·s ⁻¹]
Z	Kontrakce	[%]
α _t	Součinitel délkové teplotní roztažnosti	[K ⁻¹]
A	Austenit	
AO	Autorizovaná osoba	
Cr _E	Chromový ekvivalent	
F	Ferit	
FN	Feritové číslo	
H	Hold point	
IZ	Inspekční zpráva	
KSS	Kontrolní svarový spoj	
KZ	Konečná zkouška	
LTB	Bublinková zkouška	
M	Martenzit	
MKK	Mezikristalová koroze	
MMA	Svařování el. obloukem tavící elektrodou - 111	
MPa	Mega pascal	
MW	Megawatt	
NDT	Nedestruktivní metody zkoušení	
Ni _E	Niklový ekvivalent	
OOPP	Osobní ochranné pracovní prostředky	
PG	Parogenerátor	
PKZ	Plán kontrol a zkoušek	
PM	Přídavný materiál	
PT	Kapilární zkouška	
pWPS	Předběžná specifikace postupu svařování	
Ř	Řada TST	
S	Sloupec TST	
TIG	Svařování el. obloukem netavící elektrodou - 141	

TST	Teplosměnné trubky
TTP	Typový technologický postup
UT	Ultrazvuková zkouška
VT	Vizuální zkouška
W	Witness point
WPQR	Kvalifikace postupu svařování
WPS	Postup svařování
ZM	Základní materiál
δ ferit	tuhý roztok uhlíku v železe δ

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Nejdůležitější zařízení jaderné elektrárny [3]	9
Obr. 2 Parogenerátor – řez [3]	10
Obr. 3 Parogenerátor-řez kolektorem [3]	11
Obr. 4 Vstup do PG	12
Obr. 5 Zaslepená TS trubka [30]	12
Obr. 6 Řez zavařenou zátkou	13
Obr. 7: Manipulátor ZOK [5]	14
Obr. 8: Napájení a ovládání manipulátoru [5]	15
Obr. 9: Vrtací hlava [5]	15
Obr. 10: Nasazovací hlava [5]	15
Obr. 11: Svařovací hlava a těsnící svar [5]	16
Obr. 12: Vizuální modul [5]	16
Obr. 13: Svařovací zdroj [5]	16
Obr. 14: Princip svařování TIG [4]	17
Obr. 15: Průběhy impulzního proudu [4]	19
Obr. 16: Schéma svařování obalenou elektrodou [10]	19
Obr. 17: Obalená elektroda [4]	20
Obr. 18: Svařování potrubí metodou 111 [16]	20
Obr. 19: Obalené elektrody [14]	21
Obr. 20: Schaefflerův strukturní diagram [17]	23
Obr. 21: De Long diagram [17]	24
Obr. 22: Mezikrystalová koroze [21]	25
Obr. 23: Modul TEDDY [4]	28
Obr. 24: Měřicí sonda [4]	28
Obr. 25: Označení trubek v kolektoru [27]	29
Obr. 26: Označení sloupce trubek	29
Obr. 27: Zjištěná netěsnost [27]	30
Obr. 28: Oprava č. 1 [27]	30
Obr. 29: Bublínková netěsnost [27]	30
Obr. 30: Indikace po PT [27]	31
Obr. 31: Indikace po PT [27]	31

Obr. 32: Indikace po PT \varnothing 24 mm [27].....	31
Obr. 33: Indikace po PT \varnothing 24 mm [27].....	31
Obr. 34: Vybroušená plocha [27].....	32
Obr. 35: Vybroušená plocha [27].....	32
Obr. 36: Nácvik přípravy pracovníků.....	32
Obr. 37: Upravená maska.....	33
Obr. 38: Rozřezový plán [33].....	34
Obr. 39: Rozřezaný vzorek [33].....	34
Obr. 40: Cvičný tubus.....	35
Obr. 41: Svářeč v tubusu.....	35
Obr. 42: Vzorek pro KSS [27]	35
Obr. 43: 1. fáze svařování KSS 760.....	36
Obr. 44: 2. fáze svařování KSS 760.....	36
Obr. 45: Smrštění materiálu [27]	36
Obr. 46: Vady v rozřezu KSS 760 [27].....	37
Obr. 47: Řez KSS 760/2 [27].....	37
Obr. 48: Smrštění KSS 760/2 [27].....	37
Obr. 49: Vady v rozřezu KSS 760/2.....	38
Obr. 50: Zátka KSS 761.....	38
Obr. 51: Řez KSS 761 [27].....	39
Obr. 52: Zátka KSS 762.....	39
Obr. 53: Provedení KSS 762.....	39
Obr. 54: PT na KSS 762.....	40
Obr. 55: Smrštění viditelné po PT.....	40
Obr. 56: Zavařené zátky KSS 762B.....	40
Obr. 57: Pracovní prostor opravy.....	41
Obr. 58: Modifikovaná zátka [30].....	41
Obr. 59: Svařování první vrstvy.....	42
Obr. 60: Po svaření druhé vrstvy.....	42
Obr. 61: Vizualní kontrola při NDT.....	42
Obr. 62: Zavařená třetí vrstva.....	42
Obr. 63: Kapilární kontrola – první nástřik.....	43
Obr. 64: Vada po kapilární kontrole.....	43
Obr. 65: Vyhovující kapilární kontrola.....	43

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Chemické složení oceli 08Ch18N10T [23], [24], [26].....	27
Tab. 2: Vlastnosti oceli 08Ch18N10T [23].....	27
Tab. 3: Chemické složení oceli 1.4541 [23], [24].....	35
Tab. 4: Vlastnosti oceli 1.4541 [23].....	36
Tab. 5: Chemické složení oceli PM Sv-04Ch19N11M3 [Př. 6].....	37
Tab. 6: Vlastnosti PM Sv-04Ch19N11M3 [Př. 6].....	37
Tab. 7: Chemické složení oceli PM FOX EAS-4M [Př. 7].....	39
Tab. 8: Vlastnosti PM FOX EAS-4M [Př. 7].....	39

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Protokol chemického složení 08CH18N10T

Příloha 2: Výkres – Zátka \varnothing 24mm

Příloha 3: Program KSS 762B

Příloha 4: pWPS KSS 762B

Příloha 5: Výkres KSS 762B

Příloha 6: Inspekční certifikát PM SV-04Ch19N11M3

Příloha 7: Materiálový list PM FOX EAS-4M

Příloha 8: Inspekční certifikát materiálu 1.4541