



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

PROBLEMATIKA SVAŘOVÁNÍ KOROZIVZDORNÉ OCELI 1.4541

THE PROBLEMS OF WELDING STAINLESS STEEL 1.4541

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vladimír Šmarda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček, IWE

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Vladimír Šmarda**
Studijní program: Strojírenská technologie
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Jaroslav Kubiček, IWE**
Akademický rok: 2021/22

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 diplomové práce:

Problematika svařování korozivzdorné oceli 1.4541

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Parogenerátor je tepelný výměník v radiční zóně primárního okruhu jaderné elektrárny. Při výměně horního kolektoru se používá svařovací jednoúčelový automat na svařování metodou TIG. Svařování je prováděno v kritické části elektrárny a nelze jej z jakýchkoliv důvodů přerušit. V případě poruchy nebo nepřesnosti mechanizovaného svařování je nutno zajistit svařování ručním způsobem. Diplomová práce je zaměřena na optimalizaci parametrů modifikovaného TIG svařování s mechanizovaným podáváním drátu.

Cíle diplomové práce:

Vypracovat literární studii svařování metodou TIG a svařitelnosti korozivzdorných ocelí.
Posoudit parametry svařování, které mají vliv na jakost svarového spoje.
Navrhnout a experimentem optimalizovat parametry ručního svařování TIG s mechanizovaným podáváním drátu.
Provést a vyhodnotit experiment.
Vypracovat postupy svařování – WPS.

Seznam doporučené literatury:

ASM Handbook Welding, Brazing and Soldering. Volume 6. 10th editon. Materials Park, Ohio: ASM International, 2016. ISBN 978-0871703828.

KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3.

KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0.

KOLEKTIV AUTORŮ. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení, 1. vyd. Zeross, Ostrava 1999, 249s. ISBN 80-85771-70-5.

KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1.

ONDREJČEK, Peter. Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou sa elektródou, 1. vyd. ETERNA PRESS s.r.o. Bratislava 2003, ISBN 80-968359-5-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Práce se zabývá svařováním austenitické oceli použité u horní části PG v JE Dukovany a vhodnou technologií opravy svařováním při výměně této části. Část kapitoly je věnovaná progresivním metodám TIG jako je použití horkého drátu nebo orbitální svařování potrubních dílů. Experimentem je ověřováno nastavení optimálních parametrů modifikovaného TIG svařování s mechanizovaným podáváním drátu se svařovacím zdrojem od společnosti EWM. Souborem navržených zkoušek NDT doplněných o destruktivní zkoušky včetně metalografických bylo prokázáno správné zvolení metody, způsobu provedení a použitého přídavného materiálu. Tyto zkoušky byly doplněny o zkoušku měření tvrdosti svarového spoje a v místech TOO. V části vyhodnocení experimentu bylo shrnuto provedení a popsány výsledky zkoušek s doporučením k možnému pokračování v procesu pro kvalifikaci spoje s vyhotovením WPQR.

Klíčová slova

Svařování, austenitická ocel, mechanizované podávání drátu, TIG, NDT.

ABSTRACT

This thesis focuses on austenitic steel welding in the upper part of a steam generator at the nuclear power station Dukovany, and the suitable technology when replacing this part. Part of this thesis is dedicated to the progressive methods TIG, such as the use of hot wire or orbital welding of pipe parts. The experiment in this thesis project tests the optimal parameters setup when welding while using a modified TIG method; a motor-fed hot wire with a welding source from EWM manufacturer was used in this project. Number of NDT tests, along with destructive tests including metallographic tests, demonstrated and verified that the methods, the additional materials and the way the experiment was carried out were chosen correctly and proved effective. These tests also included the hardness of the welding point and TOO locations. The experiment assessment part summarizes the experiment execution, describes the results of the tests, and recommends further continuation in the process toward WPQR.

Keywords

Welding, austenitic steel, mechanized wire feeding, TIG welding, NDT.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠMARDA, Vladimír. *Problematika svařování korozivzdorné oceli 1.4541* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140060>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Problematika svařování korozivzdorné oceli 1.4541* vypracoval(a) samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

V Brně dne 19.5.2022

Místo, datum

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Jaroslavovi Kubíčkovvi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále děkuji společnosti ČEZ ENERGOSERVIS spol. s r.o. za technické zázemí a Stanislavovi Galatíkovi za svaření vzorku. Také chci poděkovat své rodině především manželce za veškerou podporu během studia.

OBSAH

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
2 MATERIÁLOVÁ PROBLEMATIKA A SVAŘITELNOST	11
2.1 Korozivzdorné oceli a jejich struktura.....	12
2.1.1 Zvláštnosti při svařování austenitických ocelí	19
2.2 Metody svařování austenitických ocelí	23
2.2.1 Svařování metodou MMA.....	24
2.2.2 Svařování metodou TIG	25
2.2.3 Výhody a nevýhody metody TIG svařování	28
2.3 Mechanizované svařování metodou TIG.....	29
2.3.1 Metoda TIG svařování horkým drátem.....	30
3 EXPERIMENT SVAROVÉHO SPOJE	32
3.1 Problematika opravy	33
3.2 Svařovaný základní materiál.....	36
3.3 Návrh metody svařování a způsob provedení.....	38
3.3.1 Přídavný materiál k svařování.....	40
3.3.2 Svařovací a ochranný plyn	42
3.3.3 Wolframové elektrody	43
3.4 Zhotovení svarových ploch a jejich kontrola.....	45
3.5 Svařování experimentálního vzorku	47
3.6 Nedustriktivní kontroly spoje	51
3.6.1 Vizuální kontrola svaru VT.....	51
3.6.2 Zkouška kapilární PT	51
3.6.3 Zkouška prozářením svaru RT	52
3.7 Destruktivní kontroly spoje	52
3.7.1 Zkouška tahem	52
3.7.2 Zkouška rázem v ohybu	54
3.7.3 Kontrola makrostruktury	56
3.7.4 Zkouška tvrdosti svarového spoje.....	57
3.7.5 Mikroskopická kontrola	58
4 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU	59
ZÁVĚRY	61
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	

ÚVOD

Elektrickou energii, jejíž spotřeba v dnešní moderní společnosti neustále roste, je nutné někde vyrobit. Výrobu lze zajistit z různých zdrojů např. z uhlých elektráren anebo také z obnovitelných zdrojů jako jsou vodní, větrné či sluneční elektrárny. V neposlední řadě lze také pro výrobu elektrické energie využít jaderných elektráren. Ty jsou jedním z důležitých stabilních technických zařízení pro výrobu elektrické energie. Řadí se mezi základní elektrárny kryjící spotřebu elektřiny v diagramu denního zatížení. [1;2;3]

Mezi hlavní komponenty jaderných elektráren v primární části patří reaktory, cirkulační čerpadla a parogenerátory. Tato technologická zařízení jsou mezi sebou pospojována potrubním vedením z korozivzdorných austenitických ocelí. Svarový spoj je hlavní způsob spojení těchto potrubních tras či zásadních technologických dílů. Na tyto spoje jsou kladeny vysoké nároky nejen vzhledem k použití základního a přídatného materiálu, ale i na kvalitu a preciznost provedení svarového spoje. Vysoké nároky jsou kladeny také na vytrénovaný svářecí personál. Původní použitý materiál a provedené svarové spoje v provozovaném zařízení jsou pravidelně kontrolovány z hlediska jejich celistvosti, aby byly splněny požadavky pro bezpečný a dlouholetý provoz jaderných elektráren. V souvislosti s plněním těchto požadavků se zdokonalují metody kontrol a také způsoby provádění oprav nalezených degradovaných materiálů či svarů. [2;3]

Původní metody ručního svařování jsou v některých případech nahrazovány progresivnějšími metodami automatizovaného způsobu svařování. V převážné většině metodou TIG. V rámci oprav zařízení jsou již použity nové metody jako je svařování nestandardní metodou WOL nebo oprava potrubního vstupu páry do horní části parogenerátoru pomocí orbitálního svařovacího automatu SPX či automatizované svařování heterogenních svarových spojů (HSS) metodou TIG. Nové technologie a metody jsou navrhovány pro jejich preciznost při provedení kvalitního svarového spoje a v neposlední řadě také proto, že jsou využívány v prostředí s ionizujícím zářením, kde by pracovníci při opravách přijímali dávky záření. I když nám moderní trendy umožňují vyvíjet nové automaty vhodné v případě oprav, přesto je ruční svařování zkušeným a kvalifikovaným svářecím personálem v provozovaných technologiích nepostradatelným způsobem provedení svarových spojů. [2;3]



Obr. 1 Jaderná elektrárna a svařování. [2;3]

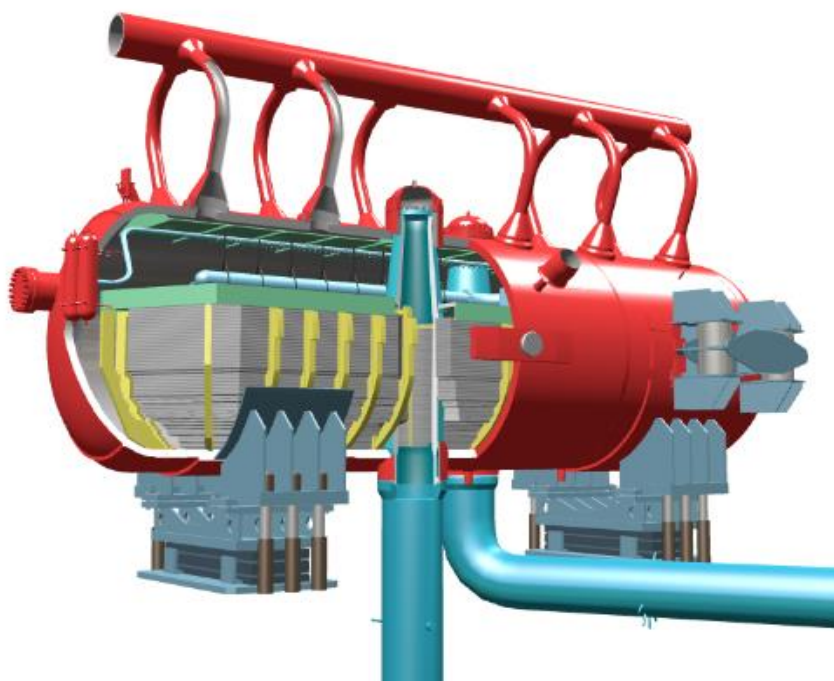
1 ROZBOR ZADÁNÍ

Jedním ze stěžejních zařízení v primární části jaderných elektráren je parní generátor (PG) vyobrazený na obrázku č. 2. Tvoří bezpečnostní hranici mezi primárním a sekundárním okruhem. Je to vlastně horizontální tepelný výměník, který přenáší tepelnou energii dále do sekundární části elektrárny. Napájení PG vodou je řešeno potrubním vedením z korozivzdorné austenitické oceli. Pro spolehlivý, bezpečný a dlouhodobý provoz jaderné elektrárny je toto zařízení klíčové. Vzhledem k této skutečnosti jsou na různých místech či částech PG prováděny pravidelné kontroly dle Plánu periodických kontrol k zjišťování případných vad materiálu nebo svarových spojů. Jednou z kritických částí PG je oblast horní části víka primárního kolektoru. [3]

Tato diplomová práce řeší případnou opravu anebo výměnu horní části víka přívodního potrubí do PG za pomoci svarového spoje. Respektive rozšiřuje a zároveň doplňuje metodu automatizovaného svařování o možnost ručního svařování za pomoci metody TIG s mechanizovaným podáváním drátu jako celkový souhrn způsobu opravy při případném selhání automatizovaného svařování. Má za cíl najít a navrhnout optimalizované parametry pro ruční svařování, které lze použít jako podklad k vyhotovení pWPS a následně WPQR pro příklad opravy horní části kolektoru PG. [4;5]

V části práce je řešena svařitelnost korozivzdorných ocelí převážně austenitických a související podmínky pro provádění kvalitních spojů na základě literárních studií. Jsou zde popsány zásadní účinky, které ovlivňují nejen celý proces svařování, ale ve výsledku také vlastní jakost svarového spoje. V neposlední řadě jsou uvedeny i metody svařování, které se v dnešní době nejčastěji využívají pro zhotovení svarových spojů v jaderných elektrárnách včetně nového trendu k přechodu na automatizované svařování pro některé aplikace. [4;5]

Závěrečná část experimentu řeší kontrolu jakosti provedeného spoje nejprve kontrolami NDT a následně provedenými kontrolami ověřujícími pevnost, houževnatost materiálu a jeho strukturu po vyhotovení svarového spoje. [6;7]



Obr. 2 Model parního generátoru V-213. [3]

2 MATERIÁLOVÁ PROBLEMATIKA A SVAŘITELNOST

V provozu jaderných elektráren se v současné době používá více druhů a jakostí materiálů pro instalaci potrubních tras určených k přepravě médií. Jedním z těchto materiálů je korozivzdorná ocel, která je nejvíce použita v primárních okruzích provozovaných reaktorových bloků a jejich hlavních komponent. Jedná se o základní technologická zařízení jako jsou reaktor a parogenerátory a jejich části, které jsou vyrobeny právě z korozivzdorných ocelí anebo jsou spojeny potrubním vedením z těchto materiálů. [4;8]

Korozivzdorné oceli odolávají nejen různým roztokům solí, ale i kyselinám, páram a plynům či radioaktivnímu médiu. Základní slitinovou přísadou každé korozivzdorné oceli je chrom v množství nejméně 12 %. Chrom přidaný do oceli v tomto množství způsobí, že se na povrchu oceli vytvoří, stykem s prostředím obsahujícím kyslík, slabá vrstva oxidu chromitého. Ta je v podstatě neviditelná, ale přesto souvislá po celém povrchu, viz obrázek č. 3. Vrstva je pevně spojena s kovovým povrchem oceli, tudíž vnější prostředí se nestýká bezprostředně s ocelí, ale právě s vytvořenou vrstvou oxidu. Ocel se díky této vlastnosti stala pasivní a odolná vůči chemické a elektrochemické korozi v oxidačním prostředí. Tato vrstva, nazývaná jako pasivační, má schopnost samoobnovy za přístupu dostatečného množství kyslíku. Tloušťka této vrstvy se přirozeně navyšuje s časem působení. Rychlost tvorby oxidačního pasivačního filmu závisí na obsahu chromu v dané korozivzdorné oceli. Pro zvýšení odolnosti proti korozi jsou do oceli přidávány další prvky jako jsou obvykle nikl a molybden nebo drahé prvky titan či niob. Důvodem legování těmito prvky je zlepšení vlastností ocelí, nejčastěji obecně mechanických, ať za zvýšených či snížených teplot. V korozivzdorných ocelích je vždy obsažen v malém množství i uhlík, který je vcelku nežádoucí a nepřidává se úmyslně. Je obsažen v základních surovinách. Přesto nám uhlík v malém množství zaručuje u některých typů korozivzdorných ocelí jejich dobrou svařitelnost. [9;10;15]

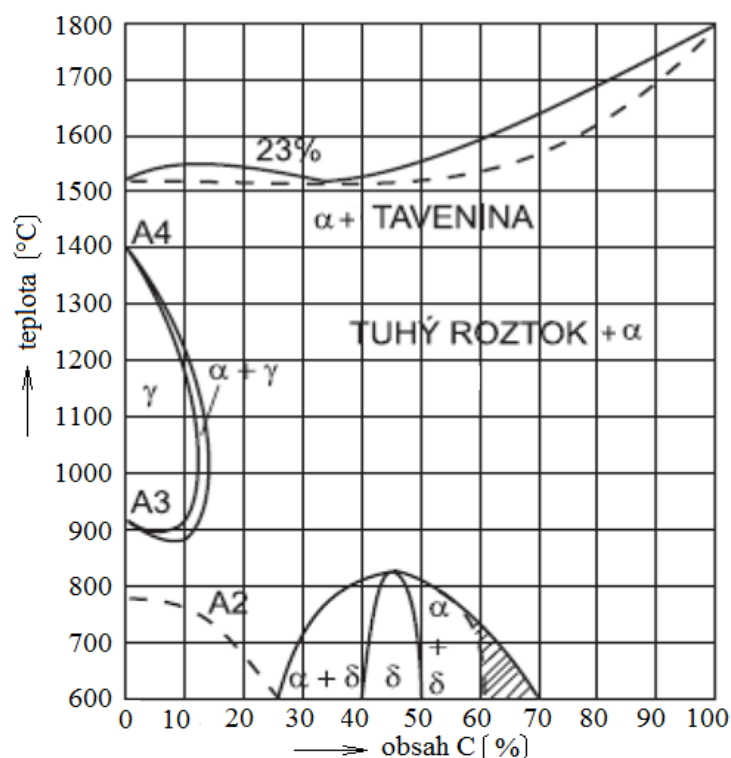


Obr. 3 Pasivní vrstva korozivzdorné oceli. [11]

2.1 Korozivzdorné oceli a jejich struktura

Základní legující prvky tvořící strukturu korozivzdorných ocelí, lze rozdělit do dvou hlavních skupin. Jednou skupinou rovnovážného diagramu jsou legující prvky rozšiřující oblast gama. Jde o prvky podporující vznik austenitu. Do této skupiny austenitotvorných prvků se řadí hlavně nikl, který v dostatečně obsaženém množství rozšiřuje oblast gama natolik, že austenit je pak stabilní při pokojové a nižší teplotě. Nikl netvoří téměř žádné karbidy nebo intermetalické sloučeniny. Legováním tímto prvkem dosahujeme významného zvýšení houževnatosti ocelí. Dalšími prvky z této skupiny jsou mangan, měď, dusík a také uhlík. Uhlík při aplikaci v rovnovážném diagramu železo–chrom, rozšiřuje oblast γ směrem k vyšším obsahům chromu. Například u ocelí s 0,1 hm % uhlíku se oblast gama rozšíří k cca obsahu 18 % chromu. [2;3]

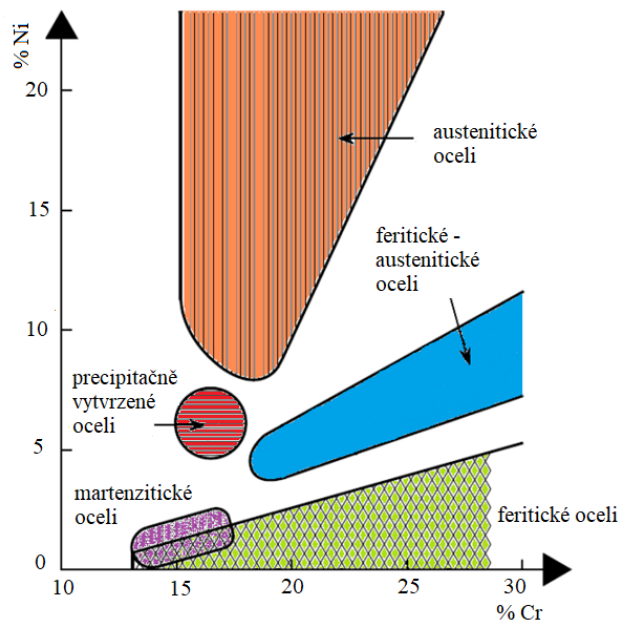
Opačnou skupinou jsou legující prvky, které oblast γ zužují a podporují tím tak vznik feritické struktury. Chrom, jakožto hlavní legující prvek korozivzdorných ocelí, je právě feritotvorný prvek. U ocelí, kde je jeho procentuální obsazení vyšší jak 13 %, najdeme pouze feritickou strukturu. Chrom velmi ochotně tvoří karbidy, zejména pak typ M_2C_6 , který nalezneme prakticky ve všech typech nerezových ocelí. Písmeno M v názvu představuje chrom, jež může být někdy nahrazen molybdenem či železem. Oceli s obsahem chromu nižším než 12 hm % jsou samokalitelné. Ostatními zužujícími legujícími prvky jsou molybden, křemík, hliník, wolfram, titan, niob a vanad. Struktura korozivzdorných ocelí závisí právě na chemickém složení, a tudíž na procentuálním zastoupení prvků. Základní informaci o možných strukturách chromových ocelí nám napomáhá rozpoznat rovnovážný diagram železo–chrom na obrázku č. 4. [2;12]



Obr. 4 Rovnovázný diagram železo-chrom. [12]

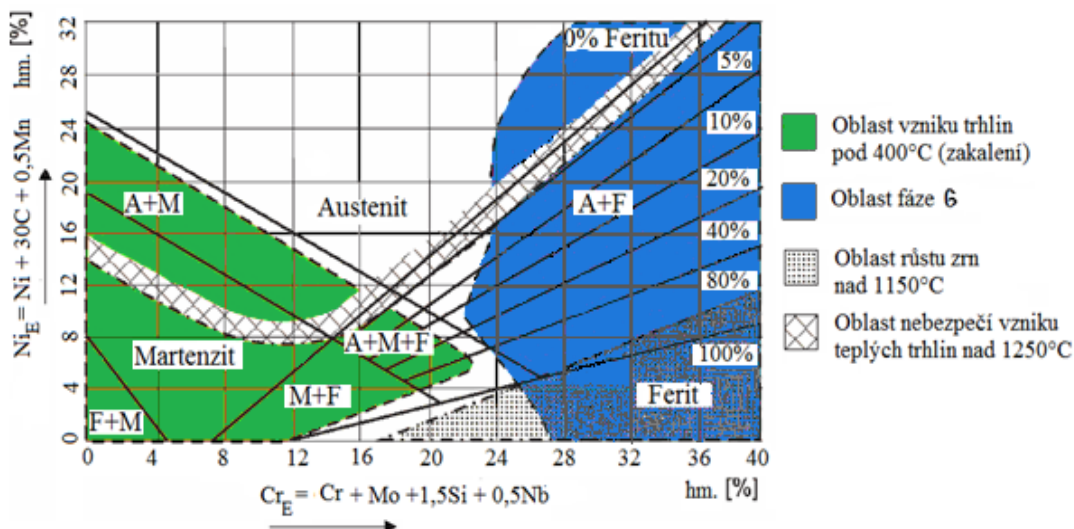
Nejvýznamnějšími prvky ovlivňujícími mikrostrukturu korozivzdorných ocelí jsou chrom, nikl, uhlík a dusík. Na obrázku č. 5 jsou znázorněny základní typy korozivzdorných ocelí dle obsahu chromu a niklu. Jak je patrné z grafu, tak největší zastoupení mají austenitické oceli.

Korozivzdorných ocelí je velká řada a každá z nich může mít díky legujícím prvkům jiné vlastnosti. Tyto oceli lze rozdělit z několika hledisek. [2;3]



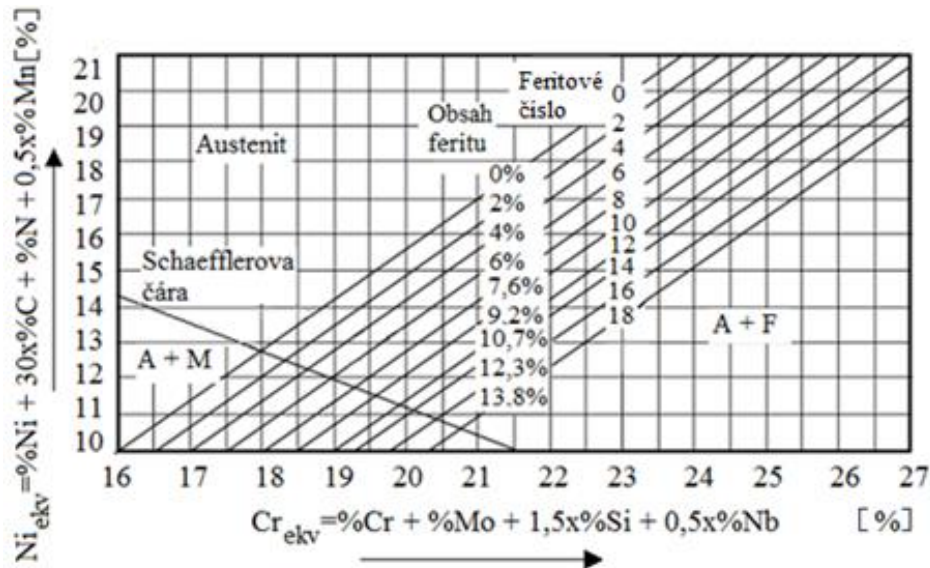
Obr. 5 Typy korozivzdorných ocelí dle obsahu chrom-nikl. [12]

Obecné rozdělení je uvedené v ČSN EN 10088–1. Korozivzdorné oceli se rozdělují podle užitných vlastností, dle významných legujících prvků a dále dle mikrostruktury. Výsledná mikrostruktura nám nejlépe charakterizuje danou ocel. Výsledkem vlivu kombinace těchto feritotvorných a austenitotvorných prvků je struktura oceli. Vliv všech feritotvorných prvků, které určitá ocel obsahuje, je vyjádřen ekvivalentem chromu Cr_E . Austenitotvorné prvky a jejich vliv je vyjádřen zase niklovým ekvivalentem Ni_E . Na základě těchto ekvivalentů byly zkonstruovány konstituční diagramy určené k odhadům výsledné struktury ocelí. Nejvíce používaným konstitučním diagramem je Schaefflerův na obrázku č. 6, který lze bez obtíží použít k odhadu výsledné struktury korozivzdorné oceli s žádným anebo velmi nízkým obsahem dusíku. Schaeffler nepočítal pro výpočet niklového ekvivalentu s dusíkem, který je významným austenitotvorným prvkem. [12;13]



Obr. 6 Schaefflerův strukturální diagram Cr–Ni. [4]

Jiným diagramem je De Longův viz obrázek č. 7, který upřesňuje Schaefflerův diagram. De Long zařadil pro výpočet niklového ekvivalentu Ni_E dusík jako významný austenitotvorný prvek, a to s koeficientem 30. Je možné ho využívat pro odhad výsledné mikrostruktury vysokolegovaných korozivzdorných ocelí s obsahem dusíku. S velmi dobrou přesností určuje mikrostrukturu Cr–Ni austenitické oceli s obsahem feritu do 15 %. Není však vhodný pro určování mikrostruktur ocelí s vysokým obsahem manganu. Diagram od svého vzniku prodělal zásadní změnu, a to konkrétně po normalizaci měřících metod obsahu feritu. Místo obsahu feritu v % se v diagramu objevuje tzv. feritové číslo (FN z anglického ferrite number). Hodnota feritového čísla je založena na magnetometrickém měření, které je možné díky feromagnetickým vlastnostem BCC mřížky feritu. Ačkoli není feritové číslo nijak vázáno na hodnotu feritu v %, do hodnoty 10 % feritu jsou hodnoty prakticky totožné. [4]

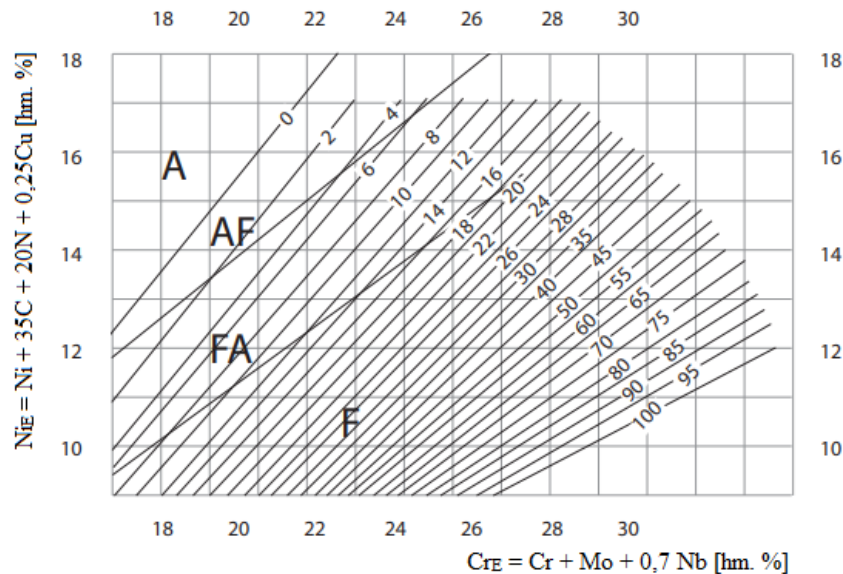


Obr. 7 De Longův diagram Cr–Ni ocelí. [4;9;14;15]

Dva výše zmiňované diagramy nelze v plném rozsahu využít k odhadům struktur korozivzdorných ocelí s vyšším zastoupením feritu. Právě pro feriticko-austenitické duplexní oceli je použití těchto diagramů pro odhad sledované mikrostruktury nedostačující. Pro spolehlivý odhad obsahu feritu ve struktuře Cr–Ni ocelí byl zkonstruován nový diagram, který je nazván jako WRC 1992, viz obrázek č. 8. [12;13]

Právě WRC diagram umožňuje přesné odhady obsahu feritu, a to v rozsahu 0–100 FN. I u tohoto diagramu došlo k úpravě výpočtů ekvivalentů. Konkrétně do chromového ekvivalentu jsou zahrnuty pouze tyto prvky: chrom, molybden a niob. Niklový ekvivalent pak počítá s niklem, uhlíkem, mědí a dusíkem. V diagramu jsou vyznačeny oblasti s primární austenitickou krystalizací, kdy je v těchto oblastech pravděpodobnější výskyt teplých krystalizačních trhlin v závislosti na struktuře. V oblastech primární feritické krystalizace dochází k nižšímu výskytu krystalizačních trhlin a pravděpodobnost výskytu ve svarovém spoji je nižší. Je třeba zdůraznit, že diagram byl vytvořen pro rychlosti ochlazování odpovídající svařování elektrickým obloukem. I tento diagram má své omezení v přesnosti odhadů struktur v závislosti na obsazích legujících prvků. Je vhodný pro oceli s obsahem do 10 % manganu a 0,25 % dusíku.

U ocelí, které mají více jak 1 % křemíku a více jak 3 % molybdenu se jeho přesnost v odhadu feritu ve struktuře snižuje. [12;13]



Obr. 8 Diagram WRC 1992. [16]

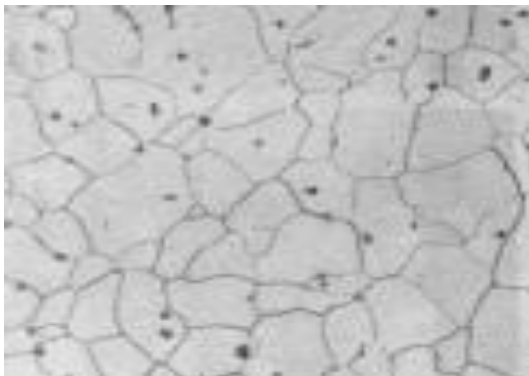
Korozivzdorné oceli lze rozdělit podle chemického složení a struktury do tří základních skupin: feritické, martenzitické a austenitické oceli. Speciální skupinou korozivzdorných ocelí jsou dvoufázové oceli, které obsahují dvě fáze. Obecně se duplexní oceli označují austeniticko-feritické a martenziticko-austenitické. Ačkoli korozivzdorné oceli obsahují vysoké množství legujících prvků, 12–30 % chromu, až 30 % niklu nebo do 24 % manganu a dalších. Vždy se jedná o slitinu uhlíku s železem, tj. ocel. [17;18;19]

Feritické korozivzdorné oceli, jejichž struktura je znázorněna na obrázku č. 9, obsahují mezi 13 až 30 % chromu a obsah uhlíku je převážně do 0,1 %. Těchto korozivzdorných ocelí je několik druhů s obsahem jednoho nebo více následujících prvků v maximálním množství do 4,5 % molybdenu, 1,6 % niklu, 2,1 % hliníku a 2,1 % titanu. Obsah intersticiálních prvků, především uhlíku a dusíku, by měl být v těchto materiálech velice nízký a neměl by překročit 0,04 %. Při dostatečném snížení obsahu intersticiálních prvků u feritických ocelí je i v TOO svaru dosaženo čistě feritické struktury. Proto tyto oceli nejsou náchylné na vznik studených trhlin a svařují se obvykle bez předehřevu. K jejich stabilizaci se používá titan anebo v omezené míře také niob. Tyto typy ocelí jsou náchylné k nadměrnému růstu zrn, což způsobuje pokles vrubové houževnatosti. Proto se při realizaci svařování vyžaduje co nejnížší tepelný příkon (malá svarová lázeň, vyšší rychlosti svařování). [17;18;19]

V zásadě to znamená, že když není u těchto typů feritických ocelí dodržen nízký obsah intersticiálních prvků, dochází potom v TOO ke vzniku martenzitu. Tyto oceli se svařují s předehřevem 200 až 300 °C. Předehřev lze stanovit experimentálně pomocí zkoušek praskavosti. Nevýhodou těchto feritických ocelí je křehnutí při teplotách od 400 do 550 °C. Křehnutí se nejvíce projevuje při teplotě 475 °C. Z tohoto důvodu není vhodné feritické oceli používat v rozmezí teplot 400 až 600 °C. Při teplotách nad 900 °C dochází k hrubnutí zrna. Při svařování je nebezpečí vzniku sigma fáze a náchylnosti k projevu mezikrystalické koroze. I tyto korozivzdorné oceli je nutné svařovat s limitovaným tepelným příkonem a používat přídavný materiál s nízkým obsahem difúzního vodíku. Zpravidla má tento přídavný materiál stejné chemické složení jako základní materiál. Ke zlepšení vlastností svarového spoje je vhodné přídavný materiál legovat 4 % niklu, případně použít niklové slitiny. Po svařování obvykle následuje žihání v rozmezí teplot 750 až 850 °C zvyšující plastické vlastnosti a korozní odolnost svarového spoje.

Pracovní teplota by u těchto ocelí a jejich spojů neměla překročit teplotu 320 °C. Použití feritických ocelí spočívá v úspoře niklu, který má společně s molybdenem zásadní vliv na cenu oceli. Tyto oceli se nejvíce využívají v energetice např. jako sedla speciálně navržených ventilů, výměňkové trubky, potrubí čerpadel a součásti kotlů. Vhodné jsou také na výrobu džezů, části chladniček nebo bubnů praček. [20;21]

U martenzitické korozivzdorné oceli se obvykle obsah chromu pohybuje v rozmezí od 12 do 18 % a obsah uhlíku od 0,1 do 1 %. Struktura na obrázku č. 10 je tvořena tetragonálně prostorově středěnou mřížkou, která vzniká díky vysokému obsahu chromu i při malých ochlazovacích rychlostech. Dále jsou tyto korozivzdorné oceli legovány až 4 % niklu a ostatními prvky jako měď, titan, niob, hliník a molybden. Martenzitické oceli jsou samokalitelné, tedy austenit se samovolně transformuje na martenzit při ochlazení na vzduchu. Problémem při svařování martenzitických ocelí je jejich náchylnost ke tvorbě studených trhlin a vyšší prokalitelnost. Proto se při jejich svařování zásadně používá předehřev, kontroluje se interpass teplota a dále může být vyžadováno i jejich dohřátí po procesu svařování. Teplota předehřevu je zpravidla volena v rozsahu teplot 200–300 °C. Pro tlustostěnné díly a vysoce namáhané spoje může být požadován předehřev na ještě vyšší teplotu. Doporučovaným přídatným materiálem pro svařování jsou materiály se stejným chemickým složením a menších průměrů. Důvodem je snaha o vyžihání předchozí vrstvy v co největším objemu vrstvou následující. Ve svarovém kovu, a především v pásmu přehřátí TOO, je u martenzitických ocelí limitující hodnotou požadovaných mechanických vlastností vrubová houževnatost. Proto jsou svarové spoje těchto ocelí tepelně zpracovávány. Účelem je snížení vnitřních napětí a také popuštění martenzitu. Díky obsahu austenitu v martenzitické matici je dosaženo nižších hodnot pevnosti a tvrdosti, ale vyšších hodnot tažnosti. [17;18;19]



Obr. 9 Feritická ocel. [17]



Obr. 10 Martenzitická ocel. [17]

Z těchto ocelí se vyrábí žiletky, lopatky parních turbín, trubky v energetickém a chemickém průmyslu. Tyto oceli mají odolnost proti kavitaci. Jsou vhodné pro součásti čerpadel. Korozní odolnost martenzitických ocelí je nižší než austenitických nebo feritických ocelí, a tak se stávají levnější variantou korozivzdorných ocelí. [22;23]

Austeniticko-feritické korozivzdorné oceli na obrázku č. 11, známé také jako duplexní, se skládají ze dvou fází. Tyto oceli obsahují přibližně stejný podíl feritu a austenitu. Uvedené struktury je dosaženo při obsahu 18-27 % chromu, sníženého množství niklu ve srovnání s austenitickými oceli 4-8 % a legováním molybdenem a dusíkem. U duplexních ocelí se spojují výhody obou struktur. Jedná se především o odolnost proti křehkému porušení, protože oblast feritu tvoří přirozenou bariéru proti šíření trhlin. Pevnost je obvykle dvakrát vyšší zejména díky menší velikosti zrna a dvoufázové struktuře.

Tento typ ocelí má mírně magnetické vlastnosti, které nelze zpevnit tepelným zpracováním. Duplexní oceli se svařují bez předehřevu nebo s předehřevem maximálně 100 až 150 °C. Tepelný příkon musí být omezen v určitých hranicích. Příliš nízký tepelný příkon vede ke zvýšení rychlosti ochlazování a ke zvyšování obsahu feritu. Příliš vysoký tepelný příkon zase opačně způsobuje precipitaci intermetalických fází. U nízko a středně legovaných druhů ocelí se svařuje s příkonem v rozsahu 0,5 až 2,5 kJ.mm⁻¹ a interpass teplotou nižší než 250 °C. U vysokolegovaných typů ocelí je tepelný příkon omezován na 0,2 až 1,5 kJ.mm⁻¹ s maximální interpass teplotou v rozsahu 100–150 °C. [22;23]

Pro svařování se používají přídavné materiály se zvýšeným obsahem niklu. Úkolem tohoto prvku je snížení obsahu feritu ve svarovém kovu na úroveň odpovídající základnímu materiálu, a to i při intenzivním ochlazování svarového kovu. Duplexní oceli se obvykle tepelně nezpracovávají. Vzhledem k vyšší koncentraci legujících prvků vykazují tyto oceli vysokou míru chemické heterogenity. [15;24]

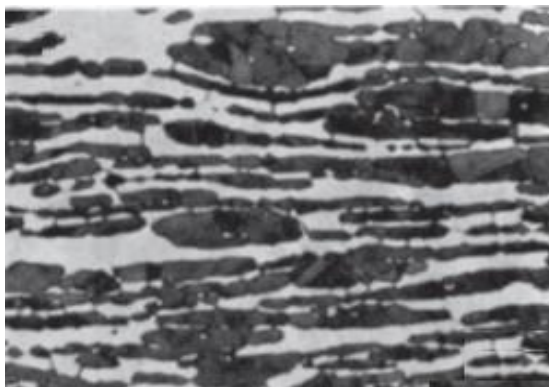
Martenziticko-austenitické oceli jsou často označovány také jako supermartenzitické anebo kvaziduplexní oceli. Představují nový vývojový trend martenzitických korozivzdorných ocelí. Oceli tohoto typu byly vyvinuty s cílem snížit nepříznivé vlastnosti martenzitických ocelí. Především nízké hodnoty nárazové práce, sníženou odolnost proti opotřebení a v neposlední řadě také zhoršenou svařitelnost. Struktura se skládá z 65-80 % vysoko popuštěného martenzitu a zbytek je tvořen stabilizovaným austenitem. [24]

Supermartenzitické oceli jsou charakterizovány velmi nízkým obsahem uhlíku pod 0,02 %, 11–13 % Cr, dále obsahem 4-6,5 % niklu s přísadou do 2,5 % molybdenu. Dalšími prvky, které optimalizují martenzitickou strukturu bez δ -feritu, jsou měď, dusík, titan a vanad. Tyto prvky jsou použity také pro zlepšení korozní odolnosti nebo jako technologické přísady např. pro zjemnění zrna. Pro dosažení jejich vlastností jsou tepelně zpracovány rychlým ochlazením do oleje z teploty normalizace, která se pohybuje v rozmezí 950-1050 °C. Dále jsou kaleny a potom následuje popouštění při teplotě 580-680 °C. Popouštěním se stabilizuje zbytkový austenit, který se již netransformuje na martenzit. Popouštění těchto typů ocelí je jednostupňové nebo dvoustupňové. V případě jednostupňového popouštění lze využít nižších teplot pro zachování vysokých mechanických vlastností nebo vyšších teplot s ohledem na kombinaci pevnosti a houževnatosti. Výsledkem tepelného zpracování může být dosažení pevnosti až 1000 MPa. Mezi nejznámější představitele tohoto typu ocelí, které jsou známé jako oceli typu COR (13 % chrom – 4–6% nikel anebo molybden), patří litá ocel CA6NM. Martenziticko-austenitické korozivzdorné oceli typu COR s nízkým obsahem uhlíku lze svařovat bez předehřevu do tloušťky 8 mm. Pro větší tloušťky lze doporučit předehřev 100–200 °C s následným tepelným zpracováním pod teplotou A1 (680 °C) [24]

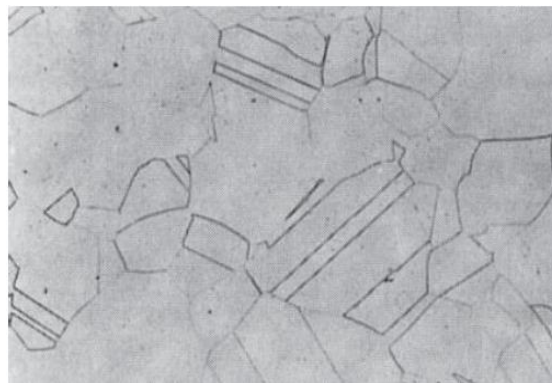
Výše uvedená supermartenzitická ocel byla vyvinuta s ohledem na dosažení svařitelnosti bez předehřevu a bez žihání na odstranění pnutí. Jde hlavně o dosažení nízké tvrdosti tepelně ovlivněné zóny svarového spoje. Toho lze dosáhnout obsahem uhlíku pod 0,015 % a nízkým obsahem dusíku. Oceli se svařují pomocí duplexních a superduplexních přídavných materiálů s ohledem na dosažení rovnoměrné korozní odolnosti a stejné pevnosti svarového spoje a základního materiálu. [24]

Austenitické korozivzdorné oceli jsou specifické tím, že jejich struktura je tvořena z převážné části austenitem fáze γ doplněným z části δ -feritem vyobrazeno na obrázku č. 12. Ocel musí obsahovat správný poměr austenitotvorných a feritotvorných prvků, aby bylo dosaženo austenitické struktury oceli. To umožňuje oceli udržet si austenitickou strukturu při normálních, zvýšených i záporných teplotách.

Austenitické oceli, kterých je mnoho druhů, reprezentují největší podskupinu korozivzdorných materiálů a obsahují minimálně 16,5 % chromu, dostatečné množství niklu, manganu a dusíku. Mají podobnou pevnost v kluzu jako nízkouhlíkové oceli, tedy zhruba 230–300 MPa. Jejich houževnatost a tažnost oproti uhlíkovým ocelím je lepší díky austenitické struktuře. [24]



Obr. 11 Austeniticko-feritická ocel. [17]



Obr. 12 Austenitická ocel. [17]

Základním typem je chrom-niklová austenitická ocel s 18 % chromu a 9 % niklu. Austenitické korozivzdorné oceli nepodléhají fázovým přeměnám a jsou nemagnetické. Je-li jejich provozní teplota vyšší než 760 °C dochází k významnému snížení korozivzdornosti. I když je uhlík austenitotvorný prvek, je u standardních korozivzdorných ocelí nežádoucí, proto je jeho obsah limitován hodnotou 0,06 %. Touto redukcí se sníží tvorba karbidů chromu při svařování a zabrání se tak mezikrystalové korozi. Pro praktické využití by bylo vhodné snížit obsah uhlíku pod hodnotu 0,02 %, což je velmi obtížné, a proto se využívají tzv. stabilizační prvky v základních i přídavných materiálech. Mezi nejpoužívanější patří titan, niob nebo tantal, které mají větší afinitu k uhlíku než chrom. Výhodnou je i to, že karbidy titanu a niobu precipitují v celém objemu zrna, a ne pouze na hranicích, jak je tomu u karbidů chromu. [24]

Svařitelnost austenitických korozivzdorných ocelí je ovlivněna nejen jejich náchylností k tvorbě teplých trhlin, ale také nebezpečím vzniku mezikrystalové koroze způsobené precipitací karbidů chromu nebo možným zkřehnutím v důsledku σ -fáze. Pro svařování jsou voleny tepelně zpracované oceli rozpouštěcím žiháním (1050 °C s následným prudkým ochlazením ve vodě) nebo stabilizované austenitické oceli zpracované stabilizačním žiháním za teploty 850 °C. Austenitické korozivzdorné oceli se svařují v zásadě bez přehřevu ve svarovém kovu s cílem vyloučit vznik trhlin za horka TOO (tepelně ovlivněné oblasti). Trhliny vznikají v důsledku tahové napjatosti fází v dendritických oblastech svarového kovu a po hranicích zrn v TOO při výskytu nízkotavitelných eutektických směsí. Z uvedeného důvodu se doporučuje u normálních korozivzdorných austenitických ocelí a svarových kovů 3–15 % δ -feritu. Svařuje se velmi malým vneseným teplem, s minimálním tepelným příkonem do hodnoty 1,5 kJ.mm⁻¹. Interpass teplota nemá přesáhnout 150 °C a poměr mezi šířkou a hloubkou svarové lázně má být nejvýše 1,5. Tyto oceli se svařují přídavnými materiály se stejným nebo podobným chemickým složením. Přídavné materiály jsou navrženy tak, aby bylo ve svarovém kovu dosaženo zvýšení odolnosti vůči teplým trhlinám. Obsahují obvykle více legujících prvků, které kompenzují účinky segregace a ztráty prvků tzv. propalem. Austenitické korozivzdorné oceli se po svařování tepelně nezpracovávají. [24]

2.1.1 Zvláštnosti při svařování austenitických ocelí

Austenitické oceli mají přibližně o 50 % větší tepelnou roztažnost a asi o 30 % nižší tepelnou vodivost než oceli feritické. Při provádění svarových spojů se to projeví vznikem větších deformací a napětí v porovnání s feritickou ocelí. Vzhledem k požadované austenitické struktuře materiálu mají tyto oceli lepší mechanické vlastnosti. Těmi jsou právě tažnost a houževnatost, které jsou u některých typů mnohem příznivější než u uhlíkové a nízkolegované oceli. Obsah chromu je většinou větší jak 16,5 % a to s dostatečným množstvím niklu anebo manganu, uhlíku a dusíku pro vytvoření austenitické mikrostruktury. Svařitelnost austenitických chrom-nikl ocelí je ze všech korozivzdorných ocelí nejlepší přesto je ovlivňována několika vnějšími vlivy a hlavními faktory, které jsou v procesu svařování nežádoucí. Faktory, které nejvíce ovlivňují svařitelnost austenitických ocelí, jsou:

- tvorba teplých krystalizačních trhlin – vznikají při tuhnutí svarového kovu,
- zkřehnutí vlivem sigma (σ) fáze – sloučenina, která je příčinou zkřehnutí ocelí,
- precipitace karbidů chromu – důsledkem je mezikrystalová koroze (MKK).

Teplé krystalizační trhliny, které jsou někdy také označovány jako trhliny za horka patrné z obrázku č. 13, je možné rozdělit podle skutečného vzniku a umístění ve svarovém spoji. Jedná se o tzv. dendritické trhliny, které vznikají v mezikrystalové struktuře a šíří se po hranicích dendritů na obrázku č. 14. Vznikají při vysokých teplotách a vlastním ochlazení na okolní teplotu v důsledku velké roztažnosti kovu. Dále je možné do skupiny krystalizačních trhlin zařadit likvační a polygonizační trhliny vznikající na rozhraní svarového spoje a v úzkém okolí svarového spoje v tzv. tepelně ovlivněné oblasti (TOO). Příčinou vzniku teplých trhlin jsou prvky jako je síra, fosfor, křemík či titan. Při tuhnutí mohou snižovat plasticitu kovu v mezidendritických prostorách nebo mohou se železem a niklem vytvářet nízko tavitelná eutektika výrazně snižující technologickou pevnost hranic zrn. Rozhodujícím faktorem pro snížení náchylnosti austenitických ocelí k tvorbě teplých trhlin je obsah δ -feritu rozpouštějícího fosfor při teplotách vzniku těchto trhlin. Brání tak tvorbě tavitelného eutektika, které by fosfor vytvořil s železem nebo niklem. [6;12;28]

Vyšší obsah jak 15 Feritového čísla (FN) vede ke snížení antikorozních vlastností a podporuje vznik sigma (σ) fáze. Pro hodnocení náchylnosti austenitických ocelí stabilizované niobem ke vzniku teplých trhlin se nejčastěji používá výpočNb-5,5et kritéria L a ΔH :

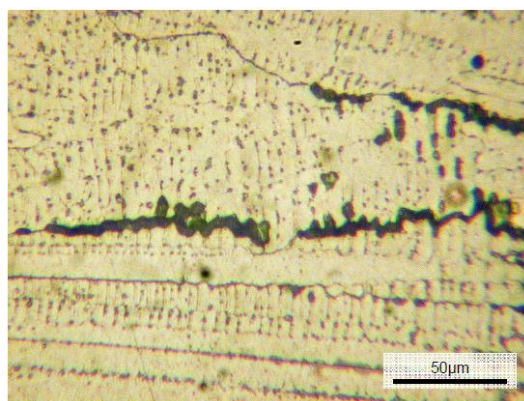
$$L = 299. hm. \%C + 8. hm. \%Ni + 142. hm. \%Nb - 5,5. hm. \% \delta^2 - 105 \quad (2.1)$$

$$\Delta H = -700. hm. \%C + 17h. m. \%Cr - 37. hm. \%Ni - 117. hm. \%Nb + 29. hm. \%Mo + 188 \quad (2.2)$$

Do jednotlivých vztahů se dosazují hmotnostní obsahy prvků v daném materiálu a obsah δ – feritu v procentech. Pak tedy platí, jeli $L > 0$ a $\Delta H < 100$ je austenitická ocel náchylná ke vzniku teplých trhlin. [12;22]



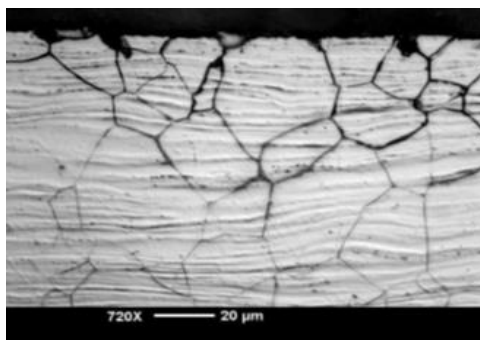
Obr. 13 Krytalizační trhlina. [27]



Obr. 14 Horké trhliny ve svarovém kovu. [28]

Výsledkem zkřehnutí vlivem sigma (σ) fáze je tvrdá křehká intermetalická sloučenina. Tato sloučenina je příčinou zkřehnutí materiálu s obsahem chromu převážně u austenitických ocelí. Může vzniknout ve svarových spojích při teplotách 550-820 °C. Fáze sigma je stabilní do teploty 820 °C a nad touto teplotou přibližně při 825 °C se přemění na fázi alfa (α). Je několik činitelů, které podporují fázi σ . Jedním z nich jsou vlastní feritotvorné prvky jako jsou křemík, hliník, titan, molybden, niob vyvolávající fázi α , která je bohatší na chrom a usnadňuje tak přeměnu ve fázi σ . Dalším takovým podstatným činitelem je heterogenita taveb, která lokálně obohacuje fázi α o chrom, nebo místní přesycení chromem při rychlém ochlazení. U jemnozrnných struktur fáze σ vyprecipituje v nesouvislý útvar na hranicích zrn díky velkému povrchu zrn. U hrubozrnných struktur fáze σ migruje velice snadno k hranicím zrn a velmi snadno se rozloží na jejich povrchu (malý povrch zrn). Tím vznikne mezikrystalová křehkost. Sigma fáze se projeví zejména při vyšších obsahech než 22 hm % chromu a molybdenu. Svařování provádíme s limitním tepelným příkonem do svarového spoje. Používáme mírně přelegovaný přídavný materiál ke kompenzaci ztrát legujících prvků při svařování. [28]

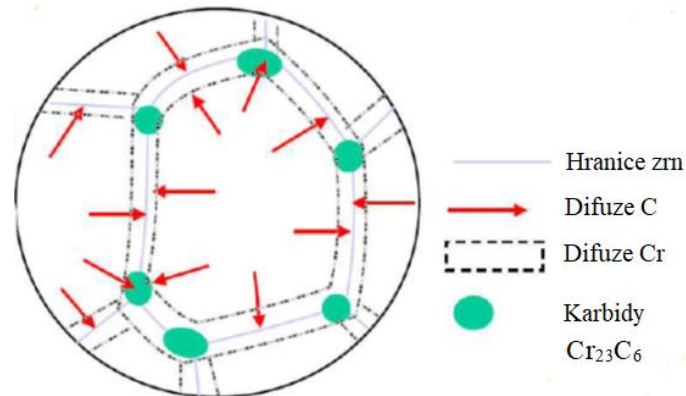
Mezikrystalová koroze patří mezi typy nerovnoměrné koroze. Tato koroze patrná na obrázku č.15 je nejvýznamnějším příkladem účinku strukturálních změn kovu. Příčinnou mezikrystalové koroze je chemická heterogenita kovu na hranicích zrn. Tento děj nastává nejčastěji při svařování, kde v místě svaru dochází k precipitacím karbidů $Cr_{23}C_6$ a nitridů Cr_2N na hranicích zrn. K precipitaci u austenitických ocelí dochází nejčastěji při pomalém ochlazení oceli v teplotní oblasti 815-425 °C. Takto vznikají lokace ochuzené o chrom. Tyto oblasti korodují přednostně, zrna ztrácejí soudržnost a materiál mechanickou pevnost, aniž by došlo k pozorovatelné vizuální změně na povrchu oceli. Tímto se tato koroze řadí mezi velice nebezpečné. [1;27;33]



Obr. 15 Mezikrystalová koroze. [27]

Vznik mezikrystalové koroze má tři teorie vysvětlující působení karbidových precipitátů na její vznik.

- teorie ochuzení – změna chemického složení tuhého roztoku na rozhraní zrn v okolí precipitátů. Difúze chromu je o něco pomalejší než difúze uhlíku a dusíku. Z tohoto důvodu uhlík (popřípadě dusík) difunduje z vně i vnitřku zrna. Chrom difunduje pouze z rozhraní či z okrajů zrn austenitu. Vyloučením karbidů klesne obsah chromu v povrchové vrstvě na hranicích zrn tak, že tato vrstva přestává být schopná pasivace. Mezi částicemi precipitátů vznikají místa ochuzená o chrom, což jsou místa náchylná k mezikrystalové korozi na obrázku č. 16. [27;33]



Obr. 16 Ochuzení hranice zrn. [31]

- teorie napětí – energetickými rozdíly v místech vylučování sekundární fáze. Vznikem velkého vnitřního pnutí jsou ve struktuře oceli iniciovány velké rozdíly energií a ty se projeví nedokonalou pasivací hranic zrn. Vyšší pnutí bude pravděpodobnější při ochlazení z teplot rozpouštěcího žhání na teplotu normální než vlastní precipitace za zvýšených teplot. [27;33]
- teorie článku – rozpouštěním rozhraní zrn následkem vzniku místních článků, kdy jedna teorie tvrdí, že katodou je ušlechtilější karbid a anodou se stává méně ušlechtilý kov. Druhá tvrdí opak. Důkazy a vysvětlení mechanismu mezi krystalové koroze teorií mikročlánků jsou tak malé a nepravděpodobné, že se přiklání k teorii ochuzení. [27]

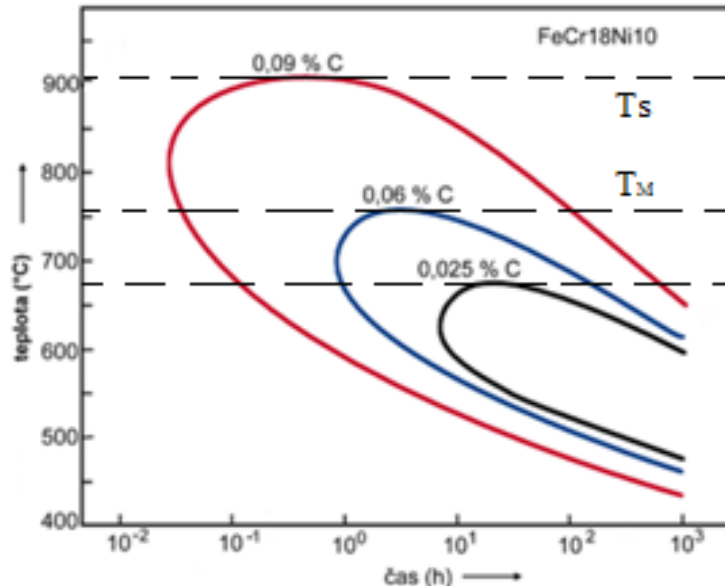
Z výše uvedených informací vyplývá, že vlastně všechny teorie uvádí za základní příčinu vzniku mezikrystalové koroze precipitaci karbidů a nitridů chromu. Ovlivněním vzniku precipitace lze zvýšit odolnost austenitických ocelí proti této korozi. Potlačení karbidů chromu je závislé na několika činitelích, které se dají rozdělit do několika základních skupin. V podstatě se jedná o chemické složení ocelia působení uhlíku. Základním problémem je, že uhlík umožňuje vznik karbidů na hranicích zrn a tím vlastně způsobuje tzv. zcitlivění austenitických ocelí a mezikrystalovou korozi. Dle teoretických poznatků lze tento problém vyřešit radikálním snížením obsahu uhlíku pod 0,02 %, kdy by tato koroze neměla vzniknout. Pro austenitickou ocel s obsahem niklu kolem 10 % je možné využít vztahu mezi nejvyšším obsahem chromu a uhlíku. [27;29;30;32;33]

$$C_r \geq 80C + 16,8 \quad (2.3)$$

Tento použitý vztah pro klasickou austenitickou ocel při obsahu 18 % chromu značí celkové množství uhlíku pod 0,015 %. [4]

Rychlost mezikrystalové koroze závisí nejen na době ohřevu, ale také na teplotě. Během ohřevu např. při svařování austenitických ocelí probíhají ve struktuře materiálu vlastně dva děje. Jeden z nich citlivost k mezikrystalové korozi vyvolává a druhý ji zase potlačuje. Oba

tyto děje jsou však závislé na teplotě, přesněji na rychlosti difuze chromu a uhlíku či dusíku. Z Rollasonova diagramu na obrázku č. 17 je patrné, že od teploty T_M a výše není austenitická ocel citlivá k mezikrystalové korozi. [4;12;27]



Obr. 17 Kinetika zcitlivění austenitických vysokolegovaných ocelí v závislosti na teplotě, obsahu uhlíku a době expozice. [27]

Stabilizačními prvky titanem, niobem a tantalem, které se přidávají do austenitických ocelí, lze také snížit náchylnost oceli k vzniku mezikrystalové koroze, neboť tyto prvky mají větší afinitu k uhlíku než k chromu a tím pádem vzniknou karbidy sloučenin těchto prvků. Tento způsob je využíván při výrobě austenitických ocelí, protože je obtížné snížit obsah uhlíku pod 0,02 %. Karbidy, které vzniknou zabrání ochuzení hranic zrn o chrom. [4;12;27]

Podle obsahu uhlíku musí být dodržen poměr přidávaných prvků, aby došlo ke stabilizaci korozivzdorné oceli. V praxi se jedná o tyto poměry prvků: [4;12;27]

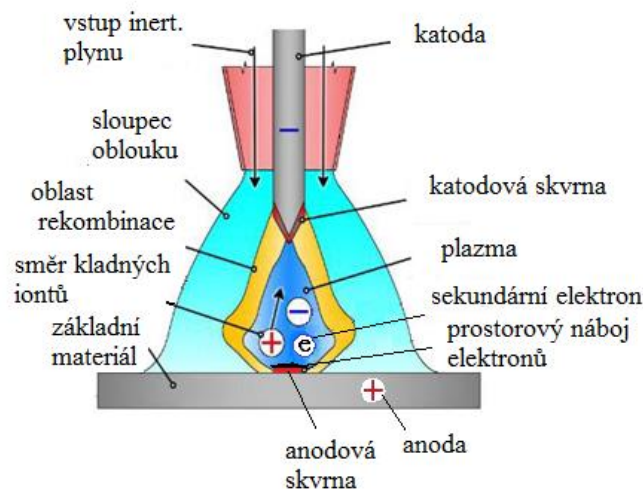
$$\frac{N_b}{C} \geq 12; \quad \frac{T_i}{C} \geq 4; \quad \frac{T_a + N_b}{C} \geq 8; \quad \frac{T_a}{C} \geq 12$$

Stabilizace austenitických ocelí danými prvky řeší mezikrystalovou korozi převážně v rozmezí teplot zcitlivění 425–815 °C. Při svařování se tento problém přesouvá do přehřátého pásma TOO, kde v oxidačním prostředí může dojít ke vzniku tzv. nožové koroze. Z tohoto důvodu by bylo vhodnější použít austenitické oceli s velmi nízkým obsahem uhlíku a dusíku. Ve světové literatuře je popsáno legování niobem jako stabilizačním prvkem u přídavných materiálů ke svařování. Dle těchto teorií to je zásadní způsob, jak předejít vzniku mezikrystalové koroze při svařování. Cena těchto přídavných materiálů ke svařování je však mnohem vyšší. I titan, jak bylo zmíněno výše, je vhodným legujícím prvkem pro stabilizaci austenitické oceli. Vykazuje však vysokou afinitu ke kyslíku, a proto má v procesu svařování větší tzv. propal a jeho účinnost je tedy mnohem nižší. [4;12;27]

2.2 Metody svařování austenitických ocelí

Svařování austenitických ocelí patří mezi nerozebíratelná spojení dvou nebo více materiálů se stejným anebo rozdílným chemickým složením. Proces funguje na principu vytvoření termodynamických podmínek, při kterých vznikají nové meziatomové vazby. Je to také jediný způsob spojení dvou anebo více součástí do jednoho nerozebíratelného celku. Svarové spoje se vytváří metalurgickými pochody, kde dochází k lokálnímu roztavení základního a přídatného materiálu. Samotný svařovací proces probíhá tak, že do místa svaru přivedeme velké množství tepelné energie, která nám svařovaný materiál roztaví a vznikne svarová lázeň. Do svarové lázně je většinou přidáván přídatný materiál, který po smísení se základním materiálem vytvoří svarový kov spoje. Zde proběhne spojení slitím svařovaného materiálu. Svařování se odlišuje od běžných metalurgických pochodů především tím, že se taví současně jak svarová plocha, tak i přídatný materiál. Dále se jedná o lokální ovlivnění, což vyvolá tepelnou nestejnorodost ve svařovaném dílu. Roztavený kov má tendenci reagovat s některými prvky atmosféry (dusík, kyslík). Reakce těchto plynů ve svaru je nežádoucí, a proto se jí snažíme zamezit použitím ochranných plynů strusek a tavidel. [4;5;12]

Svařitelnost základních kovových materiálů je jednou z nejdůležitějších technologických vlastností, které je nutné znát při řešení svarových spojů, a to obzvláště u korozivzdorných austenitických ocelí. Pod pojmem svařitelnost rozumíme kompletní charakteristiku materiálu, která za určitých technologických podmínek určuje technickou vhodnost a způsobilost materiálu vytvářet požadovaný kvalitní svarový spoj. Všechny běžné metody svařování lze rozdělit do dvou základních skupin, a to na metody tavného svařování a metody tlakového svařování. Rozdělení jednotlivých metod a jejich číselné označení je uvedeno v ČSN ISO 857. Číselné označení je dále používáno v projektových a svářečích dokumentacích např. WPQR anebo WPS. V energetickém průmyslu se zhotovují svarové spoje na potrubních systémech právě metodou obloukového tavného svařování. Metody, které se běžně v praxi používají pro svařování korozivzdorných materiálů, využívají zákonitosti elektrického oblouku. Při svařování je využíván elektrický oblouk k přeměně elektrické energie na tepelnou. Elektrický oblouk využitelný ke svařování na obrázku č. 18 je nízkonapěťový elektrický vysokotlaký výboj, který hoří v prostředí ionizovaného plynu. Stabilně hoří za předpokladu napětí dostatečného pro ionizaci daného prostředí a proudu udržujícího plazma oblouku v ionizovaném stavu. Fyzikální a metalurgické děje probíhají v oblouku velmi rychle a za vysokých teplot. [4;5;12]



Obr. 18 Části elektrického oblouku. [5]

Na uvedeném obrázku jsou znázorněny zásadní mechanismy a vlivy oblouku, který se využívá ke svařování. Níže je jejich stručný popis:

- katodová skvrna – je ostře ohraničená oblast, která termickou emisí emituje prvotní elektrony důležité pro zapálení oblouku a ionizaci plynného prostředí.
- sloupec oblouku – je zářivě svítící oblast disociovaného a ionizovaného plynu ve formě plazmy mezi elektrodami, která dosahuje vysokých teplot.
- anodová skvrna – neutralizuje a odvádí dopadající záporné částice. Kinetická energie částic se mění na tepelnou energii a z části i na elektromagnetické záření.

Pro obloukové svařování se používá několik druhů elektrod. Elektrody mohou být:

- netavené (uhlíkové, wolframové) elektrody – slouží jako prostředek k vytvoření oblouku a nejsou součástí svarového kovu. Wolframové se využívají pro svařování metodou TIG.
- tavné elektrody – mají většinou stejné složení jako svarový materiál, teplem oblouku se odtavují a dodávají do svaru přídatný kov. Tyto jsou využívány jako tzv. holé (dráty) při svařování v ochranné atmosféře, nebo pod tavidlem. Dále je možné používat elektrody obalené kde úkolem obalu je stabilizovat oblouk, chránit svarový kov před účinky atmosféry, zpomalit chladnutí svaru vytvořenou struskou a dodat do svarové lázně některé přísadové prvky (Ni, Cr, Mo). V převážné většině využívané metodou MMA. [4;5;12]

Tavné svařování má několik metod, které využívají elektrického oblouku a jsou uvedeny v normě ČSN EN ISO 4063 kde je i jejich označení. Některé z těchto metod svařování jsou v dnešní době nejčastěji používány pro realizaci svarových spojů na Jaderných elektrárnách včetně výroby součástí a pro instalaci potrubních systémů z austenitických ocelí. Označení metod je založeno na číselném značení podobě jedno, dvou a tříčíselné značky. V praxi se uvádí převážně jen značka tříčíselná definující konkrétní podskupinu metody svařování. Níže jsou uvedeny nejčastěji používané metody včetně nově nastupujícího trendu, a to je automatizované svařování za použití jednoúčelových svařovacích zdrojů. Dále lze využívat i zařízení pro ruční svařování s kontinuálním podáváním svařovacího drátu. [4;38]

2.2.1 Svařování metodou MMA

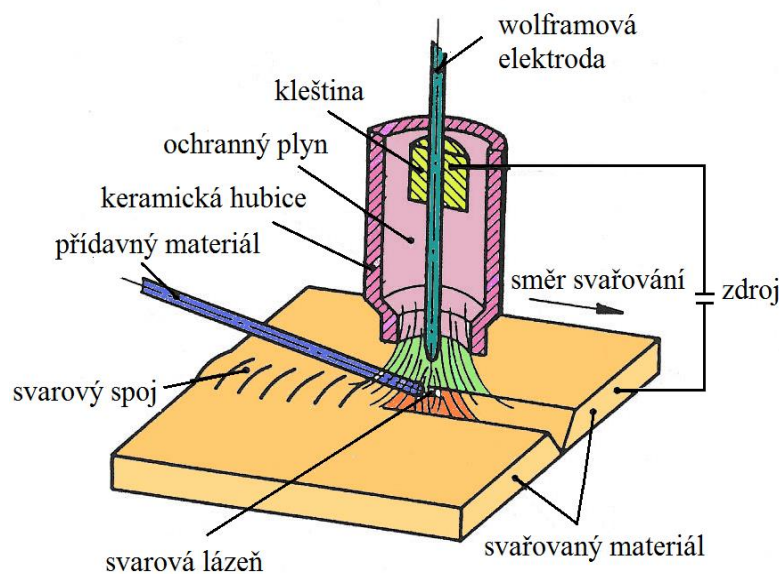
Svařování elektrickým obloukem obalenou elektrodou MMA (111) je metoda, kde je zdrojem tepla elektrický oblouk, který hoří mezi elektrodou a svařovaným materiálem zapojenými na vhodný elektrický zdroj. Teplem elektrického oblouku dojde lokálnímu natavení a k následnému spojení svařovaných materiálů. Při svařování se používá stejnosměrný nebo střídavý proud o intenzitě 30–500 A, i více a napětí 10 až 70 V. Zdrojem stejnosměrného proudu jsou točivé svařovací agregáty a zdrojem střídavého proudu jsou svařovací transformátory. [1;4;12;26]

Teplem elektrického oblouku se taví svařovaný materiál, kovové jádro elektrody i její obal. Struska chrání odtavované kapky kovu před škodlivými účinky vzduchu, vytvoří plynovou clonu také zpomaluje rychlost ochlazování, eliminuje vznik teplotních pnutí a s tím spojených deformací materiálu. Pro kvalitní svarový spoj je nezbytné, aby obal elektrod byl vždy velmi suchý a nenesl v sobě vzdušnou vlhkost. Před započítím svařování se doporučuje provést přesušení elektrod. Pro ruční svařování elektrickým obloukem se jako přídatný materiál používá obalených elektrod. Tyto se skládají z jádra a z obalu elektrody. Jádro elektrody tvoří drát průměru 1,6 mm, 2,0 mm, 2,5 mm, 3,2 mm, 4,0 mm, 5,0 mm a 6,0 mm. Tato metoda je v dnešní době u svařování korozivzdorných austenitických ocelí v energetickém průmyslu na ústupu. Přesto, že je tato metoda poměrně jednoduchá je nutné mít velmi zručný a kvalifikovaný personál.

Dále je nutné pro okamžité použití svařovacích elektrod vlastnit temperované sklady kvůli jejich vzdušné vlhkosti. Svařování obalenou elektrodou je v dnešní moderní době používáno spíše na instalaci potrubních tras z nízkolegovaných ocelí, a to většinou v kombinaci s metodou TIG, kdy je touto metodou vyhotovena kořenová vrstva a následně je použita právě metoda MMA k vyhotovení výplně a krycí vrstvy svarového spoje. [1;4;26]

2.2.2 Svařování metodou TIG

Jednou z nejvýznamnějších a nejpoužívanějších metod svařování v jaderných elektrárnách je svařování v ochranné atmosféře plynu netavící se elektrodou metodou TIG (141) znázorněno na obrázku č. 19. Má zásadní vliv na kvalitu výrobků a potrubních systémů používaných k dopravě různých médií. Svařování lze také považovat za zvláštní proces dle EN ISO 9001, při kterém nelze zcela zjistit jakost po skončení procesu konečnou inspekci, ale požadovaná jakost musí být sledována již před zahájením procesu, a hlavně v celém jeho průběhu svařování. [1;39;44].



Obr. 19 Metoda svařování TIG. [1;44]

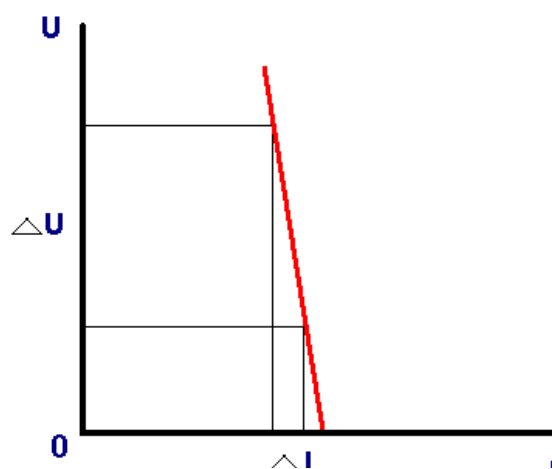
Při této svařovací metodě hoří elektrický oblouk mezi netavící se elektrodou a základním svařovaným materiálem, přičemž je svarová lázeň, elektroda a nejbližší okolí svaru chráněno inertním plynem před účinky okolní atmosféry hlavně kyslíku a dusíku ze vzduchu. V převážné většině je používán jako inertní plyn argon. Protože se elektroda nemá odtavovat, musí být vyrobena z materiálu, který odolává velmi vysokým teplotám. Tuto podmínku splňuje wolframová elektroda, která je pomocí kleštiny upnutá v hlavici TIG hořáku. Pomocí kleštiny je do elektrody přenášen také svařovací proud. Hořák je dále opatřen hubicí, kterou ven proudí plyn vytvářející v místě svařování inertní (netečnou) ochrannou atmosféru usnadňující zapalování oblouku. Svařování může být provedeno buď pouhým roztavením a slitím základních materiálů dohromady (bez použití přídavného materiálu) nebo s přidáním přídavného materiálu v podobě svařovacích kovových tyčinek (drátů) podobného složení jako má základní materiál. [1;5;26]

Parametry svařování u metody TIG jsou veličiny, které je nutné určit při tvorbě svářecí dokumentace WPS v souvislosti s předpisy a normami, které podmiňují jakost svarových spojů. [1;5;26]

Celý tepelný režim při svařování je daný třemi základními parametry:

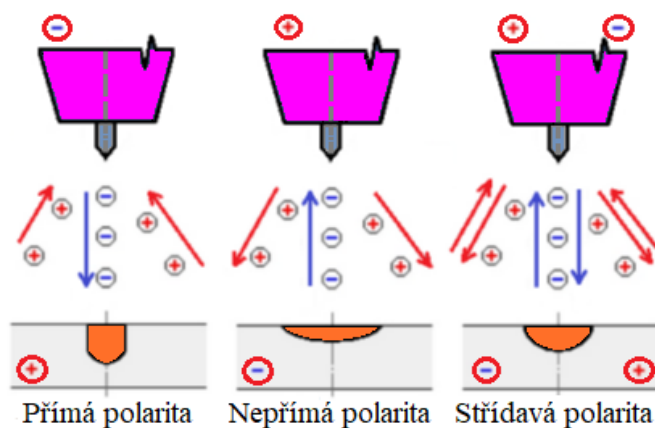
- velikostí svařovacího proudu, který je volen podle síly svařovaného materiálu, tepelné vodivosti, podle typu spoje, polohy svařování a svařovací rychlosti,
- velikostí napětí na oblouku, závisící na délce oblouku,
- rychlostí svařování, která závisí na intenzitě svařovacího proudu a na jeho druhu.

Stabilita celého procesu svařování u metody TIG je dána, jak již bylo výše zmíněno několika faktory. Pro tuto metodu svařování se používá zdroj svařovacího proudu s tzv. strmou statickou voltampérovou charakteristikou. Tedy v principu stejný zdroj jako pro ruční svařování obalenými elektrodami. Tato charakteristika je v idealizované podobě znázorněna na následujícím obrázku č. 20. V-A znamená "voltampérová" a vyjadřuje závislost napětí (U) a proudu (I). Napětí na oblouku je úměrné délce oblouku. Lze si to tedy vysvětlovat i tak, že i při velké změně délky oblouku (vlivem nedokonalosti držení hořáku svářečem v ruce) se svařovací proud mění jen minimálně. [39;40; 41]



Obr. 20 Voltampérová charakteristika TIG svařování. [41]

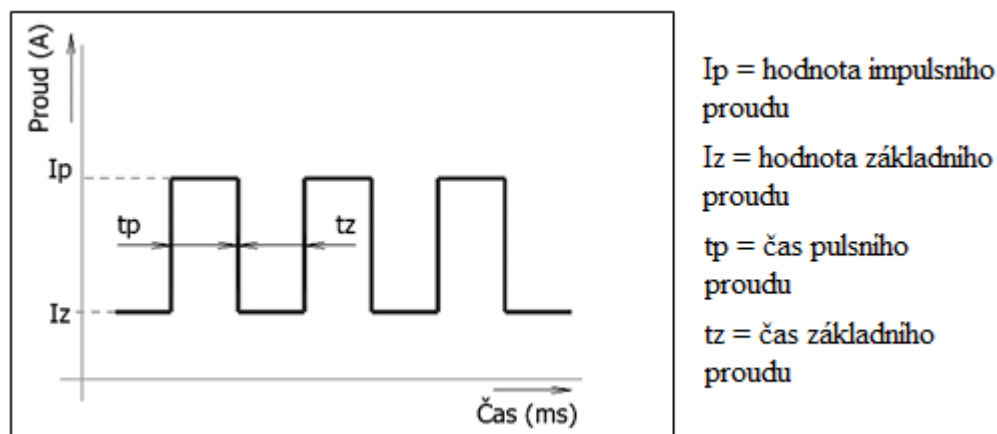
Při svařování metodou TIG je možné využít i různou polaritu proudu. Můžeme svařovat jak stejnosměrným, tak i střídavým proudem a případně pak impulsním proudem. Při svařování stejnosměrným proudem máme dále možnost použít tzv. přímou nebo nepřímou polaritu, která má vliv na tvar a hloubku návaru svarového kovu. Na obrázku č. 21 je znázorněno schéma vlastního zapojení. [41;44]



Obr. 21 Vliv polarity na tvar svaru. [5]

Svařování stejnosměrným proudem je základní způsob zapojení při svařování metodou TIG. Svařovací elektroda v podobě wolframu je ve většině případů zapojena k zápornému pólu zdroje a základní materiál tedy k pólu kladnému. Toto nastavení označujeme jako přímé zapojení. Teplo oblouku je rozloženo tak, že 1/3 připadá na elektrodu a zbylé 2/3 na základní materiál. Tímto zapojením nedochází k přílišnému přetěžování elektrody, ta je tak schopna snášet i větší proudové zátěže. Oblast použití přímého zapojení je široká, od různých ocelí přes měď a nikl až po titan a jejich slitiny. Tato konfigurace zapojení umožňuje hluboký průvar materiálu. Osvědčilo se rovněž svařování hliníku, kdy vlivem vysoké teploty dojde k rozpuštění oxidů hliníku, ty se pak stahují k okraji svarové lázně a střed zůstává čistý. Při zapojení nepřímé polarity, tedy elektroda je na plus pólu zdroje a materiál na pólu minusovém, je distribuce tepla opačná. Je nutné použít mnohem silnější elektrody, a to i pro relativně malé proudy. Z tohoto důvodu není konfigurace příliš využívána, jen výjimečně při svařování tenkostěnných hliníkových svarů. [6]

V minulosti se předpokládalo, že svařovací proud, ať už DC či efektivní hodnota AC, má konstantní průběh. Tedy, že jeho velikost se během svařování nemění a zůstává na hodnotě nastavené svářečem. Kromě konstantního průběhu lze však použít i tzv. pulsní proud. Pak mluvíme o tzv. pulsním svařování, či svařování v pulsu. Principem je periodické střídání intenzity proudu, která se pravidelně mění v čase, a to mezi dvěma hodnotami, základním proudem I_z a impulsním proudem I_p , znázorněno na obrázku č. 22. Základní svařovací proud I_z je nastaven svářečem na požadovanou hodnotu. Tento proud zajišťuje dobrý průvar. Proud I_p nastavuje, buď také manuálně svářeč, nebo jej nastavuje svářečka automaticky v závislosti na hlavním proudu.

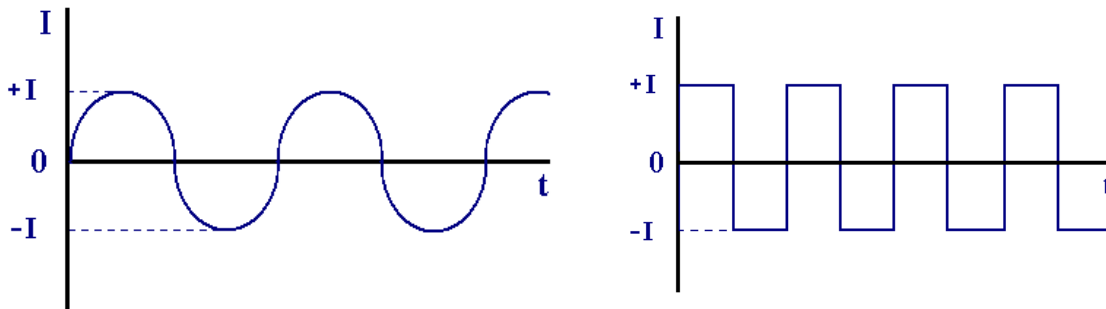


Obr. 22 Průběh pulsního proudu. [6]

Velikost I_p se většinou volí v procentech hlavního proudu I_z (cca 20–50 %). Proud I_p zajistí ionizaci prostředí a tedy "podržení" hořícího oblouku, ale nestačí k vytvoření tavné lázně a materiál se ochladí. Výsledkem je menší tepelné ovlivnění základního materiálu. Správně nastavenými pulsy lze úspěšně ovlivňovat hloubku závaru i šířku svaru. Dochází k menšímu promíšení základního materiálu, což přináší výhody při svařování heterogenních spojů. [5,41]

Funkci impulsního proudu je nastavení materiálu a tvorba svarové lázně. Tvar a velikost lázně se dobře koriguje díky amplitudám a době trvání impulzu. Průměrné hodnoty svařovacího proudu jsou nižší, než je tomu při klasickém svařování (konstantní proud). Proto svary mají menší TOO a zmenšenou náchylnost k tvorbě trhlin. Výhody použití impulsního typu proudu jsou zejména lepší mechanické a plastické vlastnosti svaru, dobré formování housenky a možnost svařovat i tenké plechy (0,5 mm). [6]

Svařování střídavým proudem – v případě střídavého proudu dochází ke svařování oběma výše zmíněnými způsoby zapojení, tedy s přímou a nepřímou polaritou. Střídavý proud je totiž tvořen zápornou a kladnou půlvlnou znázorněno na obrázku č. 23, které se periodicky střídají. Využívá se zejména pro svařování hliníku, případně hořčíku a jejich slitin. Tyto kovy si vytváření na svém povrchu pasivační vrstvu oxidů, které mají vyšší stupeň tavení, nežli je samotná základní matrice kovu. V případě hliníku je teplota tavení oxidů 2050 °C a teplota tavení hliníku samotného pouze 658 °C. Abychom se oxidů zbavili, použijeme právě střídavý proud. [6]



Obr. 23 Průběhy střídavého proudu. [6;41]

2.2.3 Výhody a nevýhody metody TIG svařování

Nejvýraznější výhodou této metody je výborná kontrola nad svarovou lázní. TIG je zkratka precizní metoda. Svařovací oblouk je stabilní a svarová lázeň je čistá bez příměsí strusky, svarový kov je bez póru a bublin s vysokou chemickou čistotou. Díky těmto vlastnostem je pro svářeče tato metoda lépe ovladatelná. Při ručním svařování si svářeč přidává svarový materiál dle potřeby a tím ovlivňuje kvalitu spoje. Metodou TIG lze také svařovat zcela bez přídavného materiálu (např. roztavením lemu u lemového spoje), což je z metalurgického hlediska nejlepší, protože svarový kov má 100 % shodné chemické složení se základním materiálem. Nedochozí tedy k zanesení jiných prvků do svarového kovu. Z dalších pozitivních vlastností můžeme jmenovat příznivé tvarování svarové housenky na povrchu i v kořeni a dobré ovládání v různých polohách svařování. Zajímavá je také možnost svařování velice tenkých materiálů. Při TIG svařování je totiž možné používat velmi malé proudy (od jednotek ampér) a z toho vyplývá možnost svařování opravdu velmi tenkých materiálů. V extrémních případech lze při použití speciálních zdrojů a hořáků svařovat i kovové fólie či šperky proudy menšími než 1 ampér. V dnešní době je další velkou výhodou této metody její automatizace pro jednoúčelové aplikace zařízení pro svařování. Při automatizovaném svařování lze využít několika průběhů svařovacího procesu kde je možné nastavovat ovládání proudu, napětí, intervalu pulsního svařování a v neposlední řadě také rychlost podávání drátu či jeho teplotu. [5;6]

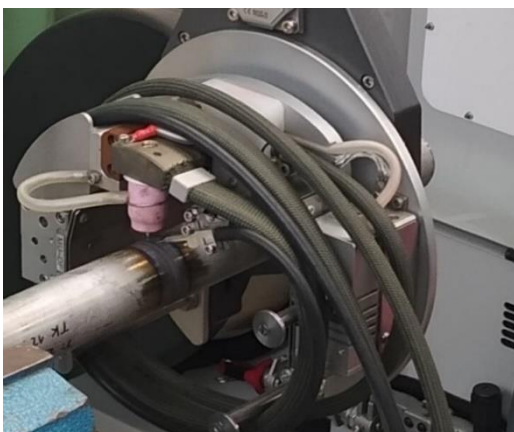
Zásadnější nevýhodou je malá produktivita. Zejména ruční svařování metodou TIG je prostě pomalé. Je to dáno hlavně tou precizností, která je v předešlé části vyzdvižnutá jako hlavní přednost metody. Proto se ruční svařování TIG nehodí na velkosériovou výrobu relativně jednoduchých svařenců, ale spíše na tvarově složité konstrukce z ušlechtilých materiálů. Další nevýhodou je i vysoká technická náročnost na svařovací zařízení, zejména při svařování střídavým proudem, které je komplikovanější a dražší než svařečky pro jiné běžné metody svařování. V některých případech, jako je svařování potrubí, se metodou TIG svařují jen kořenové vrstvy, u kterých velmi záleží na kvalitě provedení. Výplňové a krycí vrstvy se pak provádí efektivnějšími metodami svařování (MMA, MIG/MAG). [6]

2.3 Mechanizované svařování metodou TIG

Moderní doba a automatizace průmyslového odvětví umožňuje v dnešní době stále více rozvíjet metodu TIG v mechanizované a automatizované svařování. Ve srovnání s ručním svařováním se mechanizované a robotizované svařování TIG vyznačuje lepší ekonomičností a kvalitou svarů. Cílem mechanizovaného nebo automatizovaného svařování je právě zvyšování produktivity procesu svařování a kvalita svarového spoje s vyloučením vlivu manuálního vedení hořáku svářečem. Tímto způsobem se eliminuje kolísání délky oblouku a nepřesnost vedení hořáku ve svarovém úkosu. Je to také způsob, jak snížit chybovost a únavu svářečů anebo nedostatek kvalifikovaného personálu na trhu práce. Dále tato metoda vede ke zlepšení hospodárnosti procesu s úsporou plynu a přídavných materiálů. V dnešní době je vyvinuto mnoho aplikací pro mechanizované svařování metodou TIG. Většina vyvinutých automatizovaných zařízení jsou jednoúčelová zařízení pro určitou aplikaci. [6; 46]

Běžně se dnes využívá mechanizované svařování metodou TIG při svařování korozivzdorných trubek a trubkovnic u výroby tepelných výměníků nebo chladičů. Také je dnes běžné svařování orbitálním způsobem u potrubních systémů pro různé svařované materiály. Běžně lze svařovat potrubí různých průměrů od 10 mm až po rozměry velkých potrubních tras. Na obrázku č. 24 je vyobrazena hlava zařízení při svařování heterogenních svarových spojů pro jadernou elektrárnu. Při orbitálním svařování trubek velkých průměrů je svařovací hlava přichycena na tvarovanou vodící dráhu a vykonává kruhový pohyb přibližně 375° tak, aby byl začátek svarové housenky překrytý. Dnešní moderní zařízení svařují pulsním proudem a také s pulzací přídavného drátu. Regulace parametrů svařování se provádí v závislosti na poloze svařovací hlavice vůči potrubí. Orbitální mechanizované svařování se dnes používá při výrobě součástí pro energetická zařízení, a hlavně tam, kde je možné provést přípravu svarových ploch strojně s určitou přesností výroby. [6;46]

Díky automatizaci je možné používat i zařízení, které jsou vlastně vyráběna pro jednoúčelová zaměření k provedení svarových spojů anebo i návarů svarového kovu. Příkladem je nestandardní metoda svařování WOL. Tato metoda byla vyvinuta pro opravu heterogenních svarových spojů, které v rámci dlouhodobého provozu vykazují citlivost na korozní praskání pod napětím v primárním médiu. Právě tato metoda a vyvinuté zařízení umožňuje svou aplikací eliminovat faktory tahové zbytkové napjatosti, které vytváří trhliny v materiálu. Na obrázku č. 25 je zařízení v provozu při opravě v jaderné elektrárně. [6;46;47]

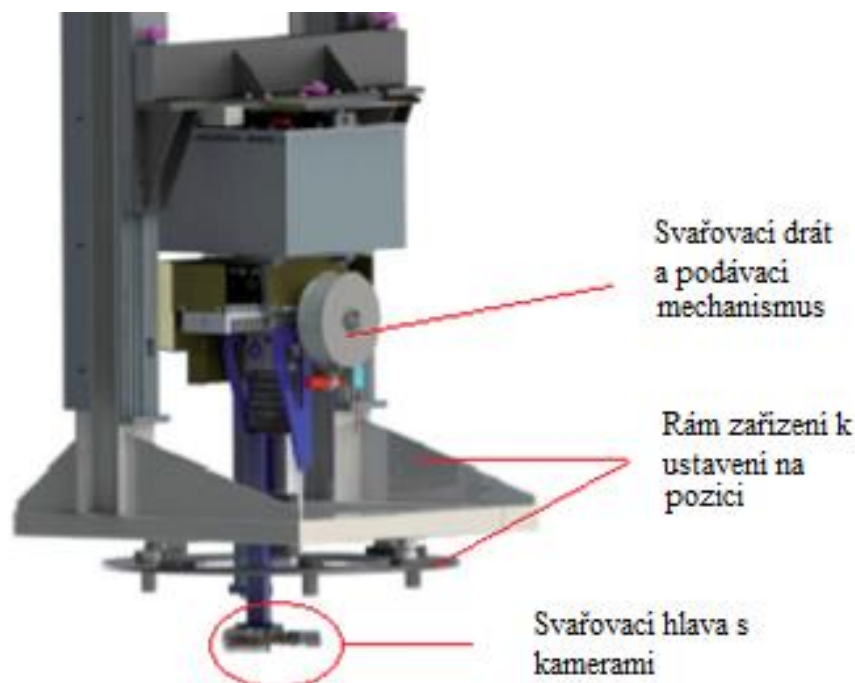


Obr. 24 Svařování heterogenního spoje.



Obr. 25 Svařování metoda WOL.

Příkladem je také výroba a trénink na jednoúčelovém automatizovaném zařízení pro speciální aplikaci svařování SPX. Toto zařízení umožňuje svařování svarového spoje na horním kolektoru parního generátoru metodou TIG. Díky automatizované konfiguraci je možné svařovat při různých programovaných aplikacích, kde lze naprogramovat podstatné vlivy pro svařování např. rychlosti posuvu přídavného materiálu či využití svařování horkým drátem. Na obrázku č. 26 je znázorněný model tohoto zařízení. [46;47]



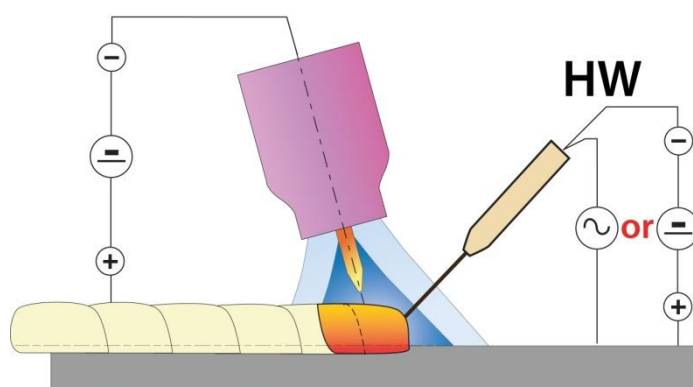
Obr. 26 Zařízení SPX. [43]

Velkou nevýhodou mechanizovaného svařování metodou TIG jsou především vysoké nároky na přesnost přípravy návarových ploch. Rozměrová tolerance by neměla být vyšší než $\pm 0,5$ mm, optimálně do $\pm 0,3$ mm. Pokud nejsou tolerance při přípravě dodrženy, dochází k nepřesnostem a vadám při svařování. Dalším úskalím je vlastní základní materiál a jeho chemické složení, kdy při změně částí s jiným chemickým složením materiálu se opět musí přenastavit program svařování. Z těchto důvodů není tento způsob svařování používán na potrubní díly, kde je potrubí vyrobeno stáčením z plechů a je zde velká nepřesnost v kruhovitosti potrubí. [47]

2.3.1 Metoda TIG svařování horkým drátem

Tento způsob svařování metodou TIG se v dnešní době používá jak při mechanizovaném strojním svařování, tak při ručním, kde výrobci již vyrábí spolehlivé agregáty včetně příslušenství. Toto zařízení díky pokročilé automatizaci umí svařovat v různých režimech a díky tomu je tento způsob progresivnější než klasické svařování metodou TIG. Zařízení používá dva nezávislé napájecí zdroje. Jeden napájí wolframovou elektrodu, aby vytvořil svařovací oblouk; druhý nevytváří oblouk vůbec, ale místo toho používá elektrický odpor k ohřevu drátu, který je přiváděn přes kontaktní trubku (podobně jako kontaktní hrot při svařování plynovým obloukem). Přídavný svářecí materiál, který je ve formě nekonečného drátu přiváděn před oblouk anebo do tavné lázně za oblouk. [48;49]

Schéma procesu svařování touto metodou je zobrazeno na obrázku č. 27. V případě, že přídavný materiál ve formě drátu je přiváděn za oblouk do tavné lázně, je předehříván až na teplotu blízkou teplotě tavení a je vlastně taven bez ovlivnění obloukem. [48;49]



Obr. 27 Svařování horkým drátem. [45]

Díky konstrukčnímu řešení zařízení má tato metoda následující výhody v použití svařování metodou TIG:

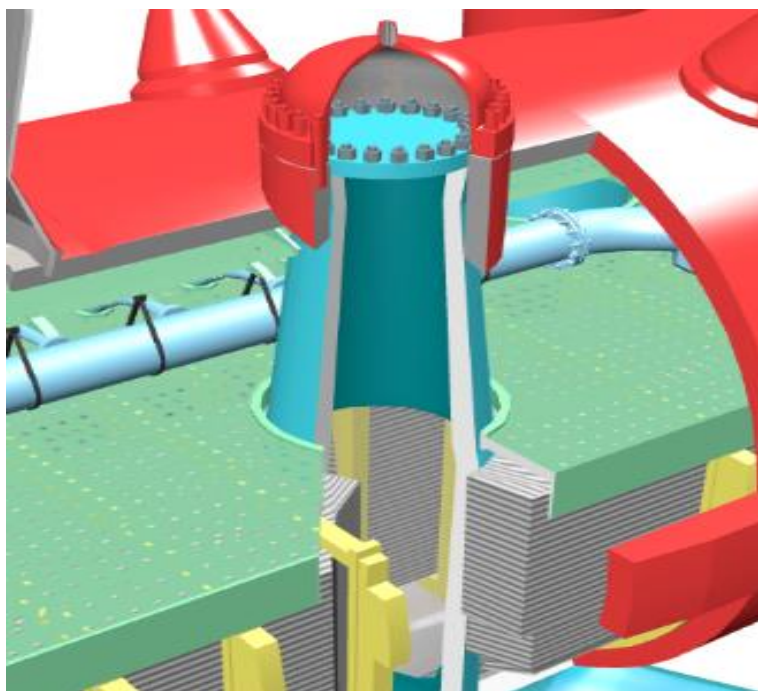
- je až 4krát výkonnější,
- u tohoto způsobu svařování je nižší nebezpečí pórovitosti svaru,
- menší riziko studených spojů,
- lepší přenos legujících prvků do svaru, protože tavící se drát neprochází obloukem, nedochází tak k velkému propalu prvků,
- minimální ochlazení tavné lázně přiváděným přídavným materiálem,
- vyšší svařovací rychlost a snížení tepelného ovlivnění základního materiálu.

Dynamický systém posuvu drátu (TIG SPEED) metody TIG horkým a studeným drátem využívá jedinečný přístup k podávání horkého drátu v procesu. Svařovací stroje poskytují nepřetržitě podávaný drát oscilovaný čtyřmi hnacími válci. Pohony oscilují svářecí drát dozadu a dopředu vysokou rychlostí, což poskytuje mnoho výhod ve spojení s přívodem horkého drátu. Přídavný materiál je vibrován mechanickým působením hnací desky a přenáší vibrace do svaru. Svařovací lázeň se rozruší vibracemi a její povrchové napětí je narušeno. Toto vysokorychlostní mechanické míchání drátu prospívá pomalým slitinám, jako je nerezová ocel, duplex a další. Dynamické svařování s rychlým pohybem drátu vpřed/zpět má praktické výhody a přednosti. Například se jedná o perfektní kontrolu tavné lázně dále o optimální vzhled svaru s možností modelování struktury anebo také o 60 % vyšší odtavovací výkon. Další komfortní výhodou je svařování bez pocitu únavy díky snadnější manipulaci a pohodlnější poloze při práci oproti ručnímu svařování TIG. [48;49]

3 EXPERIMENT SVAROVÉHO SPOJE

Parní generátory jsou svislá válcová tělesa, která se skládají z horní, střední a spodní kované části. Všechny tři části jsou vyrobeny z korozivzdorné austenitické oceli 08Ch18N10T (1.4541) a svařeny v jeden celek. Tyto parogenerátory mají dva primární kolektory, a to vstupní tzv. horký a výstupní tzv. studený. Slouží k přívodu a odvodu chladícího média primárního okruhu do teplosměnných trubek parního generátoru. Nucený oběh chladícího média je zajišťován pomocí hlavního cirkulačního čerpadla. Na obrázku č. 28 je vidět horní část primárního kolektoru. Experimentální část práce se zabývá vhodným návrhem metody svařování a provedením svarového spoje k opravě částí primárních kolektorů parních generátorů v jaderných elektrárnách. Zařízení a opravovaná část je zařazena dle vyhlášky č. 358/2016 Sb. §12, odst. 2, písm. a) 1 a dle vyhlášky č. 329/2017 Sb. do kategorie bezpečného zařízení BT 1. Tímto zařazením se kladou vysoké nároky na provedení opravy a kontrol svařence. V úvodní části experimentu je osvětlena problematika výměny poškozených horních částí, která je v dnešní době navržena vesměs použitím jednoúčelového orbitálního svařovacího automatu využívajícího metod svařování 142 a 141 dle ČSN EN ISO 4063. Je zde také zmíněn původní způsob opravy, a to ručním svařováním v kombinaci metod TIG a MMA. Experiment zkoumá možnost použití ručního svařování s mechanizovaným podáváním drátu a jeho optimalizaci parametrů modifikovaného svařování metodou TIG. Následující pasáž pojednává o svařovacím zařízení a jeho jednotlivých částech. Svarový spoj je nutné zhotovit z identického materiálu a ověřit jej řadou předepsaných zkoušek. [50]

V rámci experimentu jsou na provedeném vzorku svarového spoje provedeny jak mechanické zkoušky, tak i metalografické a v neposlední řadě i nedestruktivní zkoušky samotného spoje. Kontrola jakosti materiálů polotovarů se provádí analýzou chemického složení, stanovením mechanických charakteristik a zjišťováním povrchových a vnitřních vad dle norem nebo technických podmínek pro konkrétní druh materiálu a polotovaru. [50]

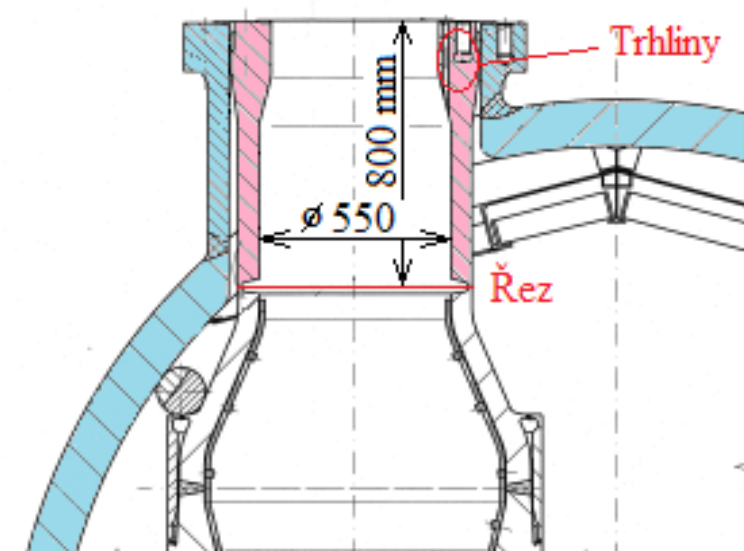


Obr. 28 Horní část parního generátoru. [3]

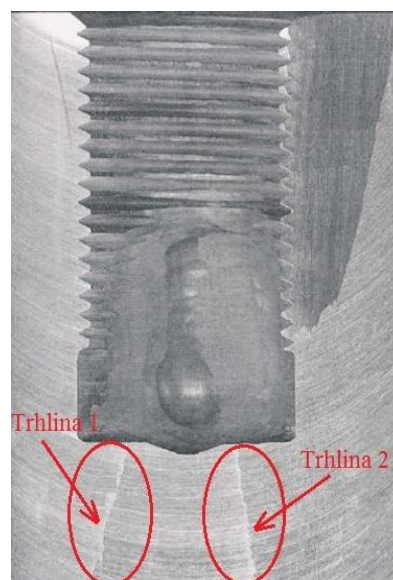
3.1 Problematika opravy

Horní část parního kolektoru, která je zobrazená na obrázku č. 29, vytváří hrdlo, na jehož vrcholu je zesílená přírubová část. V přírubové části je vytvořeno 20 závitových děr pro zavrtání šroubů M 48 x 5, a na čele směrem k ose kolektoru je provedeno lůžko pro niklové těsnění. Těsnost tohoto spoje je důležitá z pohledu bezpečného provozu a spolehlivosti jaderného zařízení. Primární víka uzavírající parní kolektor oddělují nejen primární stranu parogenerátoru od sekundární, ale v podstatě ji tak oddělují i od ostatního nepřímárního provozu v jaderné elektrárně. Pravidelný monitoring jednotlivých částí parního generátoru je tedy nezbytné provádět dle programu kontrol jednou za 4 roky. [50]

Při provádění těchto pravidelných kontrol bylo zjištěno, že závitová hnízda na horním kolektoru vykazují vady (trhliny) viz obrázek č. 30. Pokud dojde k překročení mezních rozměrů vady, musí být přikročeno k výměně vadné části horního kolektoru. Odstraní se celá vrchní část horního kolektoru, a to do hloubky cca 800 mm od vrchního okraje. K obrobení (oddělení) se používá speciální obráběcí zařízení, které obrábí směrem od vnitřního průměru k venkovnímu. Po těchto úpravách je přikročeno k následné výměně části přivařením nového výrobku. [51]

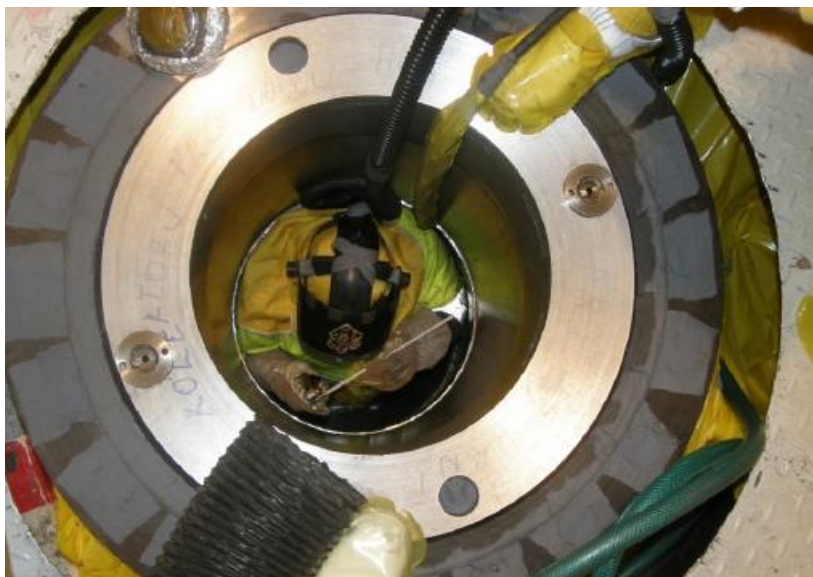


Obr. 29 Víko horního kolektoru PG. [51]



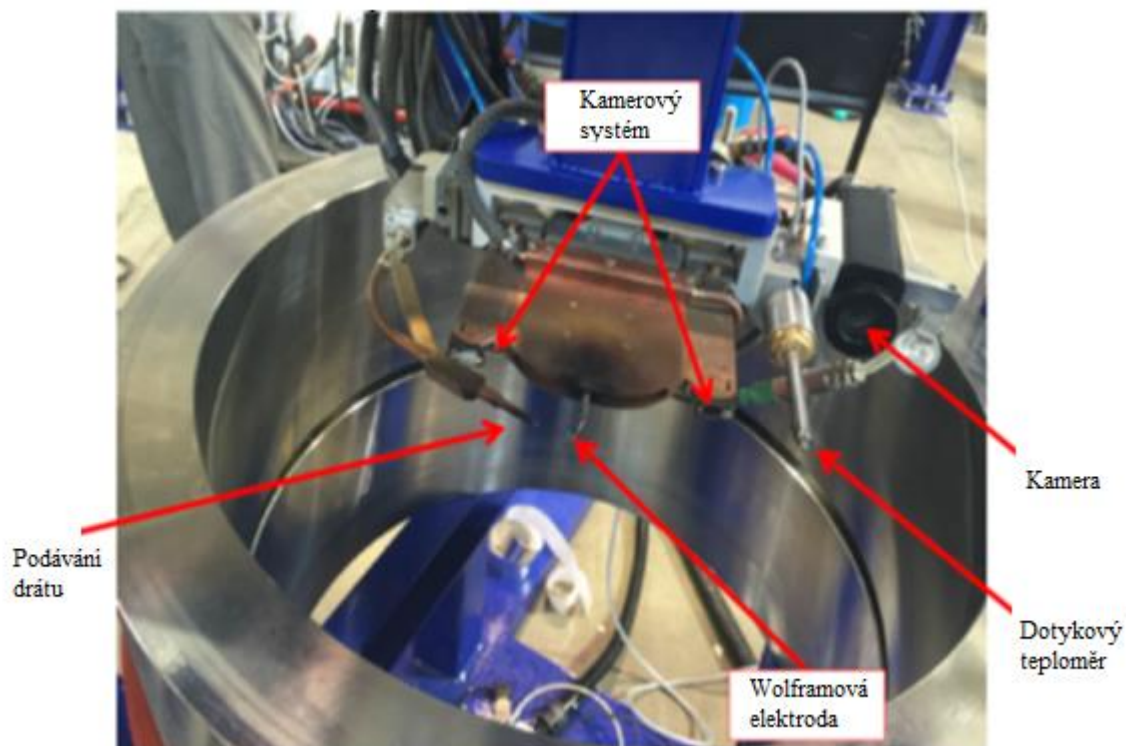
Obr. 30 Trhlina v závitovém hnízdě. [51;52]

V minulosti byla provedena oprava výměnou horní části přivařením nového dílu. Proces svařování byl realizován ručním svařováním metodami dle ČSN EN ISO 4063 a to 141 pro kořenovou vrstvu a výplň s krycí vrstvou byl proveden metodou 111. Kvalita zhotovení svarového spoje ručním způsobem je zásadně ovlivněna lidským faktorem. Limitující je také pro tento způsob opravy i pobyt pracovníků ve stísněném prostředí s radiačním zářením, kdy je tedy pobyt v tomto prostoru časově omezen (hygienické normy). Průběh tehdejší opravy je znázorněn na obrázku č. 31 z tehdejší opravy. Vzhledem k těmto omezujícím podmínkám byl navržen inovovaný technologický postup opravy primárního kolektoru parního generátoru pomocí svařovacího automatu SPX využívajícího technologii svařování 142 a 141. Technologie opravy je navržena tak, že přípravná část je obdobná, jak tomu bylo u provádění výměny horní části kolektoru ručním způsobem svařování. [38;49]



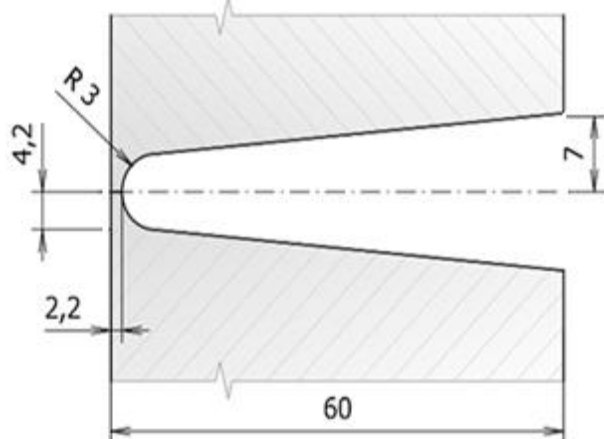
Obr. 31 Svařování horního kolektoru metodou 111.

Pro nově navržený technologický postup opravy byl pořízen orbitální svařovací automat od francouzské společnosti Polysoude. Na obrázku č. 32 je vyobrazena svařovací hlava tohoto zařízení. Sestava svařovacího automatu je složena z několika podsestav, které jsou na sobě vzájemně závislé. Princip svařovacího automatu je takový, že vlastní zařízení se svařovacím hořákem je obsluhováno pomocí dálkového ovládní. Čili svářecí personál není přímo v prostoru svařování a ovládá svařovací hlavu z řídicího panelu. Celý proces svařování sleduje personál na monitorech díky instalovaným kamerám na hlavě hořáku. [38;43]

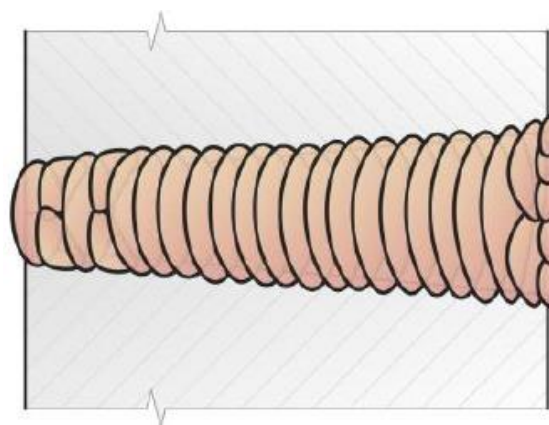


Obr. 32 Svařovací sestava SPX. [43]

Pomocí tohoto zařízení je možné svarový spoj horního kolektoru parního generátoru svařovat do úzkého úkosu. Obecně se dá říci, že tento způsob svařování se využívá převážně u silnostěnných materiálů (jak potrubí, tak plechů). Důvodem je především tvar svarových ploch, které jsou konstrukčně řešeny tak, aby ke spojení základních materiálů bylo použito co možná nejmenší množství svarového kovu. Svařování do úzkého úkosu je běžně používané pro automatizované svařování. U připravované výměny s použitím automatizovaného zařízení, byly návarové plochy navrženy ve spolupráci s výrobcem svařovacího zařízení s ohledem na tvar a rozměry svařovacího hořáku. Detailní tvar svarového úkosu je znázorněn na obrázku č. 33, dále je tento tvar zanesený v technickém výkresu výrobní dokumentace. Na následujícím obrázku č. 34 je patrný způsob a tvar nanášení svarových vrstev postupného svaření celého spoje. [43]



Obr. 33 Tvar spoje pro automatizované svařování. [43]



Obr. 34 Kladení vrstev svarového kovu. [43]

Tento navržený spoj je v rámci programu kontrolních svarových spojů kvalifikován a plánován pro případnou opravu horní části parního kolektoru. Dle zpracovaného programu je tento návrh spoje trénován svářecím personálem (operátory svářecího zařízení). K provádění pravidelného tréninku je zapotřebí kvalifikovaný personál se specifickým zaškolením pro svařování navrženého automatizovaného zařízení SPX. V rámci tréninku je používán nový materiál pro zkušební vzorky a dá se říci, že co se týká projektové jakosti je v podstatě identický jako materiál provozovaných částí parních kolektorů v jaderné elektrárně. Při realizaci tréninku se přichází k poznání, že když se provede změna v tavbě základního materiálu, je nutné zároveň provést změny v přednastaveném programu procesu automatizovaného svařování. Toto nové nastavení programu je nutné odzkoušet na připravených polotovarech svarových spojů, přičemž dochází k vytvoření vad svaru. [43]

Při případné výměně horní části kolektoru na provozovaném parním generátoru se může objevit několik faktorů, které mohou ovlivnit rychlou a úspěšnou výměnu této části. Jedním z nich je původní základní materiál vystavovaný v rámci několikaletého provozování radiačnímu záření a cyklickému tepelnému namáhání. Dochází tak k jistým změnám tohoto materiálu a při svařování se může chovat nestandardně. Právě to může být rizikem pro automatizované svařování při realizaci úspěšné výměny. Dále je v experimentální části práce ověřována metoda svařování ručním způsobem pro případ, že by automatizované svařování z nějakých důvodů selhalo. Jedná se tedy vlastně o rozšíření možnosti opravy jako komplexního programu případné výměny horní části kolektoru. [43]

3.2 Svařovaný základní materiál

Základní materiál byl zvolen v souladu s původní projektovou dokumentací a s ohledem na jeho použití v jaderných elektrárnách. Jedná se o austenitickou chromniklovou ocel. Skupina materiálů dle TNI CEN ISO/TR 15608:2008:8.1. Použité základní materiály pro jaderná zařízení či jejich ekvivalenty musí být v souladu s NTD A.S.I., Sekce II. [53;54]

V tomto experimentu a také pro plánované kontrolní svarové spoje je použitý základní materiál výkovek o rozměru \varnothing 676/544 x 216 mm austenitická chromniklová ocel 08Ch18N10T značena dle GOST 5632–72, (X6CrNiTi18-10 dle EN 10027-1:2017) tavba 63906. Výkovky podléhají vyhlášce SÚJB ČR č. 358/2016 Sb., §12, odstavec 2, písmeno (a). Ekvivalentní označení je uvedeno v tabulce č 1, které je v souladu s dokumentací pro jaderná zařízení NTD A.S.I., Sekce II. [55]

Tabulka 1 Seznam značek materiálů přípustných dle NTD A.S.I. Sekce II.

Značení dle GOST5632	Značka dle ČSN EN 10027-1:2017	Číslo Materiálu	Normy materiálů a polotovarů dle ČSNEN 10027-2:2016
08Ch18N10T	X6CrNiTi18 10	A3	1.4541

Tento typ ocelí je náchylný ke tvorbě teplých trhlin, jejich riziko je potřeba minimalizovat přidáním materiálem, zajišťujícím ve svarovém kovu dostatečný obsah δ feritu a manganu. Ocel vykazuje vynikající odolnost vůči korozi i při vysokých teplotách (850 °C). Po svařování je odolná vůči mezikrystalové korozi. Stabilizace probíhá prostřednictvím titanu. Je vhodná ke kování. Používá se zejména pro aplikace při 300 °C a více. [26;33;59]

Základní materiál dodávaný a dokladovaný dle EN 10 204 k realizaci v jaderné energetice je nutné z nařízení vnitřní legislativy ČEZ znovu prověřovat a porovnávat s doklady, které jsou součástí dodávky. V tabulce č. 2 jsou uvedeny mechanické vlastnosti tohoto materiálu odečtené z inspekčního certifikátu 3.2 uvedeného v Příloze č. 1. Uvedené naměřené hodnoty při zkouškách základního materiálu jsou v dané tabulce porovnány s normativními požadavky. [57]

Tabulka 2 Mechanické vlastnosti použitého vzorku materiálu.

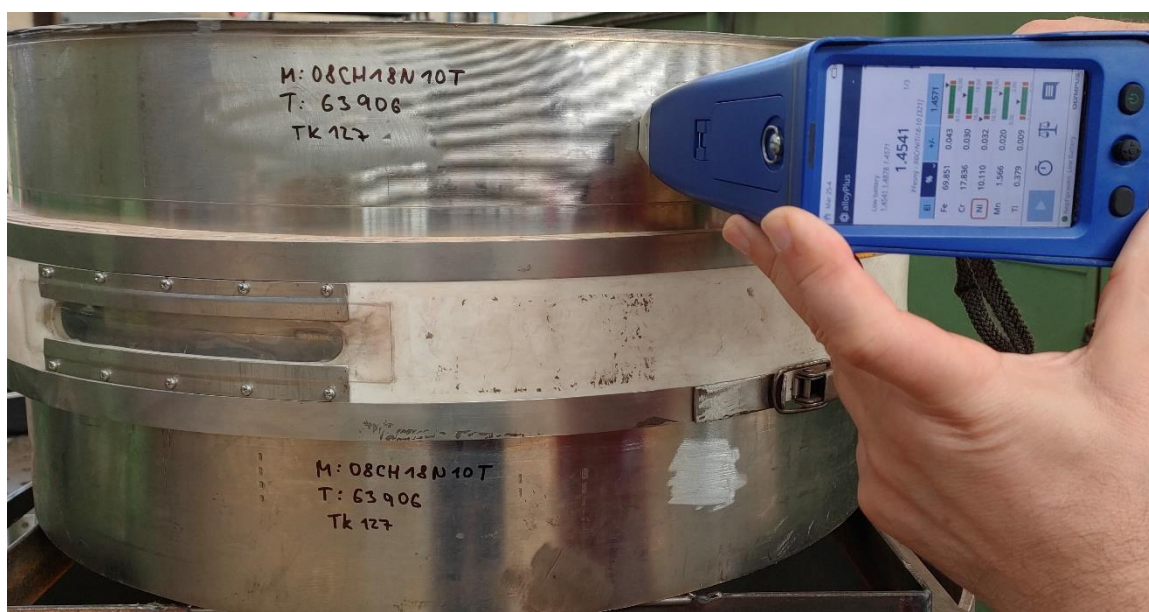
Značení dle GOST5632	Mechanické vlastnosti			
	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	Odolnost proti MKK
08CH18N10T				
Min. požadavek při 23 °C	>186	>466	> 30	Ano
Skut. IC 3.2	232	577	52.5	Ano
Min. požadavek při 350 °C	> 157	> 335	> 20	Ano
Skut. IC 3.2	202	418	39,2	Ano

V následující tabulce č. 3 jsou uvedeny chemické prvky a jejich zastoupení v daném materiálu, které tvoří složení použitého korozivzdorného oceli, a to u obou částí, které jsou vyrobeny z jedné tavby materiálu. [57]

Tabulka 3 Chemické složení použitého vzorku materiálu.

Značení dle GOST5632	Chemické složení								
08CH18N10T	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
Min.						17,0	9,00		
Max.	0,08	2,00	0,80	0,035	0,020	19,0	11,0	0,25	
Skut. IC 3.2	0,05	1,58	0,48	0,027	0,002	17,6	10,10	0,05	0,09
Značení dle GOST5632	Chemické složení								
08CH18N10T	Co	Al	Nb	As	Sn	N	Deltaferit	Ti	
Min.							0,30	0,20	
Max.	0,05					0,05	8,00	0,70	
Skut. IC 3.2	0,03	0,04	<0,01	<0,005	<0,005	0,015	3,4	0,32	

Odběratelská kontrola se běžně provádí emisním přístrojem anebo ručním spektrometrem. V tomto případě byla analýza k ověření chemického složení základního materiálu provedena ručním spektrometrem VANTA pro měření chemických látek, vyobrazeno na obrázku č. 35. Měření bylo provedeno na potrubních doměrcích základního materiálu DN 600. [58]



Obr. 35 Měření spektrometrem.

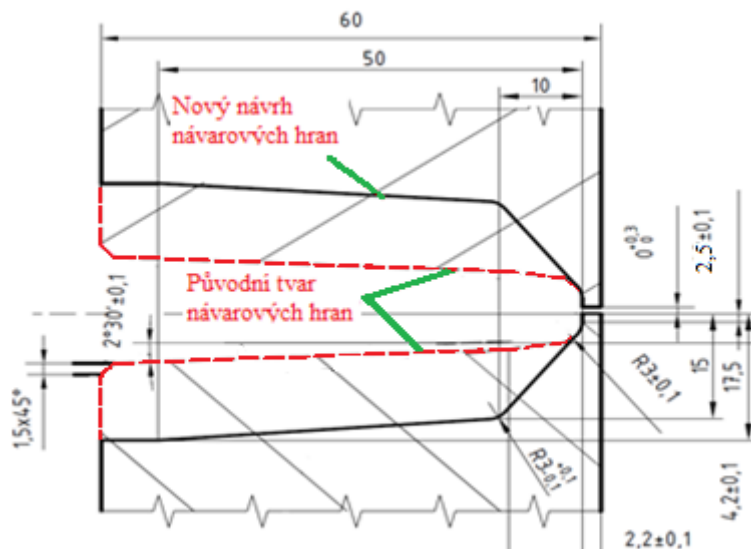
Výsledky byly porovnány s dodaným inspekčním certifikátem 3.2. Z naměřených hodnot byl vyhotoven protokol, kde jsou uvedeny naměřené hodnoty chemických prvků obsažených v materiálu. Tímto rychlým měřením bylo prokázáno, že oba polotovary materiálů odpovídají požadované jakosti 1.4541 (08CH18N10T). Přístroj je vybaven databází normativních hodnot jakostí materiálů a zároveň i programem pro ukládání naměřených hodnot včetně aplikace pro výstup ve formě protokolu. Protokol z tohoto měření je uveden v Příloze č. 2. Část protokolu je znázorněna na obrázku č. 36. [58]

Přesný - X6CrNiTi18-10 I3211				1.4541			
El	%	+/-	1.4541	Mn	1.546	0.020	
Si	0.625	0.020		Fe	69.341	0.045	
P	ND	<0.008		Ni	10.041	0.032	
S	ND	<0.007		Cu	0.103	0.007	
Ti	0.356	0.009		Nb	0.0132	0.0005	Resid. 0.1
V	0.079	0.005	Resid. 0.2	Mo	0.081	0.001	
Cr	17.791	0.030		Sn	0.023	0.002	Resid. 0.1

Obr. 36 Naměřené hodnoty přístrojem VANTA.

3.3 Návrh metody svařování a způsob provedení

Vzhledem ke skutečnosti, že nyní je celá oprava plánovaná v automatizovaném svařování metodou TIG, tak v rámci návrhu experimentální části je právě využita tato metoda k svařování. U tohoto způsobu svařování je také splněn požadavek interní dokumentace ČEZ k pracím na tzv. otevřené technologii, kde je nutné zajistit, aby do technologie nevnikl cizí předmět, který není součástí původního projektu celého zařízení. Původní myšlenkou experimentu bylo zachovat tvar návarových hran svařovaného dílu pro automatizované svařování, což je svařování do úzkého úkosu. Při realizaci návrhu bylo zjištěno, že toto nelze dodržet a bylo nutné provést úpravu návarových hran dle dispozičního uspořádání a rozměrů svařovacího hořáku. Provedená úprava oproti návarovým hranám pro automatizované svařování je patrná z obrázku č. 37. Použité z Přílohy č.3.



Obr. 37 Úprava návarových hran.

Pro svařování experimentu bylo použito svařovací zařízení od společnosti EWM, typově označené jako TETRIX 300 AC/DC puls COMFORT 2,0 8P TM, které umožňuje svařování metodou TIG. Sestava zařízení je vyobrazeno na obrázku č. 38. Tato sestava je vybavena podavačem svařovacího drátu (tig Speed oscillation drive 45 hotwire), které lze nastavit na několik programů s automatizovaným podáváním svařovacího drátu na obrázku č. 39. Pro vyšší výkony svařování je toto zařízení navrženo a vhodné k použití svařování s horkým drátem. [56]



Obr. 38 Svářecí zařízení EWM. [56]



Obr. 39 Podávací zařízení drátu EWM. [56]

Svářecí zařízení využívá moderních aplikačních nastavení jako je např. funkce activ Arc, což je velmi přesný soustředěný oblouk s vysokým tlakem plazmy k dosažení rychlého a spolehlivého svařování s kompenzovaným výkonem. Cílené přivádění tepla a hluboký závar k vytvoření nejlepšího kořene. Tímto nastavením lze docílit vysokých úspor nákladů a nejvyšší kvality provedených svarových spojů. [56; 60]

Pro deklarovaný výkon celé svařovací sestavy je také zapotřebí použít svařovací hořák, který umí přenést svařovací výkon k tíženému výsledku kvalitního svarového spoje. Zde pro tuto sestavu výrobce vyvinul svařovací hořák s typovým označením TIG 450 GRIP WD CW/HW OW U/D HFL 12P 3 m na obrázku č. 40.



Obr. 40 Svařovací hořák EWM pro horký drát. [60]

Vodou chlazený svařovací hořák TIG se samostatným přívodem studeného a horkého drátu. Nastavení množství podávaného drátu během svařování na rukojeti s otáčením o 270°. [60]

3.3.1 Přídavný materiál k svařování

Svarový spoj je tvořen v převážné většině základním materiálem a přídavným svářecím materiálem. Při svařování metodou TIG u potrubních systémů je nutné správně zvolit a používat přídavný materiál, aby mohl vzniknout kvalitní spoj s požadovanými vlastnostmi. Přídavné materiály plní při svařování několik funkcí:

- doplňují objem svarového kovu a vytvořit svar požadovaného tvaru a průřezu,
- legují svarový kov přísadami, které zlepšují užitečné vlastnosti svaru,
- dodávají do svarového kovu přísady, které zajišťují desoxidaci, odplynění a příznivě ovlivňují metalurgické děje ve svarovém kovu,
- zlepšují formování svaru, smáčení svarových ploch a operativnost při svařování v polohách.

Používané přídavné materiály se rozdělují na svařovací tyčky pro ruční svařování na obrázku č. 41. Jde o dráty kruhového průřezu s dostatečnou tuhostí o průměrech 1–8 mm a délce 600–1000 mm. V jaderných elektrárnách jsou běžně pro svařování používány tyčky v délkách 1000 mm. Dále pak pro strojní metody svařovací dráty znázorněné na obrázku č.42. Jsou to dráty přesného kruhového průřezu navinuté rovnoměrně na cívkách. Svářecí dráty se dodávají od průměru 0,6 - 2,4 mm, pro navařování do 5 mm. Mají vhodné chemické složení, kvalitní jakost povrchu a tuhost která zajišťuje stabilitu transportu drátu do místa svaru při mechanizovaném podávání. [26;61;62]



Obr. 41 Svařovací tyčky.



Obr. 42 Svařovací drát 0,8 mm.

Pro výrobu komponentů a opravy zařízení v jaderných elektrárnách typu VVER je předepsáno používat svařovací materiály, které jsou uvedeny v původní projektové a technické dokumentaci. Pro tento experiment a vlastní výměnu horní části parního potrubí, které je vyrobeno z korozivzdorné oceli je určen přídavný svařovací drát Sv-04CH19N11M3. Tento materiál přídavného drátu je volen na základě přiřazení ze seznamu NTD A.S.I., Sekce I Příloze č. 3 a je také uvedený v návrhu pWPS pro realizaci navrhovaného spoje. V tabulkách 4 a 5 je uveden výňatek z inspekčního certifikátu 3.2, který je doložen v Příloze č. 4. Jedná se o přídavný materiál, jehož označení je klasifikováno dle GOST 2246-70. Použitý svařovací drát tavby 33162 a o \varnothing 0,8 mm je kvalifikován pro svařování vyhláskového zařízení. [62;63]

Tabulka 4 Chemické složení přídatného materiálu pro svařování.

Označení slitin drátů dle GOST 2246-70	Chemické složení [%]								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Co
Sv-04Ch19N11M3									
Požadované hodnoty dle PN AE G-7-010-89	max 0,06	max 0,6	0,9 – 2,0	max 0,025	max 0,018	17,8 – 20,0	9,8 – 12,0	1,8 – 3,0	max 0,050
Deklarované hodnoty z IC 3.2	0,015	0,37	1,9	0,017	0,008	18,44	10,2	1,97	0,049

V následující tabulce 5 jsou uvedeny mechanické vlastnosti určeného svařovací drátu, který byl zkoušen tzv. ověřovacími zkouškami po návaru. Z hodnot uvedených v inspekčním certifikátu je patrné, že svarový kov má vyšší hodnoty meze pevnosti v tahu než svařovaný základní materiál. [62;63]

Tabulka 5 Mechanické vlastnosti přídatného materiálu pro svařování.

Označení slitin drátů dle GOST 2246-70	Mechanické vlastnosti				Tepelné zpracování po svařování
	Zkušební teplota	Nejmenší mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Nejmenší pevnost v tahu R_m [MPa]	Nejmenší tažnost [%]	
Jmenovité označení Sv-04Ch19N11M3					
Požadované hodnoty dle GOST	20 ° C	274	441	25	-
Skutečnost z IC 3.2	20 ° C	550	630	40	-
Požadované hodnoty dle GOST	350 ° C	245	392	25	-
Skutečnost z IC 3.2	350 ° C	410	470	21,5	-

Tento přídatný materiál obsahuje dle dodaného inspekčního certifikátu 3.2 viz Příloha č. 4 delta ferit, který má hodnoty FN 3,3. Požadovaná hodnota dle GOST 2246-70 je limitována od 2-8 %. Dále jsou dle této inspekční zprávy potvrzeny vyhovující výsledky kontrol na odolnost proti MKK dle GOST 6032-2003 a také odolnost proti teplým trhlinám dle GOST 7512 či PN AE G7-010-89. [62;63;64]

Použitý základní a přídatný materiál byly zaznačeny do De Longova diagramu, znázorněno na obrázku č. 43. Pro výpočet byly použity hodnoty chemických prvků z deklarovaných inspekčních certifikátů IC 3.2 a známé vztahy pro výpočet chromového a niklového ekvivalentu.

Celková výsledná struktura závisí na vzájemném promíšení svařovaných materiálů.

$$Ni_E = Ni + 30 * C + N + 0,5 * Mn \quad [\text{hm \%}] \quad (3.1)$$

$$Cr_E = Cr + Mo + 1,5 * Si + 0,5 * Nb \quad [\text{hm \%}] \quad (3.2)$$

Hodnoty prvků základního a přídavného materiálu dle uvedených procentuálních zastoupení v inspekčních certifikátech 3.2.

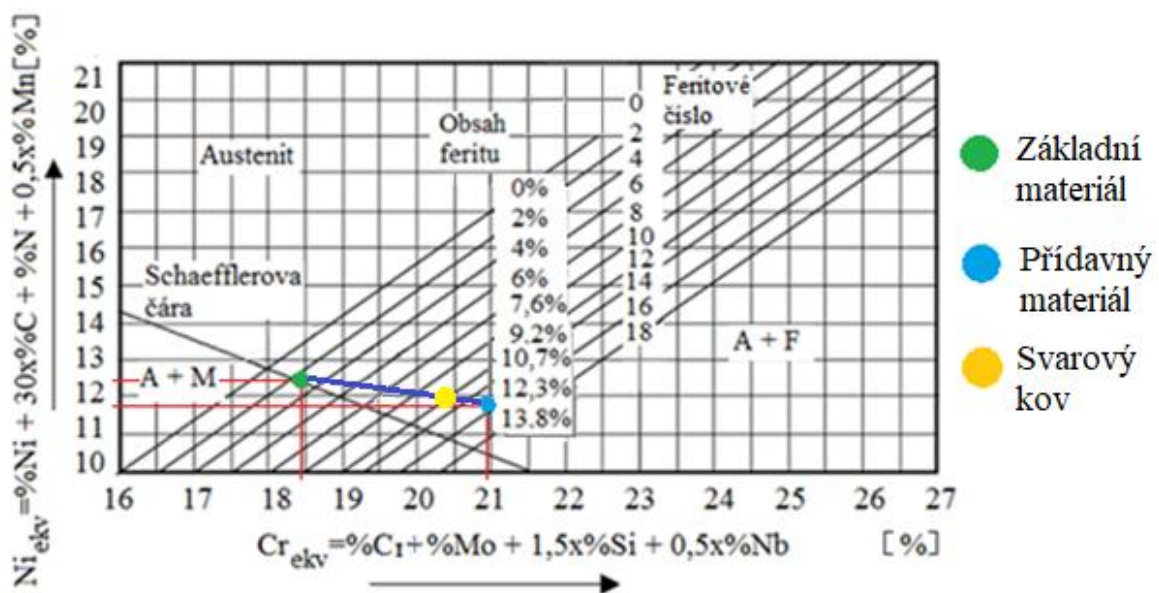
$$Ni_E = 10,10 + 30 * 0,05 + 0,015 + 0,5 * 1,58 = 12,4 \text{ hm \%}$$

$$Cr_E = 17,6 + 0,09 + 1,5 * 0,48 + 0,5 * 0,01 = 18,42 \text{ hm \%}$$

Hodnoty pro přídavný materiál

$$Ni_E = 10,2 + 30 * 0,015 + 0,5 * 1,9 = 11,6 \text{ hm \%}$$

$$Cr_E = 18,44 + 1,97 + 1,5 * 0,37 + 0,5 * 0,0 = 20,97 \text{ hm \%}$$



Obr. 43 Výsledná struktura svarového spoje. [4]

Umístěním základního a přídavného materiálu do De Longova diagramu je možné znázornit výslednou strukturu. U navrženého tvaru spoje, kde natavený základní materiál má mnohem menší plochu, než nanesený svarový kov je promíšení 20 %. Výsledná struktura je austenitického charakteru. Při použití homogenních materiálů by nemělo dojít k zásadní změně struktury materiálu. [4;12]

3.3.2 Svařovací a ochranný plyn

Další důležitou součástí procesu svařování metodou TIG je svařovací plyn, který lze také využívat jako ochranný plyn kořenových vrstev svarových spojů u korozivzdorných ocelí. Na kvalitě čistoty plynu je také závislá kvalita provedení svarového spoje či vlastní ochrana proti oxidům uvnitř potrubních tras. V technické dokumentaci pWPS, WPQR a WPS jsou uvedeny druhy plynů k svařování a jejich způsob použití. Pro aplikaci experimentální části byl použit ochranný plyn argon dle EN ISO 14 175, který lze použít k typu svařovaného materiálu. Běžně je dodáván jako stlačený plyn v tlakových lahvích ve třech základních čistotách uvedeno v tabulce 6. Ke zjednodušení označení existuje mezinárodně platný systém ukazatelů. [5;65]

Ukazatele se skládají z čísla, tečky a druhého čísla. První číslo udává počet devítek, číslo za tečkou udává poslední číslo celkové hodnoty.

Tabulka 6 Značení a čistota dodávaného argonu. [5;65]

Označení	Procentuální podíl argonu
Argon 4.6	99,996 %
Argon 4.8	99,998 %
Argon 5.0	99,999 %

Standardně je k svařování potrubních tras z korozivzdorných ocelí používán argon o čistotě 4.6. Ten byl použitý při svařování vzorku v experimentu a při vlastní ochraně kořenové části svaru. Procentuální podíl argonu je uveden v tabulce 6. [65]

3.3.3 Wolframové elektrody

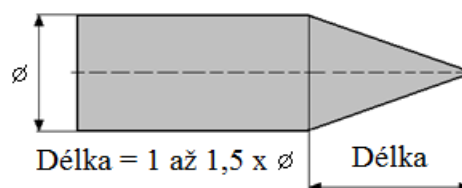
Při svařování metodou TIG jsou používány netavící se elektrody kruhového průřezu vyrobené ze spékaného wolframu. Lze je rozdělit podle příměsí (legur). Kromě nelegované elektrody z čistého wolframu se používají elektrody legované oxidy thoria, lanthanu, ceria a zirkonu. Klasifikace wolframových elektrod je definována normou ČSN EN ISO 6848 a je založena na jejich chemickém složení. Každá wolframová elektroda je vždy nejprve označena písmenem W, za kterým následuje chemické označení hlavního přísadového oxidu a dále pak číslice udávající hmotnostní % přísady oxidu násobené deseti. Přiřazení barev a označení k jednotlivým typům wolframových elektrod je znázorněno v následující tabulce 7.

Tabulka 7 Označení wolframových elektrod. [44; 66]

Označení elektrod	Barva	Legování	Použití	Proud
WP	zelená	čistý wolfram 99,8%	Hliník	~
WT 10	žlutá	thorium 1% ThO ₂	Nerez	=
WT 20	červená	thorium 2% ThO ₂	Nerez	=
WT 30	fialová	thorium 3% ThO ₂	Nerez	=
WT 40	oranžová	thorium 4% ThO ₂	Nerez	=
WC 20	šedá	cerium 2,0% CeO ₂	Univerzální	=/~
WL 10	černá	lanthan 1,0% LaO ₂	Univerzální	=/~
WL 15	zlatá	lanthan 1,5 % LaO ₂	Univerzální	=/~
WL 20	modrá	lanthan 2,0% LaO ₂	Univerzální	=/~
WZ 08	bílá	zirkon 0,8% ZrO ₂	Univerzální	~

Pro vlastní svařování experimentu byly použité lanthanové elektrody (WL 20), které jsou stejně jako (WC 20) elektrody univerzální pro téměř všechna použití při svařování střídavým i stejnosměrným proudem. Tyto elektrody předstihují cerované zejména v oblasti nízkých proudů. Jsou tak vhodné i pro svařování plazmou a mikroplazmou. Vyšší podíl lanthanu usnadňuje zapalování, zejména při automatizovaném svařování (orbitální, robotické, polohovací stoly aj.). [44;66]

Upravený konec a tvar elektrody ovlivňuje podstatným způsobem průběh svařování a kvalitu svaru. Elektrody se brousí do špičky a jejich délka má být asi 1–1,5násobek průměru elektrody, znázorněno na obrázku č. 44. Špička elektrody má být po broušení otupena tak, aby průměr otupení špičky byl cca 10 % průměru elektrody. Otupení způsobí významné snížení zatížení špičky a tím zřetelné prodloužení životnosti. Před broušením je nutné zkontrolovat, aby konec elektrody nebyl nalomený nebo naříznutý.



Obr. 44 Špička svařovací elektrody. [66]

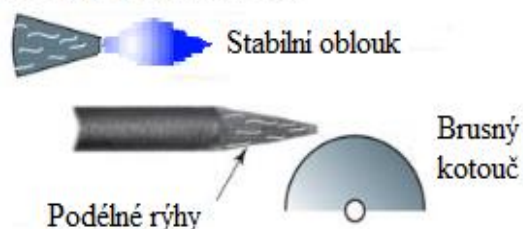
Broušení elektrod musí probíhat nanejvýš opatrně, aby se zabránilo poškození hranic zrn mechanickou silou. Ideální je použití speciální brusky na wolframové elektrody zobrazené na obrázku č. 45. [66;67]



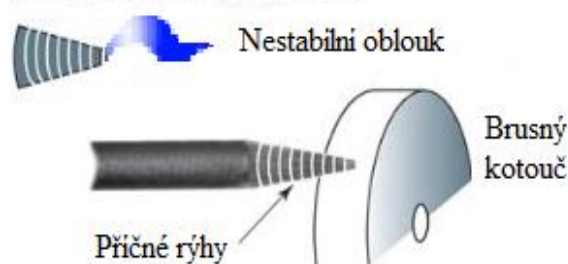
Obr. 45 Bruska na broušení wolframových elektrod.

Ruční broušení je nevhodné. Je nutné používat brusný kotouč s co nejjemnějším zrnem. Nejlepší je diamantový kotouč s kovovou nebo umělohmotnou texturou. Čím jemnější je broušení, tím vyšší je životnost elektrody. Broušení špičky elektrod příčně má negativní vliv na stabilitu a tvorbu oblouku na hrotu elektrody. Svařovací elektrodu je nutné při broušení otáčet velmi pomalu a brousit podélně tak, aby vrypy po broušení byly rovnoběžně s podélnou osou elektrody. Vliv směru broušení ukazuje obrázek č. 46. Je třeba dbát na to, aby elektrody byly v pravidelných intervalech přebroušeny, a to už před jejich opotřebením. Nedoporučuje se čekat na to, až se podmínky zapalování či kvalita svaru zhorší. Okamžité přebroušení je také nutné v případě dotyku elektrody s tavnou lázní. [66;67]

Ideální příprava elektrody



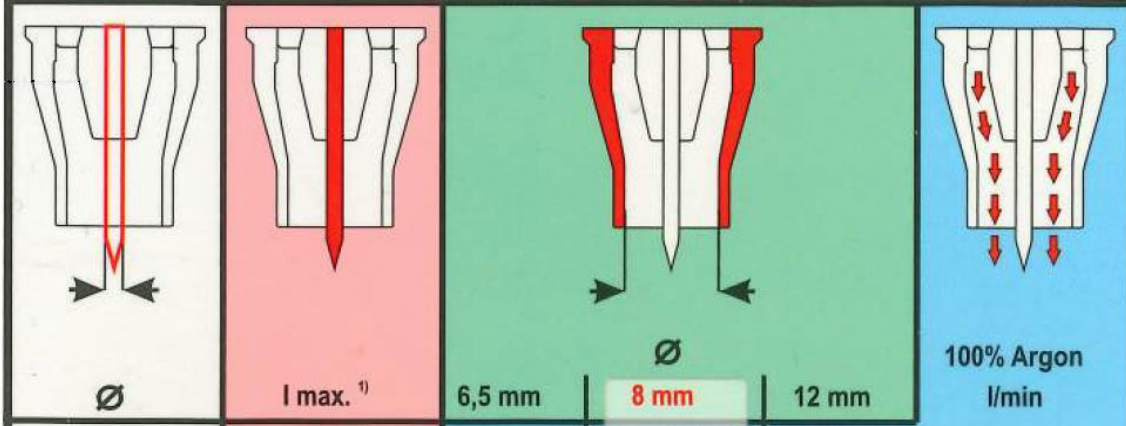
Nesprávná příprava elektrody



Obr. 46 Broušení wolframových elektrod. [68]

Wolframové elektrody se běžně vyrábí v těchto průměrech: 1,0 mm, 1,6 mm, 2,0 mm, 2,4 mm, 3,2 mm, 4,0 mm, 4,8 mm, 6,0 mm a 6,4 mm a standardně vyráběné délky jsou: 50 mm, 75 mm, 150 mm a 175 mm. Doporučené proudové zatížení v závislosti na průměru elektrody pro svařování stejnosměrným proudem uvádí výrobce svařovacího zařízení EWM v rychlém přehledu uvedeném na obrázku č. 47. [66;67]

DC Svařování stejnosměrným proudem



Ø	I max. ¹⁾	Ø			100% Argon l/min
		6,5 mm	8 mm	12 mm	
1,0 mm	75 A	6 l/min	8 l/min	10 l/min	
1,6 mm	160 A	6 l/min	8 l/min	10 l/min	
2,0 mm	260 A	6 l/min	8 l/min	10 l/min	
2,4 mm	330 A	- ²⁾	8 l/min	10 l/min	
3,2 mm	350 A	- ²⁾	8 l/min	10 l/min	
>3,2 mm	550 A	- ²⁾	- ²⁾	10 l/min	

Obr. 47 Přehled proudového zatížení zdroje EWM. [56]

3.4 Zhotovení svarových ploch a jejich kontrola

Příprava svarových ploch se vždy provádí mechanickým opracováním. V provozu jaderných elektráren je příprava svarových ploch broušením povolena pouze v odůvodněných případech a na základě schváleného postupu. Tepelné dělení materiálu plamenem, plazmou a laserem je přípustné pouze v kombinaci s následným odstraněním tepelně ovlivněné oblasti. U potrubí a materiálů z austenitické oceli nesmí při opracování vystoupit teplota materiálu nad 200 °C. Svarové plochy musí být dokončeny přebroušením s cílem odstranění nerovností, nauhličené a tepelně ovlivněné oblasti. Důležitým předpokladem úspěšného svařování je příprava svarových ploch, která se řídí především tloušťkou a druhem svařovaných materiálů. Kromě běžných tvarů úprav úkosů jako je lemový svar, I a V svar se často používají i při relativně malých tloušťkách. Obrobený výkovek, který byl obroben v mechanických dílnách dle výkresové dokumentace, je znázorněn na obrázku č. 48. Úprava návarových hran odpovídá postupu svařování dle ČSN EN ISO 15609-1:2021. Rozměr původního výkovku byl upraven na Ø 670/550 x 210 mm. [62;71]

Kvalita svarových ploch a přilehlých oblastí je prověřována kontrolami stanovenými plánem kontrol a zkoušek či jinou vnitřní dokumentací v JE, které je nutné dodržet před vlastní realizací svařování. Výsledky těchto kontrol jsou zaznamenány do vystavených protokolů o provedených kontrolách viz Přílohy č. 5 a 6. [71]

Jedná se o provedení následujících kontrol:

- kontrola rozměrů a tvaru,
- vizuální kontrola návarových hran,
- kapilární kontrola návarových hran.



Obr. 48. Obrobené polotovary experimentu.

Provedení kontrol experimentu kapilární metodou jsou znázorněné na obrázku č. 49. Kapilární metoda využívá charakteristické vlastnosti fázových rozhraní a kapilárních vlastností kapalin. Princip metody spočívá ve vztlínivosti a smáčivosti jednotlivých kapalin, jejich barevnosti a fluorescence. Na povrch zkoušeného materiálu je nanesen penetrant, který vniká do všech vad povrchu. Po následném odstranění přebytku této kapaliny z povrchu dochází ke vztlínání zbylé kapaliny v povrchových vadách. Za pomoci vývojky nanesené na zkoušený povrch pak vytvoří barevnou indikaci vady. V rámci experimentu nebyly zaznamenány žádné vady v návarových hranách. [69;76]



Obr. 49 Penetrační kontrola návarových hran.

3.5 Svařování experimentálního vzorku

Po vyhotovení svařovací dokumentace tzv. pWPS uvedeno v Příloze č. 7 a určení přídavného materiálu včetně provedení kontrol materiálu před zahájením svařování bylo přistoupeno k vlastnímu provedení svaření vzorku. Vzorek byl tedy svařován metodou TIG ručním svařováním a svarový spoj byl navržen jako tupý BW spoj ve tvaru U. Pro reálný přístup k svarovému spoji v PG bylo vytvořeno tréninkové pracoviště vyobrazeno na obrázku č. 50, kde svářeč trénuje provedení svarového spoje zevnitř potrubního doměrku. [65;70;71;75]



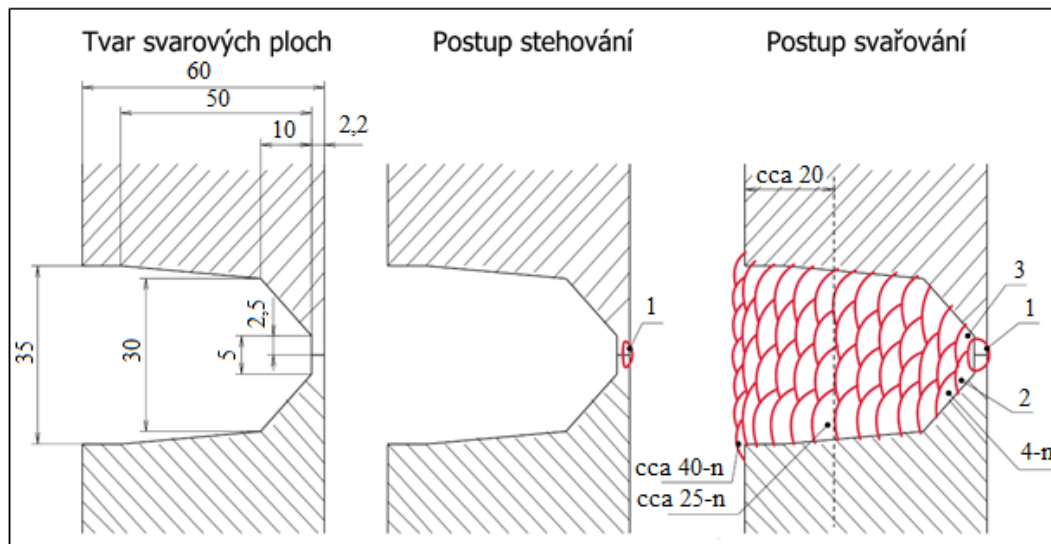
Obr. 50 Tréninkové pracoviště pro svařování vzorku.

U svarového spoje je nutné provádět ochranu kořenové vrstvy. V experimentu to bylo netečným plynem argonem. Na obrázku č. 51 je přípravek pro provádění ochrany kořenové vrstvy. K měření koncentrace zbytkového kyslíku se používá běžně přístroj určený k naměření hodnot v hodnotách ppm. Přístroj Oxymetr je také znázorněný na obrázku č. 51 a měřená hodnota před zahájením svařování je patrná z displeje přístroje. [70]



Obr. 51 Ochrana kořenové vrstvy argonem a měření zbytkového kyslíku.

Proces svařování je prováděn dle návrhu rozměrů a parametrů uvedených v pWPS, kde jsou uvedeny informace pro svářeče k nastavení parametrů svářecího zařízení a celého procesu svařování. Experiment byl svařován zařízením od výrobce EWM s mechanizovaným podáváním drátu a také technologií svařování horkým drátem. V tomto dokumentu jsou také uvedeny parametry proudění argonu k ochraně kořene v našem případě to bylo cca 18 l/min. Dále je v této dokumentaci uveden postup kladení jednotlivých svarových vrstev a jejich parametrů obrázek č. 52. Kořenová vrstva v experimentu byla svařována pulsním svařováním tzv. studeným drátem. Další vrstvy byly po určitém množství navařeného kovu svařovány za použití horkého drátu. [65;70;71;]



Obr. 52 Znárodnění kladení jednotlivých vrstev svarového kovu.

V níže znázorněné tabulce 8 jsou navrhované parametry procesu sestehování svařovaných dílů, které jsou uvedeny v dokumentaci pro svařování pWPS. Parametry svařování jsou navrženy na základě použitých podkladů jako je základní materiál, přídavný svařovací materiál, způsob svařování a poloha. [71]

Tabulka 8 Parametry svařování pro sestehování svařovaných dílů.

Svarová vrstva	Metoda svařování	Ø Přídavného materiálu [mm]	Proud [A]	Napětí [V]	Druh proudu	Rychlost svařování [mm/s]	Ochrana kořene [l/min.]	Tepelný příkon [kJ/mm]
1	142	---	50-70	10-12	DC/-	---	---	---

Při stehování nesmí dojít k protavení základního materiálu svařence (pérka), do vnitřní strany svarových ploch. Délka stehů je cca 50 mm, počet stehů min. 12 po obvodu svařence. Parametry pro kořenovou vrstvu jsou uvedené v tabulce 9. [70]

Tabulka 9 Parametry svařování kořenové vrstvy dle pWPS.

Metoda svařování	Ø Přídavného materiálu [mm]	tp-čas [%]	tz-čas [%]	Ip-proud impulsu [A]	Iz-proud základu [A]	Napětí [V]	Rychlost podávání přídavného materiálu [mm/min]
141	0,8	50	50	184 ± 20	75 ± 20	8,9 ± 0,5	2000 ± 200

Níže v tabulce 10 jsou uvedené parametry svařování v oblasti kořenové výplně, kde již bylo možné použít vyšší proud, napětí a vlastní rychlost svařování. V této oblasti svarového spoje bylo svařováno prozatím studeným drátem cca 25 vrstev svarových housenek. V následujících tabulkách 11 a 12 jsou zaznamenány ostatní parametry svařování. Jedná se část výplně svarové mezery procesem svařování horkým drátem a poté vyhotovení povrchové vrstvy svaru. [70]

Tabulka 10 Parametry svařování od kořenové vrstvy.

Metoda svařování	Ø Přídavného materiálu [mm]	Proud [A]	Napětí [V]	Rychlost svařování [mm/min.]	Rychlost podávání přídavného materiálu [mm/min]	Tepelný příkon-Q [kJ/mm]
141	0,8	195 ± 10	9,4 ± 0,5	1,8	2300 ± 200	0,67

Tabulka 11 Parametry svařování výplně horkým drátem.

Metoda svařování	Ø Přídavného materiálu [mm]	Proud [A]	Proud horkého drátu [A]	Napětí [V]	Rychlost svařování [mm/min.]	Rychlost podávání přídavného materiálu [mm/min]	Tepelný příkon-Q [kJ/mm]
141	0,8	240 ± 10	75	11,4 ± 0,5	2	3500 ± 200	0,89

Tabulka 12 Parametry svařování krycí vrstvy.

Metoda svařování	Ø Přídavného materiálu [mm]	Proud [A]	Napětí [V]	Rychlost svařování [mm/min.]	Rychlost podávání přídavného materiálu [mm/min]	Tepelný příkon-Q [kJ/mm]
141	0,8	184 ± 10	8,4 ± 0,5	1,7	2000 ± 200	0,6

Parametry svařování byly díky zobrazení na zařízení, na obrázku č. 53 porovnávány s návrhem před svařováním. Po odečtení těchto parametrů bylo možné provést výpočet vneseného tepla u každé jednotlivé vrstvy svarového kovu a součtem dílčích výsledků bylo možné vypočítat celkové vnesené teplo. Tyto informace jsou důležité k provedení jistých korekcí při svařování, a to jak v nastavení proudu, tak v posuvu svařovacího drátu. [70;71]



Obr. 53. Nastavené parametry při svařování.

U austenitických korozivzdorných materiálů je nutno limitovat vnesené teplo. Tepelná vodivost chrom-niklových ocelí je nízká. Proto teplo vnesené při svařování přechází do materiálu pomalu. Důležité je udržet množství vneseného tepla na co nejnižší úrovni. V případě příliš vysokého vneseného tepla dochází k precipitaci intermetalických fází, k čemuž je náchylný hlavně ferit. U austenitických materiálů by neměla být překročena hodnota $1,5 \text{ kJ.mm}^{-1}$. V praxi se však u austenitických korozivzdorných ocelí doporučuje hodnot do 1 kJ.mm^{-1} tepelného příkonu. Pro výpočet tepelného příkonu byl použitý vzorec z ČSN EN 1011-1. [70;71;73]

$$Q = \frac{U \cdot I}{v \cdot 1000} * k \quad [\text{kJ.mm}^{-1}] \quad (3.3)$$

kde: k – tepelná účinnost metody svařování

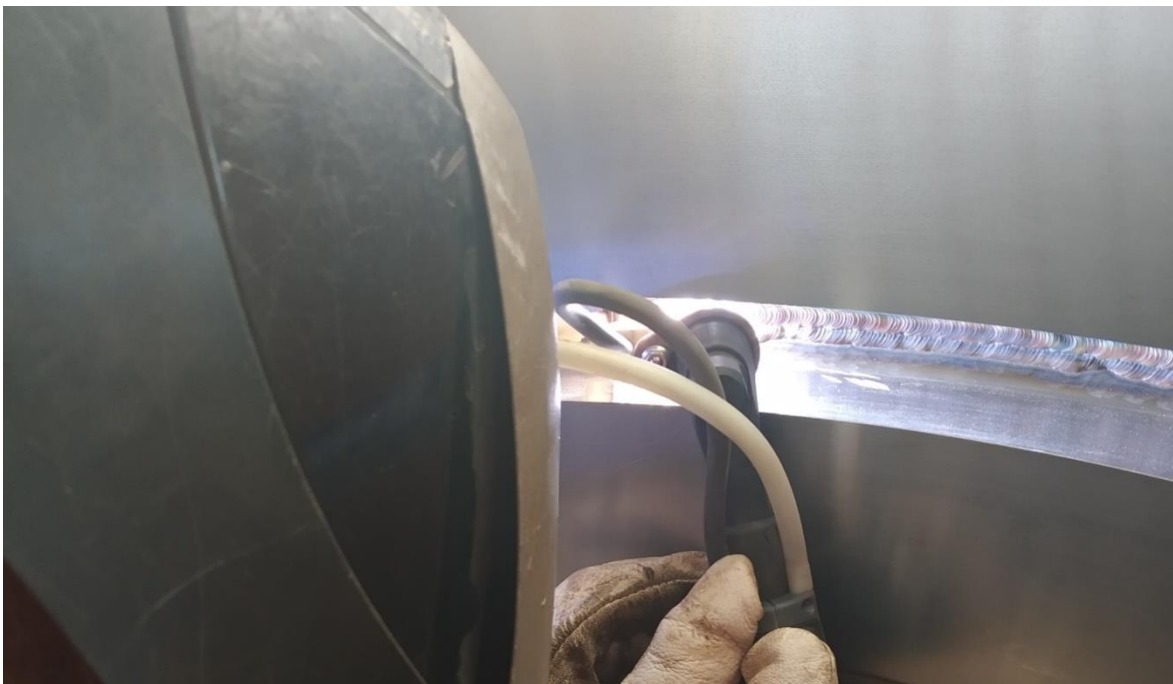
U – napětí oblouku [V]

I – svařovací proud [A]

v – rychlost svařování [mm s^{-1}]

S celým procesem vneseného množství tepla také souvisí limitování mezihousenkové teploty (interpass) tak, aby nepřesáhla zpravidla $150 \text{ }^\circ\text{C}$. Tepelná vodivost austenitických korozivzdorných ocelí je o něco nižší než u nízkolegovaných a uhlíkových ocelí. To znamená, že trvá delší čas, než dosáhneme požadované mezi housenkové teploty. Ochlazování může být také urychleno přerušením svařování nebo uváženou volbou správného postupu svařování (kladení housenek). Teplotu interpass je nutno pravidelně měřit a nesmí se překročit. Měření teploty je prováděno ve většině případů dotykovým teploměrem. Pokud je vyšší než požadovaná, musí se pozastavit svařovací proces. [70;71;74].

V průběhu svařování byly jednotlivé návary vrstev očištěny drátěným kartáčem před navařením další vrstvy. Tímto způsobem lze odstranit vyplavené nečistoty ve formě okují ze svarové lázně. Na obrázku č. 54 je znázorněn postupný průběh zhotovení vzorku za použití svařovacího hořáku s mechanizovaným podáváním svařovacího drátu. [70;76]



Obr. 54 Průběh svařování experimentu.

3.6 Nedustriktivní kontroly spoje

U navrhovaného a zhotoveného spoje byla provedena série kontrol kvality dle schválených postupů. Kontroly legislativně odpovídají předpisům pro jaderné elektrárny NTD A.S.I. Sekce VII-2020 a také dle TPE 10-40/1771/2014. Dle těchto podmínek byly provedeny kontroly různými metodami. [78;81]

3.6.1 Vizualní kontrola svaru VT

Jde o jedinou metodu z plánovaných kontrol, která je prováděna v průběhu svařování a o zhotovení spoje. Kontrolují se jednotlivé vrstvy svarového spoje před navařením dalších dle ČSN EN ISO 17 637. Po ukončení svařování byla provedena vizualní kontrola ČSN EN ISO 5817 stupeň B a bylo provedeno vyhodnocení dle PK 1514-72-kat. I. Protokol od této kontroly je uveden v Příloze č. 8 s výsledkem vyhovuje. Na obrázku č. 55 je vyobrazena kořenová vrstva před kontrolou. Součástí vizualních kontrol byl i povrch svarového také s vyhovujícím výsledkem. Vnější prohlídkou se zjišťují vady svaru např. vruby, zápaly. Dále je kontrolován základní materiál v okolí svaru do vzdálenosti 20 mm. [76;79;81].



Obr. 55 Kořenová vrstva spoje.

3.6.2 Zkouška kapilární PT

Zkouší se způsobem barevné indikace pro zjištění diskontinuit na zkoušeném povrchu svaru jako jsou trhliny, přeložky, rýhy, póry a studené spoje, které jsou otevřené na povrchu zkoušeného svaru. Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 3452-1. Na obrázku č. 56 je znázorněna kontrola PT u krycích vrstev svarového spoje. Vyhovující výsledek je opět zaznamenán v protokolu, který je Přílohou č. 9.[69;79]



Obr. 56 Kontrola PT krycích vrstev.

3.6.3 Zkouška prozářením svaru RT

Tato zkouška byla provedena na daném svaru dle ČSN EN ISO 17 6361-st.1 k zjištění objemových vad spoje jako jsou póry neprůvary, vměstky a studené spoje. Metoda využívá k prozáření radiografického zařízení s filmem. Obraz, který je zaznamenán na filmu, byl následně vyhodnocen a výsledek zapsán do protokolu, který je Přílohou č. 10 této práce. Výsledek provedené kontroly je vyhovující bez vad. [79;82;83]

3.7 Destruktivní kontroly spoje

Svarový spoj byl kontrolován metodami nedestruktivních zkoušek a pro podrobnější ověření kvality spoje se doporučují provést i zkoušky destruktivního charakteru, které určuje ČSN EN ISO 15614–1, také NTD A.S.I. Sekce VII. Pro různé typy těchto zkoušek je nutné provést dělení materiálu s následnou úpravou tvaru anebo povrchu. Příprava vzorků svarového spoje pro destruktivní metody byla provedena dělením na strojní pásové pilce znázorněno na obrázku č. 57, kde při dělení nevzniká vysoké teplo, které by mohlo ovlivnit materiálové vlastnosti vzorků. [73;79;82]



Obr. 57 Dělení vzorků pro destruktivní zkoušky.

3.7.1 Zkouška tahem

Tato zkouška se provádí dle ČSN EN ISO 6892-1, která specifikuje metodu zkoušení tahem kovových materiálů a definuje mechanické vlastnosti. Zkouška spočívá v deformaci zkušebního tělesa tahovým zatížením, obvykle do lomu, za účelem stanovení jedné nebo více mechanických vlastností. Příčnou zkoušku tahem upřesňuje ČSN EN ISO 4136. Zkouška svarového spoje se musí provádět minimálně na dvou vzorcích za pokojové teploty mezi 10 °C a 35 °C, pokud není stanoveno jinak. V případě experimentu byly podrobeny této zkoušce tři odebrané vzorky. Tvar a rozměry zkušebních těles mohou být podmíněny tvarem a rozměry kovového výrobku, ze kterého jsou zkušební tělesa odebírána. Zkušební těleso se obvykle získá obráběním vzorku z výrobku, výlisku nebo odlitku. Avšak výrobky konstantního průřezu (profily, tyče, dráty atd.) a rovněž litá zkušební tělesa (tj. z litin a neželezných slitin) se mohou zkoušet, aniž by musela být obrobena. [79;84]

Zkoušené vzorky v počtu tří kusů, měly obdélníkový tvar o délce 315 mm, šířce 30-42 mm a síle 25 mm. Pro snadnější určení polohy lomu je běžné vzorky nalepat pro bližší určení umístění svarového spoje. Při přetržení zkušebních vzorků, vyobrazené na obrázku č. 58, se musí lomová plocha vyhodnotit na všechny vady, které by ovlivnily výsledky zkoušky. Tahová zkouška vzorků byla provedena na hydraulickém zkušebním stroji INSTRON 5989, který umí vyvinout sílu v tahu až 600 kN. Zařízení je vyobrazeno na obrázku č. 59. [79;84]

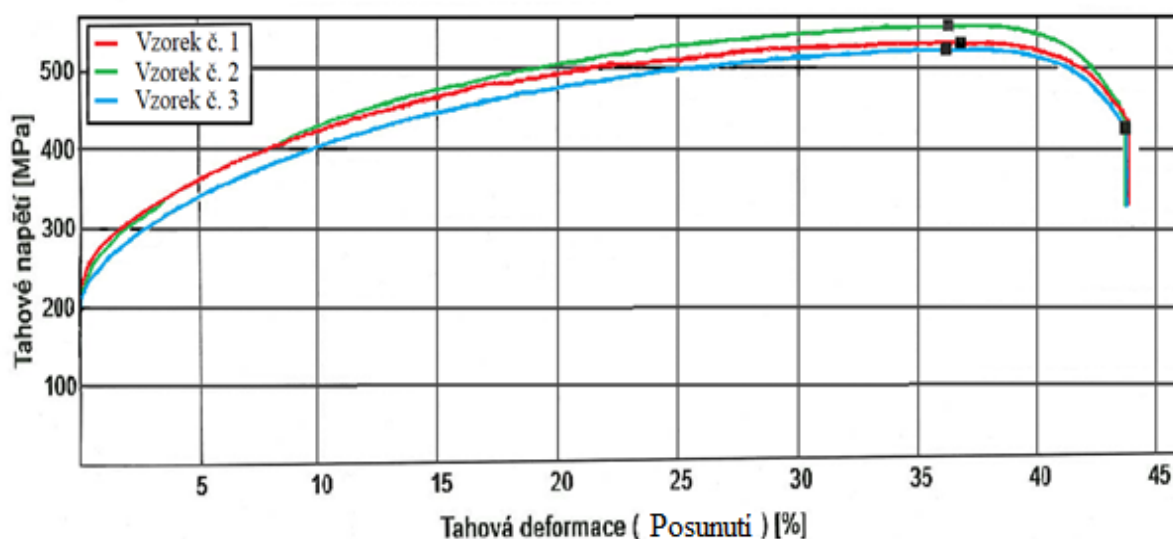


Obr. 58 Lom vzorku.



Obr. 59 Zařízení pro tahovou zkoušku.

Naměřené hodnoty z provedených zkoušek jsou uvedeny v Příloze č. 11. Graf na obrázku č. 60 znázorňuje průběh tahové zkoušky všech tří vzorků. Jak je patrné z průběhu provedené zkoušky měla všechny tři tělesa vcelku stejný průběh zatěžování a hodnoty meze kluzu či pevnosti jsou identické. K přetržení vzorku vždy došlo v základním materiálu. Lze tedy konstatovat, že ve svarovém spoji nebyly žádné zásadní vady a přídatný materiál k vytvoření svarového spoje je vyhovující. [79;84]



Obr. 60 Graf z tahové zkoušky.

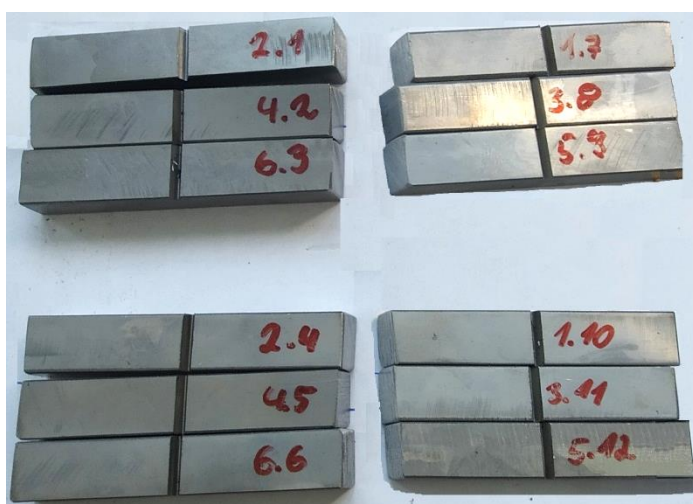
Hodnoty z tahové zkoušky jsou zaznamenány v tabulce 13. U meze pevnosti R_m lze usuzovat, že při svařování došlo k dokonalému promísení základního materiálu a přídavného drátu. Hodnoty se pohybují mezi R_m základního materiálu a R_m přídavného drátu odečtených z technických listů. [79;84]

Tabulka 13 Naměřené hodnoty z tahové zkoušky vzorků.

Vzorek č.	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Délka [mm]	R_m [MPa]	Místo porušení
1	30,02	24,85	157	545	V základním materiálu
2	30,13	24,87	157	547	V základním materiálu
3	29,98	24,98	157	551	V základním materiálu
Střední	30,04	24,90	157	548	-

3.7.2 Zkouška rázem v ohybu

Tato destruktivní zkouška je základní metodou vyhodnocování houževnatosti materiálů. Její určení je významné z hlediska bezpečnosti provozu zařízení a konstrukcí. Vznik křehkého lomu je velmi rizikový, neboť se jedná o druh porušení materiálu, který vyžaduje nepatrnou energii, malou plastickou deformaci. Faktory, které mají přímý vliv na vznik křehkého porušení, jsou nízká provozní teplota, rychlost zatěžování, tloušťka konstrukce, přítomnost vrubu nebo jiných vnějších či vnitřních vad. Výsledky zkoušky tedy stanovují odolnost materiálu proti místní (vrubové) koncentraci napětí a náchylnosti ke křehkému porušení. Zkouška je udávána normou ČSN EN ISO 148-1 pro kovové materiály metodou Charpyho kladivem. Z vyrobeného svařence bylo vyrobeno dle plánu řezání vzorků dvanáct kusů polotovaru, které byly následně obrobena pro provedení zkoušky. Poloha šesti zkušebních těles byla v polotovaru zvolena tak, aby vrub zkušebního tělesa byl uprostřed svarového kovu. Zbylých šest kusů bylo upraven tak, aby vrub byl umístěn v TOO. Pro tuto zkoušku byl navržen vrub ve tvaru V. Na obrázku č. 61 jsou vyobrazeny odebrané vzorky s vytvořeným vrubem a na obrázku č. 62 je zařízení Charpyho kladiva, na kterém byly provedeny zkoušky odebraných vzorků materiálu. [12;79;80]

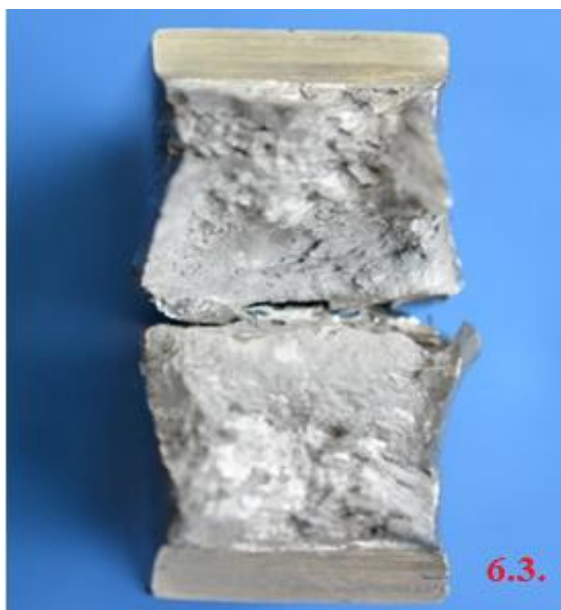


Obr. 61 Přípravené vzorky na zkoušku.

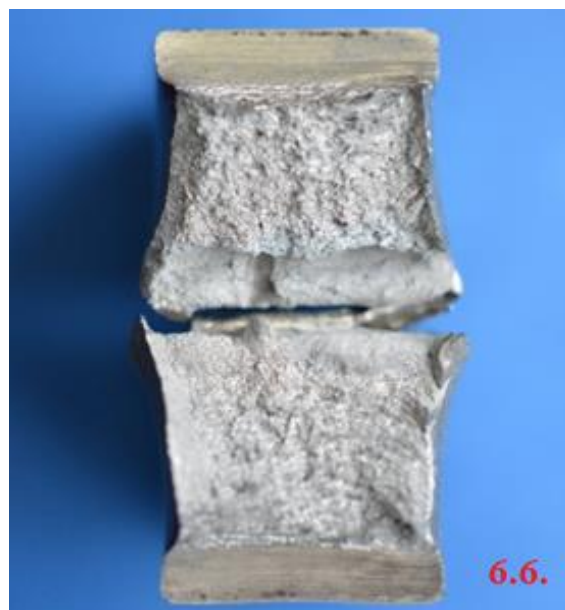


Obr. 62 Charpyho kladivo.

Vrubová houževnatost sama o sobě není materiálovou konstantou, ale její hodnota je funkcí mnoha faktorů. Především je ovlivněna samotnou strukturou materiálu, která je dána chemickým složením, tepelným zpracováním atd. Na následujícím obrázku č. 63 a 64 jsou zobrazeny lomové plochy porušených zkušebních těles v oblasti svarového kovu u povrchu a kořenové vrstvy. [12;79;80]

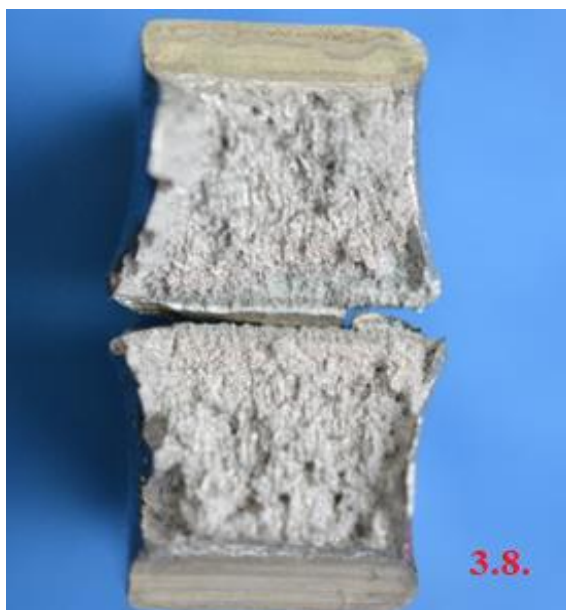


Obr. 63 Lomová plocha z oblasti svarového kovu pod povrchovou vrstvou.

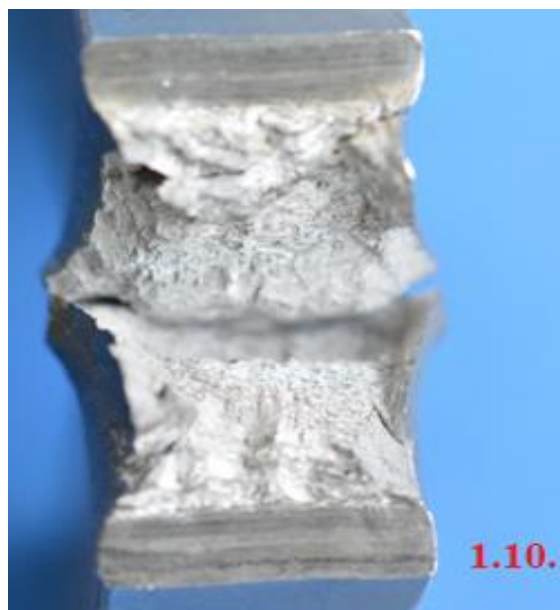


Obr. 64 Lomová plocha z oblasti svarového kovu v kořenové vrstvě.

Celá zkouška byla prováděna při pokojové teplotě 23 °C. Níže na obrázcích č. 65 a 66 jsou vyobrazeny lomové plochy odebraných vzorků v oblasti TOO, kde hodnoty spotřebované energie byly o něco nižší než u vzorků ze svarového kovu. Hodnoty energie se pohybovaly od 135–195 J. Detailní záznam je uveden v Přílohách č.12 a 13. [12;79;80]



Obr. 65 Lomová plocha z oblasti TOO pod povrchem svarového spoje.



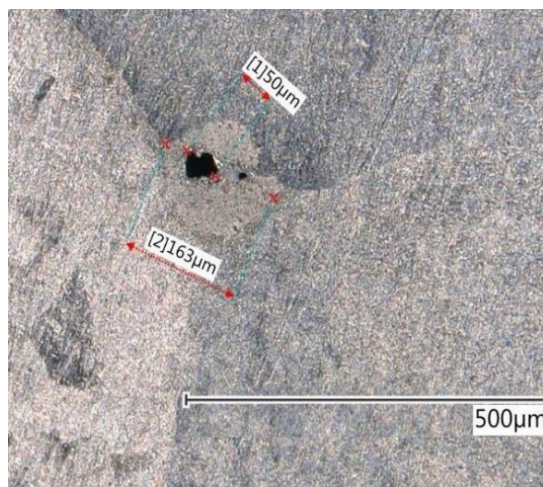
Obr. 66 Lomová plocha z oblasti TOO kořenové vrstvě sváru.

3.7.3 Kontrola makrostruktury

Kontrola svarů touto metodou se provádí v souladu s normou ČSN EN ISO 17639. Destruktivní zkouška svarů kovových materiálů makrostruktury se všeobecně používá k zjišťování výrazných strukturních heterogenit kovů a slitin. Při studiu struktury svarů informuje o geometrii svaru, výskytu neprůvarů nebo studených spojů, skladbě housenek svarového kovu. Vypovídá také o přítomnosti vměstků, pórů, trhlin a jejich velikosti jak ve svarovém kovu, tak i v TOO. Někdy lze pozorovat plochu makro výbrusu bez další úpravy přímo anebo po naleptání. Po úpravě vzorku broušením a naleptáním byla provedena kontrola makrostruktury svarového spoje. Pod mikroskopem na obrázku č. 67 je vzorek po naleptání viz Příloha č. 14. Na vzorku byla identifikována vada, která byla následně zvětšena na mikroskopu pro její podrobnější rozbor. Jedná se o mikro pór na rozhraní základního materiálu a svarového spoje ohraničený vměstkem, pravděpodobně se jedná o vměstek wolframové elektrody. Vada je vyobrazena na obrázku č. 68. [12;79;85]

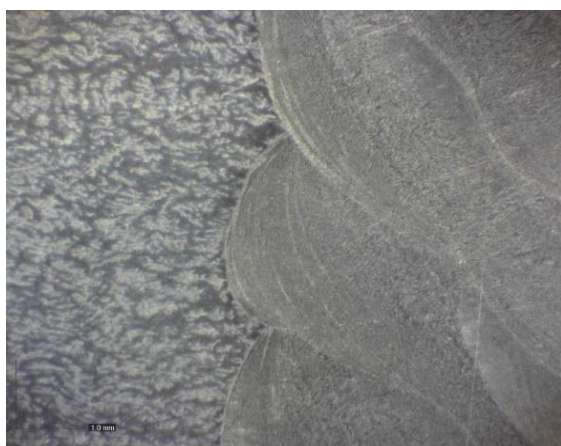


Obr. 67 Svarový spoj po naleptání.

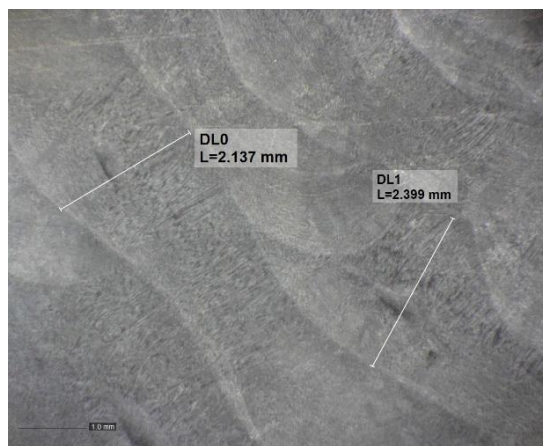


Obr. 68 Identifikovaná mikro vada.

Daný vzorek z makrostruktury byl také pozorován stereomikroskopem, který slouží k pozorování vzorku s různým zvětšením až 50krát v 3D rozměru. Na obrázku č. 69 vidíme hranici ztavení základního materiálu a svarového kovu. Samotné hodnocení svarových spojů vyžaduje kromě základní techniky rovněž i značnou zkušenost. Stereomikroskopem lze provést jednoduchá rozměrová měření, kde na obrázku č. 70 je měřena nanesená vrstva svarového kovu. [12;85;86]



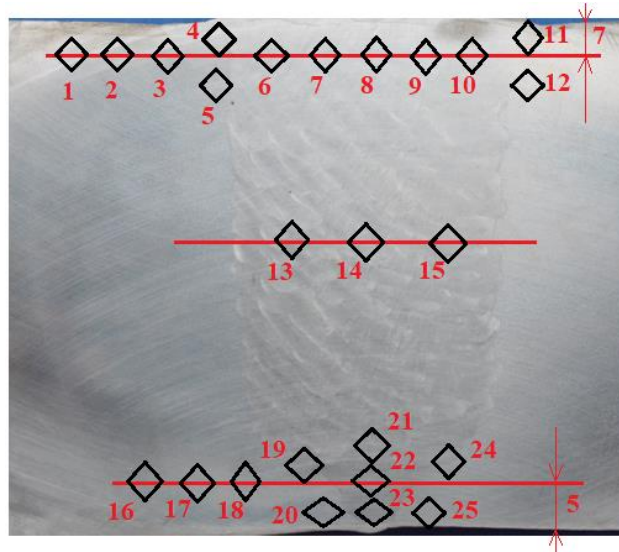
Obr. 69 Hranice ztavení.



Obr. 70 Vrstvy svarového kovu.

3.7.4 Zkouška tvrdosti svarového spoje

Vzorky pro provedení této zkoušky se ze svarového spoje odebírají mechanickým dělením, aby povrch vzorků nebyl ovlivněn použitím technologií dělení. Na obrázku č. 71 je vyobrazený vzorek pro experiment s rozmístěním míst vtisku. [12;87;88]



Obr. 71 Rozmístění míst vtisku.

Povrch vzorku se upravuje studeným broušením a naleptáním pro zviditelnění jednotlivých oblastí svarového spoje. Zkouška tvrdosti se provádí dle ČSN EN ISO 6507-1, měření tvrdosti je prováděno podle Vickerse a pokud není stanoveno jinak tak při teplotě okolí 23 ± 5 °C. Doporučená vzdálenost a místo tzv. vtisků je určována uváděnou normou pro daný svarový spoj. Hodnoty tvrdosti jsou určeny na základě měřených úhlopříček vniknutí do materiálu dle pásma zatížení HV5 a jejich vyhodnocení, které je uvedeno v tabulce č. 14 je provedeno na základě ČSN EN ISO 6507-4. [12;87;88]

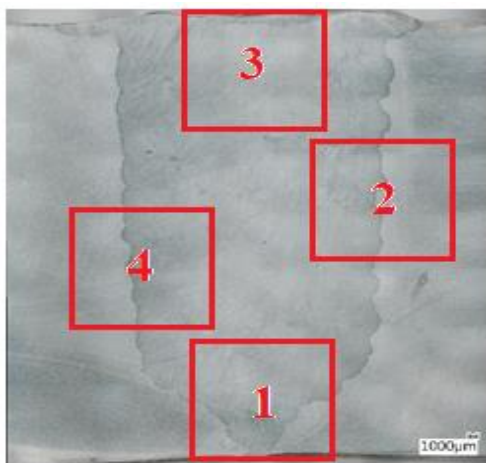
Tabulka 14 Hodnoty měření tvrdosti svarového spoje.

Naměřené hodnoty HV 5–Pod povrchem svarového spoje 7 mm												
Místo vtisku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Hodnota	120	123	129	138	138	152	150	149	150	151	136	136
Naměřené hodnoty HV 5–Střední část svarového spoje												
Místo vtisku	13			14			15					
Hodnota	162			158			156					
Naměřené hodnoty HV 5–V oblasti kořenové vrstvy svarového spoje 5 mm												
Místo vtisku	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
Hodnota	121	129	131	142	144	160	160	137	148	149		

Hodnoty, které byly naměřené v rámci experimentu se nijak neodlišují od standardních hodnot austenitických korozivzdorných ocelí. Z měření je patrné, že svarový kov má v celém průřezu vyšší hodnoty, které jsou dány právě odlišným chemickým složením od základního materiálu. [12;87;88]

3.7.5 Mikroskopická kontrola

Stejně jako makroskopická zkouška je prováděna na zkušebních vzorcích orientovaných příčně k ose svaru. Slouží k pozorování vhodně připraveného povrchu vzorku odebraného ze zkušebního materiálu pod mikroskopem při největším zvětšení až 2 000×. Příprava spočívá v odběru vzorků, znázorněno na obrázku č. 72. Dále je níže na obrázku č. 73 vyobrazená část svarového spoje z oblasti kořene svaru. [12;85]

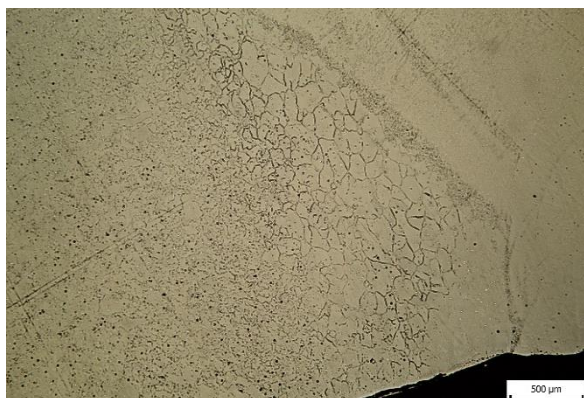


Obr. 72 Rozmístění odběru vzorků.



Obr. 73 Snímek v oblasti kořenové vrstvy.

Vzorky byly před vlastním odběrem označeny a dále upraveny mokrým a suchým broušením včetně leštění. V konečné fázi byly dle postupu a normy vybrané vzorky ponořeny do leptadla marble na několik sekund. Po ukončení leptání je vždy nutné vzorky umýt, opláchnout lihem, otřít a vysušit. Odebrané vzorky byly po provedené úpravě kontrolovány pomocí světelného mikroskopu, kde byly sledovány změny struktur svarového spoje a základního materiálu převážně v oblastech ztavení a TOO. Na obrázcích 74 a 75 jsou vyobrazeny snímky z této provedené kontroly. [12;85]



Obr. 74 Snímek z oblasti č.1.



Obr. 75 Snímek z oblasti č.2.

Pro hodnocení mikrostruktury nejsou vyloženě stanovená pravidla v předpisech. Ve většině případů slouží tato zkouška jako doplňková, dávající přehled o strukturních změnách, ke kterým dochází v průběhu svařování zejména v TOO. Zároveň slouží ke zjištění a identifikaci mikroskopických vad ve svarovém spoji jako jsou mikrotrhliny, vměstky či studené spoje. Na vzorcích je možné pozorovat ohraničení zrn základního materiálu v TOO a také pravděpodobný výskyt vměstků uvnitř zrn. Vměstky mohou pocházet z výrobního procesu základního materiálu, který je odlíván. V oblasti přehřátí základního materiálu jsou patrná větší zrna než v základním materiálu, jejich velikost je přípustná.

4 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

V části experimentu této práce byly ověřovány a posuzovány technické možnosti provedení svarového spoje při výměně potrubního hrdla na PG ručním svařováním s mechanizovaným podáváním drátu. Plánovaná oprava je prováděna uvnitř PG a zhotovení svarového spoje také probíhá z vnitřní strany potrubního hrdla. Pro tento experiment bylo nutné zajistit identické podmínky při svařování a zhotovit simulované prostředí, při kterém jsou přibližně stejné podmínky jako ve skutečném PG. V takovém prostředí a podmínkách k práci lze nejlépe využít jako nejvhodnější způsob svařování metodu TIG. Je to metoda svařování, která má nejvyšší čistotu svarového kovu a pro její přednosti ji lze využít k poloautomatizovanému svařování. Typ svarového spoje byl určen na základě inženýrského posouzení a dále s přihlédnutím k dodržení legislativy JE na vnitřní čistotu potrubního systému. Původním záměrem experimentu bylo provést svařování daného spoje při zachování tvaru návarových hran pro progresivní technologii orbitálního svařování do úzké mezery pomocí metod 142 a 141, která je v dnešní době kvalifikována pro opravu horní části PG. V rámci řešení experimentu bylo zjištěno, že toto nelze dodržet a bylo nutné provést úpravu návarových hran dle tvaru a konstrukce svařovacího hořáku daného zařízení od společnosti EWM. Dále bylo přihlédnuto také k tomu, aby svářeč viděl do prostoru vyhotovení svaru a mohl kvalitně celý proces ovládat. Jedná se o tupý svarový spoj „U“ svařovaný z vnitřní strany potrubí. Při výběru této metody a způsobu provedení svaru byly vzaty v úvahu i okolnosti proveditelnosti dokonalé ochrany kořene před oxidací. V případě experimentu byla kořenová vrstva na povrchu potrubní části chráněna speciálním přípravkem vyvinutým pro tuto opravu spoje. V rámci experimentu byla vyhotovena svářecí dokumentace pWPS, kde jsou uvedeny všechny předpokládané parametry pro zhotovení svaru a při vlastní realizaci svařování byly korigovány dle skutečnosti prováděného procesu.

Svařovaný základní materiál experimentálního vzorku byl navržen na základě údajů z původní projektové dokumentace při výrobě PG. Jedná se o korozivzdornou austenitickou ocel. jakosti 1.4541 (08CH18N10T). Přídavný materiál byl určen na základě předepsaných materiálů ze seznamu přípustných přídavných materiálů pro svařování zařízení JE v NTD ASI Sekce I Příloze č. 3. Schválený přídavný svařovací drát Sv-04CH19N11M3 je ruské výroby a kvalifikován pro použití v jaderných zařízeních u této skupiny materiálů.

Na zkoušeném vzorku svarového spoje potrubí horní části PG byla provedena série NDT kontrol od přípravy návarových hran až po finální kontrolu celého svarového spoje provedením VT a PT kontrol včetně RT svaru. Všechny provedené NDT kontroly ověřily kvalitu provedení přípravy svarového spoje a jeho precizní zhotovení daným svářecím zařízením. Výsledky byly zaznamenány do protokolů, které jsou přílohami této práce.

Pro doplnění kompletnosti kontrol a ověření vhodného provedení opravy dané části PG byly na svařeném vzorku provedeny i destruktivní zkoušky. Lze jimi ověřit kvalitu základního či přídavného materiálu a také prokázat vhodnost a způsob provedení opravy svařováním. Jedná se o tahovou zkoušku, anebo zkoušku na vrubovou houževnatost či metalografické zkoušky makrostruktury anebo mikrostruktury materiálu svarového kovu a TOO. Tahová zkouška byla provedena na třech vzorcích odpovídajících normám a odebraných dle rezného plánu. Po přetržení byla provedena kontrola lomové plochy a kontrola svarového kovu. Zkouška prokázala celistvost svarového spoje a nebyly zjištěny žádné trhliny či vady ve svarovém kovu. Dále bylo potvrzeno, že lom byl v základním materiálu přesně pod úhlem 45°, což je u austenitických korozivzdorných ocelí typické. Dále byla ověřována vrubová houževnatost materiálu svarového kovu zkouškou rázem v ohybu. Pro tuto zkoušku bylo dle plánu pro odběr vzorků použito 12 kusů s vyhotoveným vrubem ve tvaru „V“.

Vzorky byly odebrány z několika míst celého spoje. Jednalo se o kořenovou oblast spoje a míst v TOO, dále o oblast pod povrchem svaru, kde byly odebrány vzorky přímo z části svarového kovu, a také z oblasti TOO. Zkouška byla provedena metodou Charpyho kladivem a její výsledek odpovídal očekávaným předpokladům. Průměrné hodnoty nárazové práce 182 J byly přibližně stejné u sledovaných oblastí svarového spoje a lomové plochy lze hodnotit jako houževnatý lom. Další provedenou zkouškou metalografie materiálu a svarového spoje byla zkouška makrostruktury svaru. Zde na příčném řezu byly pozorovány svarové vrstvy a jejich kladení či překrytí mezi sebou. Na odebraném vzorku byla identifikována mikrovada, dutina ohraničená vměstkem wolframu. Vznik této vady byl zapříčiněn chybou svářeče. Zajímavostí je, že tato vada nebyla identifikována kontrolou RT pro objemové vady svarových spojů. Zkouškou tvrdosti bylo u vybraných míst vpichů ověřeno, že nedošlo v rámci procesu svařování k nepřiměřené změně struktury svarového spoje a jeho okolí. Je patrné z výsledků, že svarový kov má vyšší naměřené hodnoty, které jsou však přípustné. Vyšší hodnoty tvrdosti ve svarovém kovu lze přisuzovat k vyššímu obsahu δ -feritu v přídavném svářecím drátu, který potom tvoří tvrdší strukturu materiálu. Ke zjištění a identifikaci mikroskopických vad ve svarovém spoji jako jsou mikrotrhliny, vměstky či studené spoje byla provedena zkouška mikroskopie. Na vzorcích je možné pozorovat ohraničení zrn základního materiálu v TOO a také výskyt vměstků uvnitř zrn. Vměstky pravděpodobně pochází z výrobního procesu základního materiálu, který byl výkovkem.

Navržené kontroly neshledaly žádné zásadní vady svarového spoje a daný proces svařování metodou TIG s mechanizovaným podáváním drátu byl pro navržené parametry ověřen s vyhovujícím výsledkem. Je tedy možné doporučit metodu a způsob provedení k použití za předpokladu dodržení technologické kázně při svařování korozivzdorných austenitických ocelí a pokračovat v kvalifikaci svarového spoje k plánované opravě horního kolektoru PG.

ZÁVĚRY

Předkládaná práce, jejímž tématem je problematika svařování korozivzdorných ocelí 1.4541 pro jaderné zařízení PG, se zabývá v úvodní části vlastnostmi korozivzdorných ocelí a jejich rozdělením podle chemického složení a struktur. V teoretické části jsou uvedeny vlivy jednotlivých legujících prvků na vlastnosti austenitických ocelí včetně změn při procesu svařování a faktorů, které ovlivňují průběh procesu svařování. Cílem práce bylo navrhnout, odzkoušet a optimalizovat postup opravy ručním svařováním metodou TIG s mechanizovaným podáváním drátu pro instalaci korozivzdorného hrdla v PG. Záměrem je tento postup a způsob provedení zařadit do cíleného programu opravy výměny hrdla PG, který je v dnešní době kvalifikován a trénován jenom s použitím orbitálního svařovacího stroje a nabídnout zákazníkovi tento způsob jako alternativu opravy v případě selhání jednoúčelového zařízení SPX. Součástí popisu metody je její využití pro poloautomatizované aplikace využívající preciznosti a čistoty zhotovených svarových spojů. Pro tento způsob svařování austenitických ocelí je také zásadní použití netečného plynu k ochraně kořene svarového spoje, která se provádí různými způsoby, což je zmíněno i v této práci. Z pohledu dodržování legislativních požadavků pro JE, je nutné pro využití daných způsobů oprav a aplikací nových technologií provést jejich kvalifikaci dle dané legislativy. Zajímavou variantou pro progresivnější způsob svařování je metoda TIG s použitím horkého drátu pro ruční svařování. Právě tomuto způsobu svařování je věnovaná část kapitoly č. 3.

Experimentem je ověřována možnost použití ručního svařování TIG s mechanizovaným podáváním drátu a jeho optimalizaci parametrů při svařování horkým drátem. V pasáži je popsáno svařovací zařízení a problematika přípravy a vyhotovení spoje na horním parním kolektoru PG. V dnešní době je případná oprava zařízení kvalifikovaná pro nasazení technologie orbitálního svařování do úzké mezery pomocí metod 142 a 141. Způsob provedení a trénink je realizován na nových materiálech dané třídy korozivzdorných ocelí a program pro svařování je nastavený na tuto variantu. Z technologického pohledu může dojít při vlastní realizaci k selhání celého zařízení či nastavených parametrů, protože ve skutečnosti se bude vždy svařovat nový díl se stávající částí PG, která je již několik let v provozu. Zkušenosti při aplikaci svarových spojů vedou k poznání, že provozovaný materiál má jisté deformace a vykazuje změny při svařování a chová se odlišně od nového. Přímo na místě opravy by v takovém případě došlo k dlouhodobějšímu výpadku procesu svařování a bylo by nutné nastavit svařovací parametry pro orbitální svařování, což by bylo problematické. Proto jsem navrhl v rámci tohoto experimentu doplnit navržený způsob opravy o ruční metodu, ale s využitím nového zařízení od společnosti EWM, které lze využít jako poloautomatizovaný způsob svařování. Jedná se o unikátní způsob opravy, který nebyl nikdy na podobnou aplikaci v jiných JE použitý. Experimentem bylo prokázáno, že je možné provést tuto náročnou opravu ručním způsobem svařování právě s využitím svařovacího zařízení s mechanizovaným podáváním drátu. Kvalita provedeného svarového spoje byla ověřena řadou kontrol dle legislativních požadavků pro JE.

Soubor provedených NDT kontrol doplněných o destruktivní zkoušky na svařovaném experimentálním vzorku prokázal, že zvolená metoda TIG včetně druhu přídavného materiálu a způsob provedení splnily předpokládané výsledky. Na základě ověření lze metodu a způsob provedení doporučit k realizaci v praxi a pokračovat v kvalifikování spoje.

Výsledek experimentu může v budoucnu sloužit jako podklad ke kvalifikaci uceleného postupu opravy horního kolektoru PG. Cílovým stavem opravy by mělo být sjednocení tvaru svarového spoje pro oba způsoby oprav, a to jak pro automatové svařování, tak i pro navržené ruční svařování a kvalifikovat spoj včetně dané WPQR. Kompletní kvalifikace a schválení postupu zabere delší čas, což v tomto experimentu nebylo možné zrealizovat.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ŠMARDA, Vladimír. *Svařování austenitických ocelí*. Brno, 2019, 45 s. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/117316>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
2. HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2009, 486 s.: il., čb. fot. ISBN 978-80-227-3167-6.
3. *Dukovany | Skupina ČEZ – O Společnosti: INFOCENTRUM JADERNÉ ELEKTRÁRNY DUKOVANY* [online]. Praha: ČEZ, 2022, [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/infocentra/dukovany-135065#gallery->
4. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., opr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s.: il.; 30 cm. ISBN 80-85771
5. ORSZÁGH, Viktor a Peter ORSZÁGH. *Zváranie TIG ocelí a neželezných kovov*. Bratislava: Polygrafia SAV, 1998, 300 stran: ilustrace. ISBN 80-88780-21-7.
6. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
7. *ČSN EN ISO 17639: Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
8. BARTÁK, Jiří. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2000, 213 s.: il.; 30 cm. ISBN 80-85771-72-1.
9. NĚMEC, Josef. *Svařování korozivzdorných a žárovzdorných ocelí: Technická literatura*. 1. Praha: SNTL – Státní nakladatelství technické literatury, 1975. ISBN 04-215-75.
10. ČÍHAL, Vladimír, ed. *Korozivzdorné oceli a slitiny na přelomu století: sborník mezinárodní konference: [5.-7.10.1999, Řeka, Česká republika]*. 1. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1999. ISBN 80-7078-696-5.
11. CROOKES, Roger. *Passivating_Pickling_CZ: Moření a pasivace korozivzdorných ocelí*. [online]. Lucembursko, 2017, [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Passivating_Pickling_CZ.pdf
12. *Materiály a jejich chování při svařování: učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT)*. Ostrava: Česká svářečská společnost ANB, 2016.
13. HLAVATÝ, Ivo. *Teorie a technologie svařování*. Ostrava, 2011, 1. vydání. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2414-7.
14. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. I. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, xii, 516 s.: il. ISBN 80-7204-283-1.
15. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s.: il.; 25 cm. ISBN 80-7204-248-3

-
16. *Svařování nerezavějících ocelí. ESAB* [online]. [cit. 2021-02-25]. Dostupné z: <http://products.esab.com/ESABImages/nerezy2012.pdf>
 17. *Korozivzdorné oceli-vlastnosti. Korozivzdorné oceli-vlastnosti* [online]. Lucembursko: Euro Inox, 2002 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: www.cedinox.es/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/StainlessSteelProperties_CZ.pdf
 18. ČÍHAL, Vladimír, 1999. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. Praha: Academia. 437 s. ISBN 80-200-0671-0. [reference viz Číhal].
 19. FOLDYNA, Václav; HENNHOFFER, Karel; OLŠAROVÁ, Věra, Hlavatý, Ivo; Koukal, Jaroslav; Kristofory, František; Ochodek, Václav; Pilous, Václav; Purmenský, Jaroslav; Schwarz, Drahomír; Veselko, Július., 2000. *Materiály a jejich svařitelnost*. Recenzent: Jaroslav Koukal. 1. vyd. Ostrava: Česká svářečská společnost ANB, ZEROSS, c2000. 216 s. ISBN 80-85771-85-3. [reference viz Foldyna et al.].
 20. *Charakteristika materiálů a základní informace o použití, zpracování, svařování a možné korozi* [online]. Dostupné z: <https://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-1>
 21. MATHERS, Gene. *WELDING OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL* [online]. Cambridge: TWI, 2015, 2015 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/welding-of-austenitic-stainless-steel-103>
 22. MARTINEC, Jiří, Zdeněk ŠVEIDLER a Jiří JANOVEC. *Korozivzdorné materiály: Základní typy ocelí a doporučení pro jejich svařitelnost* [online]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/korozivzdorne-materialy-zakladni-typy-oceli-a-doporuceni-pro-jejich-svaritelnost/>
 23. *Fasteners. Druhy nerezové oceli a příklady jejího užití* [online]. Ivančice u Brna: FASTENERS CZ, 2022, [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.fasteners-cz.cz/druhy-nerezove-oceli-priklady-jejeho-uziti>
 24. *Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály* [online]. 2022. MM Průmyslové spektrum, 2003 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy-2-2-2
 25. *KONSTRUKCE: Svařování konstrukcí z korozivzdorných ocelí ve shodě s ČSN EN 1011-3* [online]. 2022. 1. Ostrava: KONSTRUKCE Media, 2012 [cit. 2022-05-07]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/svarovani-konstrukci-z-korozivzdornych-oceli-ve-shode-s-csn-en-1011-3/>
 26. BARTÁK, Jiří. *Svařování kovů v praxi: materiály, výpočty, technologie, požadavky na jakost, bezpečnost práce*. Praha: Dashöfer, 2008, (5). ISSN 1803-2834.
 27. ČÍHAL, Vladimír. *Mezikrystalová koroze ocelí a slitin*. Třetí přepracované a doplněné vydání. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1984, 355 stran: obrázky, tabulky + 5 listů s tabulkami.
 28. SCHMIDOVÁ, Eva. *Metalurgické vady svarových spojů*. Vyd. 2. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra mechaniky, materiálů a části [sic] strojů, 2014. ISBN 978-80-7395-851-0.
 29. PLUHARĚ, Jaroslav. *Nauka o materiálech*. 1. Praha: SNTL – Státní nakladatelství technické literatury, 1989, 552 s. ISBN 04-205-89.
-

-
30. FOLDYNA, Václav. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2. upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7185-3.
 31. *KONSTRUKCE: Problematika koroze a korozivzdorných materiálů* [online]. 2009. Ostrava: KONSTRUKCE Media, 2009 [cit. 2022-05-07]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/problematika-koroze-a-korozivzdorny-ch-materialu/>
 32. PILOUS, Václav a Vladimír KUDĚLKA. *Svařitelnost ocelí*. 1. Brno: TESYDO, 2017. ISBN 978-80-87102-17-6.
 33. KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-24820255
 34. *ASM Handbook Welding, Brazing and Soldering. Volume 6. 10th editon*. Materials Park, Ohio:ASM International, 2016. ISBN 978-0871703828
 35. MATHERS, Gene. *Welding of austenitic stainless steel*. *The Welding Institute* [online]. Cambridge, 2015 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/welding-of-austenitic-stainless-steel-103>.
 36. KOROZE. *Wikipedia* [online]. Praha: Wikipedia, 2009 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Korozivzdorn%C3%A1_ocel
 37. KOPEC, Bernard, Josef NEUGEBAUER a Pavel MAZAL. *Výrobní technologie a typické vady výrobků: (Basic): studijní příručka*. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství ve spolupráci s Českou společností pro NDT, 2020. ISBN 978-80-214-5878-9.
 38. ČSN EN 4063. *Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 24 s. Třídící znak 050011.
 39. KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-708-2697-5.
 40. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.
 41. SVARINFO: TIG svařování II – AC nebo DC. *SVARINFO* [online]. Praha: SVARWEB, 2009, [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2008122801%3E>
 42. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
 43. *POLYSOUDE: SPX CNC* [online]. Francie: Polysoude S.A.S, 2018 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.polysoude.com/spx-cnc-shipment-to-damman/>
 44. BALEJ, Zdeněk, Vladimír KUDĚLKA a Jan OPLETAL. *Učebnice pro základní kurz svařování ZK 141 8: obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu vysokolegovaných austenitických ocelí: (TIG, WIG, GTAW)*. 4. vydání. Ostrava: ZEROSS – svářečské nakladatelství, 2018. Svařování. ISBN 978-80-85771-16-9.
 45. *POLYSOUDE: Horký drát TIG* [online]. Francie: Polysoude S.A.S, 2018 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.polysoude.com/tig-hot-wire/>
 46. *POLYSOUDE: THE ART OF WELDING*. *www.Polysoude.com* [online]. Francie: Polysoude SAS, 2004 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://www.polysoude.com/orbital-and-automated-welding/>
-

-
47. NARROW GAP TIG WELDING GUIDE. In: *www.polysoude.com* [online]. France: *www.polysoude.com*, 2013 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: https://static1.squarespace.com/static/54becf2ae4b09fae314e6e56/t/57a88ff9c534a5bcfbc977ae/1470664711679/DOC_Guide_Narrow-Gap_Handbook_EN_LR.PDF
 48. The FABRICATOR. *The FABRICATOR: Could GTAW hot-wire go mainstream?* [online]. Kanada: FMA Communications, 2019, [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/arcwelding/could-gtaw-hot-wire-go-mainstream>
 49. PRIMO: Automatic Hot Wire Tig Welding Machines & Systems. [online]. Indie: PRIMO AUTOMATION SYSTEMS PVT, 2022, 2022 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.primoautomation.com/Welding/Automatic-Hot-Wire-Tig-Welding-Machine.php>
 50. MATAL, Oldřich a Hugo ŠEN. *Jaderná zařízení a jejich bezpečnost*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4349-5.
 51. POSTLER., M-KEILOVÁ.E, -BURDA.J.: *Stanovení prvotní příčiny poškození závitových hnízd SK PG12*. Zpráva ÚJV Řež.a.s., DITI 302/273, 2004.
 52. HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Vyd. 3. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN isbn80-01-03189-6.
 53. TNI CEN ISO/TR 15608. *Svařování – Směrnice pro zařazování kovových materiálů do skupin*. Praha: Český normalizační institut, 2008. 12 s. Třídící znak 050323.
 54. NORMATIVNĚ TECHNICKÁ DOKUMENTACE ASOCIACE STROJNÍCH INŽENÝRŮ. Sekce II.: *Charakteristiky materiálů pro zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER*. Praha, 2017. 120 s.
 55. GOST 5632-72. 1. Sovětský svaz: Standardní nakladatelství Moskva, 1975. Dostupné také z: <https://files.stroyinf.ru/Data1/3/3936/>
 56. EWM: METODA SVAROVÁNÍ WIG. EWM [online]. Německo: EWM, 2021 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.ewm-group.com/cs/innovation-forschung/schweissverfahren-wig.html>
 57. ČSN EN 10204: *Kovové výrobky – Druhy dokumentů kontroly*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. Třídící znak 010518.
 58. BAS: *RUČNÍ SPEKTROMETR VANTA*. BAS [online]. Blansko: BAS Rudice, 2017, [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.bas.cz/dodavatele-spektrometru/prodejci-spektrometru.php>
 59. ČSN EN ISO 10088: *Korozivzdorné oceli-Část 1: Přehled korozivzdorných ocelí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
 60. EWM: *TIG 450 GRIP WD CW/HW OW U/D HFL 12P 3 m*. EWM [online]. Německo: EWM, 2018 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: https://www.ewm-sales.com/cs/Svarovaci_horak/WIG/Horak_pro_studeny_a_horoky_drat/TIG_450_GRI_P_WD_CW_HW_OW_U_D_HFL_12P_3m--094-500158-10203.html?msclkid=58547f43ce8b11ec9ae46398cd340cae
 61. ČSN EN ISO 14343: *Svařovací materiály – drátové elektrody, páskové elektrody, dráty a tyče pro obloukové svařování korozivzdorných a žáruvzdorných ocelí-Klasifikace*. Třetí vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
-

-
62. *Normativně technická dokumentace A.S.I.: SVAŘOVÁNÍ ZAŘÍZENÍ A POTRUBÍ JADERNÝCH ELEKTRÁREN TYPU VVER*. In: ČR: Asociace strojních inženýrů, 2020, ročník 2020, číslo 1.
 63. *GOST 2246-70*. 1. Sovětský svaz: Standardní nakladatelství Moskva, 1973. Dostupné také z: https://ussa.su/gosts/GOST_2246_Provoloka_svarochnaya.PDF
 64. *PNAE G-7-010-89. Equipment and Piping of Nuclear Power Installations. Weld Joints and Weld Overlays. Rules of inspection*. Moskva, 2000. 91 s.
 65. *ČSN EN ISO 14 175: Svařovací materiály – Plyny a jejich směsi pro tavné svařování a příbuzné procesy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
 66. *ČSN EN ISO 6848: Obloukové svařování a řezání – Netavící se wolframové elektrody – Klasifikace*. Třetí vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
 67. Svarinfo.cz.: *MAGAZÍN PRAKTICKÉHO SVAŘOVÁNÍ* [online]. Praha: Svarbazar.cz, 2006 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2006111201>
 68. WELDKNOWLEDGE: *Vliv úhlu hrotu wolframové elektrody a správné techniky broušení – GTAW*. In: WELDKNOWLEDGE [online]. Indie: WELDKNOWLEDGE.com, 2015, [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://weldknowledge.com/2015/08/14/effect-of-tip-angle-of-tungsten-electrode-and-proper-grinding-techniques-gtaw/>
 69. *110. ČSN ENE ISO 3452-1: Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška. Část 1, Obecné zásady*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015, 24 s. Třídící znak 010518.
 70. *ČSN EN 1011-1. Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 1: Všeobecná směrnice pro obloukové svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. 16 s. Třídící znak 052210.
 71. *ČSN EN ISO 15609-1: Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Stanovení postupu svařování. Část 1. Obloukové svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021. Třídící znak 050312.
 72. Technický týdeník: *Volba ochranného plynu pro svařování. Technický týdeník* [online]. Business Media CZ s.r.o., 2006, (Praha), 1 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/volba-ochranneho-plynu-pro-svarovani_17636.html
 73. *EN ISO 15614-1. Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování – Část 1: Obloukové a plamenové svařování oceli a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. 48 s. Třídící znak 050313.
 74. SIGMUND, Marián: *Svařitelnost kovových materiálů. Svařitelnost C a C-Mn ocelí*. [prezentace]. 2020. 59 s. [cit. 2022-05-10].
 75. *OP 1513-72 Základní předpisy pro svařování a navařování uzlů konstrukcí jaderných elektráren, experimentálních a výzkumných jaderných reaktorů a souborů*. Praha: Ústř. inf. středisko pro jaderný program, 1976. 166 s.
-

-
76. ČSN EN ISO 17637. *Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizuální kontrola tavných svarů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. 16 s. Třídící znak 051180.
 77. Kolektiv autorů. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování*. 1. vydání. Ostrava: ZEROSS – svářečské nakladatelství, 2000. 217 s. ISBN 80-85771-72-1.
 78. TPE 10-40/1771/2014-JE. *Všeobecné technické podmínky pro montážní svařování potrubí elektráren typu VVER*. 2014, 39 s.
 79. MOLLIKOVA, Eva. *Zkoušení materiálů a výrobků. Interaktivní výukový materiál*. VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, 2005.
 80. ČSN EN ISO 148-1: *Kovové materiály-Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy. Část 1. Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017. Třídící znak 420381.
 81. PK 1514-72. *Pravidla kontroly svarových spojů a návarů uzlů a konstrukcí jaderných elektráren, zkušebních a výzkumných jaderných reaktorů a zařízení (překlad z ruského jazyka)*. Moskva: Metallurgia, 1974.
 82. **NORMATIVNĚ TECHNICKÁ DOKUMENTACE ASOCIACE STROJNÍCH INŽENÝRŮ. Sekce VII.: NDT kontroly jaderných elektráren typu VVER**. Praha, 2020. 87 s.
 83. ČSN EN ISO 17636-1. *Nedestruktivní zkoušení svarů – Radiografické zkoušení. Část 1, Metody rentgenového a gama záření využívající film*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. 36 s. Třídící znak 051150
 84. ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021. 76 s. Třídící znak 420310
 85. ČSN EN ISO 17639. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014. 12 s. Třídící znak 051128.
 86. WikiSkripta: Stereomikroskop. *WikiSkripta* [online]. Praha: Creative Commons, 2019, [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Stereomikroskop>
 87. ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. 32 s. Třídící znak 420374
 88. ČSN EN ISO 6507-4: *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse: Tabulky hodnot tvrdosti*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018, 76 s. Třídící znak 420374.
 89. 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
 90. Citace PRO. [online]. Brno: Ústřední knihovna VUT v Brně a Citace.com, 2020, [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: [https:// www.citacepro.com/slozka](https://www.citacepro.com/slozka)
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Tažnost	[%]
Al	Hliník	[-]
Ar	Argon	[-]
ASI	Asociace strojních inženýrů	[-]
C	Uhlík	[-]
°C	Jednotka teploty	[C]
cca	Přibližně	[-]
Co	Kobalt	[-]
CO ₂	Oxid uhličitý	[-]
Cr	Chrom	[-]
Cr _E	Chromový ekvivalent	[%]
ČSN	Česká státní norma	[-]
DN	Jmenovitá světlost	[mm]
EN	Evropská norma	[-]
F	Síla	[Pa]
FN	Feritové číslo	[%]
GTAW	GasTungstenArcWelding	[-]
He	Helium	[-]
H ₃ BO ₃	Kyselina boritá	[%]
ISO	International Organization for Standardization	[-]
JE	Jaderná elektrárna	[-]
MAG	MetallActiveGas	[-]
MIG	MetallInertGas	[-]
MKK	Mezikrystalová koroze	[-]
Mn	Mangan	[-]
Mo	Molybden	[-]
N	Dusík	[-]
Nb	Niob	[-]
Ni _E	Niklový ekvivalent	[%]
NDT	Non Destructive Testing	[-]
NTD	Normativně Technická Dokumentace	[-]
O ₂	Kyslík	[-]
Obr.	Obrázek	[-]
P	Fosfor	[-]

PT	Penetrant testing	[-]
Rm	Smluvní mez pevnosti materiálu v tahu	[MPa]
Rp,02	Smluvní mez kluzu materiálu v tahu	[MPa]
RT	Radiographic testing	[-]
S	Síra	[-]
Si	Křemík	[-]
Ti	Titan	[-]
Tab.	Tabulka	[-]
TIG	TungstenInertGas	[-]
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	[-]
TPE	Technické dodací podmínky	[-]
V	Vanad	[-]
VT	Visual testing	[-]
VVER	Vodo – vodní energetický reaktor	[-]
W	Wolfram	[-]
WIG	Wolfram InertGas	[-]
WPS	WeldingProcedureSpecification	[-]
pWPS	PreliminaryWeldingProcedureSpecification	[-]
WPQR	WeldingProcedureQualifikation Record	[-]
α	Alfa	[-]
γ	Gama	[-]
δ	Delta	[-]
σ	Sigma	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Jaderná elektrárna a svařování. [2;3]	9
Obr. 2 Model parního generátoru V-213. [3]	10
Obr. 3 Pasivní vrstva korozivzdorné oceli. [11].....	11
Obr. 4 Rovnovážný diagram železo-chrom. [12].....	12
Obr. 5 Typy korozivzdorných ocelí dle obsahu chrom-nikl. [12].....	13
Obr. 6 Schaefflerův strukturní diagram Cr–Ni. [4].....	13
Obr. 7 De Longův diagram Cr–Ni ocelí. [4;9;14;15].....	14
Obr. 8 Diagram WRC 1992. [16]	15
Obr. 9 Feritická ocel. [17]	16
Obr. 10 Martenzitická ocel. [17]	16
Obr. 11 Austeniticko-feritická ocel. [17]	18
Obr. 12 Austenitická ocel. [17]	18
Obr. 13 Krystalizační trhlina. [27]	20
Obr. 14 Horké trhliny ve svarovém kovu. [28].....	20
Obr. 15 Mezikrystalová koroze. [27]	20
Obr. 16 Ochuzení hranice zrn. [31].....	21
Obr. 17 Kinetika zcitlivění austenitických vysokolegovaných ocelí v závislosti na teplotě, obsahu uhlíku a době expozice. [27].....	22
Obr. 18 Části elektrického oblouku. [5]	23
Obr. 19 Metoda svařování TIG. [1;44]	25
Obr. 20 Voltampérová charakteristika TIG svařování. [41]	26
Obr. 21 Vliv polarity na tvar svaru. [5].....	26
Obr. 22 Průběh pulsního proudu. [6].....	27
Obr. 23 Průběhy střídavého proudu. [6;41].....	28
Obr. 24 Svařování heterogenního spoje.	29
Obr. 25 Svařování metoda WOL.....	29
Obr. 26 Zařízení SPX. [43]	30
Obr. 27 Svařování horkým drátem. [45]	31
Obr. 28 Horní část parního generátoru. [3]	32
Obr. 29 Víko horního kolektoru PG. [51]	33
Obr. 30 Trhlina v závitovém hnízdě. [51;52].....	33
Obr. 31 Svařování horního kolektoru metodou 111.....	34
Obr. 32 Svařovací sestava SPX. [43]	34
Obr. 33 Tvar spoje pro automatizované	35
Obr. 34 Kladení vrstev svarového kovu. [43].....	35
Obr. 35 Měření spektrometrem.	37
Obr. 36 Naměřené hodnoty přístrojem VANTA.....	38
Obr. 37 Úprava návarových hran.	38
Obr. 38 Svářecí zařízení EWM. [56].....	39
Obr. 39 Podávací zařízení drátu EWM. [56].....	39
Obr. 40 Svařovací hořák EWM pro horký drát. [60]	39
Obr. 41 Svařovací tyčky.....	40
Obr. 42 Svařovací drát 0,8 mm.	40
Obr. 43 Výsledná struktura svarového spoje. [4].....	42
Obr. 44 Špička svařovací elektrody. [66].....	44
Obr. 45 Bruska na broušení wolframových elektrod.	44
Obr. 46 Broušení wolframových elektrod. [68]	44
Obr. 47 Přehled proudového zatížení zdroje EWM. [56]	45

Obr. 48 Obrobené polotovary experimentu.....	46
Obr. 49 Penetrační kontrola návarových hran.....	46
Obr. 50 Tréninkové pracoviště pro svařování vzorku.....	47
Obr. 51 Ochrana kořenové vrstvy argonem a měření zbytkového kyslíku.....	47
Obr. 52 Znázornění kladení jednotlivých vrstev svarového kovu.	48
Obr. 53 Nastavené parametry při svařování.....	49
Obr. 54 Průběh svařování experimentu.....	50
Obr. 55 Kořenová vrstva spoje.....	51
Obr. 56 Kontrola PT krycích vrstev.	51
Obr. 57 Dělení vzorků pro destruktivní zkoušky.	52
Obr. 58 Lom vzorku.....	53
Obr. 59 Zařízení pro tahovou zkoušku.....	53
Obr. 60 Graf z tahové zkoušky.....	53
Obr. 61 Připravené vzorky na zkoušku.	54
Obr. 62 Charpyho kladivo.....	54
Obr. 63 Lomová plocha z oblasti svarového kovu pod povrchovou vrstvou.....	55
Obr. 64 Lomová plocha z oblasti svarového kovu v kořenové vrstvě.	55
Obr. 65 Lomová plocha z oblasti TOO pod povrchem svarového spoje.	55
Obr. 66 Lomová plocha z oblasti TOO kořenové vrstvě svaru.....	55
Obr. 67 Svarový spoj po naleptání.....	56
Obr. 68 Identifikovaná mikro vada.	56
Obr. 69 Hranice ztavení.	56
Obr. 70 Vrstvy svarového kovu.	56
Obr. 71 Rozmístění míst vtisku.....	57
Obr. 72 Rozmístění odběru vzorků.	58
Obr. 73 Snímek v oblasti kořenové vrstvy.....	58
Obr. 74 Snímek z oblasti č.1.	58
Obr. 75 Snímek z oblasti č.2.	58

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Seznam značek materiálů přípustných dle NTD A.S.I. Sekce II.	36
Tabulka 2 Mechanické vlastnosti použitého vzorku materiálu.	36
Tabulka 3 Chemické složení použitého vzorku materiálu.	37
Tabulka 4 Chemické složení přídavného materiálu pro svařování.	41
Tabulka 5 Mechanické vlastnosti přídavného materiálu pro svařování.	41
Tabulka 6 Značení a čistota dodávaného argonu. [5;65]	43
Tabulka 7 Označení wolframových elektrod. [44; 66]	43
Tabulka 8 Parametry svařování pro sestehování svařovaných dílů.	48
Tabulka 9 Parametry svařování kořenové vrstvy dle pWPS.	48
Tabulka 10 Parametry svařování od kořenové vrstvy.	49
Tabulka 11 Parametry svařování výplně horkým drátem.	49
Tabulka 12 Parametry svařování krycí vrstvy.	49
Tabulka 13 Naměřené hodnoty z tahové zkoušky vzorků.	54
Tabulka 14 Hodnoty měření tvrdosti svarového spoje.	57

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Inspekční certifikát 3.2 základní materiál.
 - Příloha 2 Protokol z měření chemických prvků.
 - Příloha 3 Výkres návarových hran.
 - Příloha 4 Inspekční certifikát 3.2 přídavný materiál.
 - Příloha 5 Protokol o provedení rozměrové kontroly
 - Příloha 6 Protokol o provedení PT návarových hran.
 - Příloha 7 pWPS svarového spoje.
 - Příloha 8 Protokol o vizuální kontrole svarového spoje.
 - Příloha 9 Protokol o provedení PT svarového spoje.
 - Příloha 10 Protokol o provedení RT zkoušky.
 - Příloha 11 Protokol z tahové zkoušky.
 - Příloha 12 Protokol ze zkoušky vrubové houževnatosti svaru.
 - Příloha 13 Protokol ze zkoušky vrubové houževnatosti v TOO
 - Příloha 14 Protokol z metalografické zkoušky.
-



ZDAS a.s., Strojnírenská 675/6 Žďár nad Sázavou I 591 01 Žďár nad Sázavou
 Inspekční certifikát EN 10204 3.2 MOJ08 Protokol č. 4688/2020
 Obsah dokumentu dle EN 10163 Datum: 17.12.2020

ZDAS, a.s. je certifikovaná společností TCV NCRD
 v systémech:
 ISO 9001, ISO 14001, ISO 45001
 ve výrobcích:
 2014/58/EU příloha I, Kap. 4.3, AD 2000-Merkblatt W0,
 ISO 3834-2

ČEZ ENERGOSERVIS spol. s r.o.

 Bráňova 16
 674 01 Třebíč
 ČESKO

Inspekční certifikát EN 10204 3.2 Stran: 1

Zakázka K-398-1156	S.č. 1	Objednávka 4102235360	Objednatel ČEZ ENERGOSERVIS Třebíč
Výkres 3-JA-003138		Název	Typ výrobku Výkovky
		Materiál 08CH18N10T	Norma GOST5632
		Číslo 4	Číslo 01.01.1972
Tavba 63906	Druh výroby EO_LF_V00	Datum III 13.07.2020	Počet kusů 6
		Pořadová čísla 775475-775480	

Výrobce prohlašuje, že výrobky jsou ve shodě s kupní smlouvou 156194/2020-KOV a jinými technickými dokumenty : PKJ VPE 804 01309, Revize 2

Ražení:
 číslo tavby, číslo výkovku, materiál, znak ZDAS, znak SZU



Chemické složení tavby

Obsah prvků v %, obsah vodíku v ppm. Nebyla překročena hmotnostní aktivita 0.1 Bq/g ekvivalent Co 60

Tavba	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	W	Co	*14
min						17.0	9.00						0.25
max	0.08	2.00	0.60	0.035	0.020	19.0	11.0					0.050	0.70
63906	0.05	1.58	0.48	0.07	0.002	17.90	10.10	0.80	0.07	0.08	0.03	0.03	0.320
Tavba	*15												
min	0.10												
max	15.00												
63906	0.48												

*14 Ti min. 5°C – max. 0,70%
*15 Deltaferit

Přílohy:

Protokol o mechanických zkouškách	2565/2020
Protokol o tepelném zpracování	2804/2020
Rozměrový protokol	1729/2020
Hodnocení mikrostruktury oceli hlubokým leptáním	0134/2020
Hodnocení mikročistoty	0344/2020
Hodnocení velikosti zrna	0190/2020
Hodnocení odolnosti proti mezikrystalové korozi	0149/2020
Protokol o ultrazvukové zkoušce	2779/2020, 2804/2020
Protokol o penetrační zkoušce	0180/2020, 0181/2020
Protokol o vizuální zkoušce	0806/2020

Poznámka:
 Výkovky podléhají vyhlášce SÚJB ČR č. 358/2016 Sb., §12, odstavec 2, písmeno (a)

STROJNĚRETSKÝ ZKOUŠECNÍ ÚSTAV, a.s.
Tř - technické inspekce

OVĚŘENO - APPROVED - GEPRÜFT

čj: EG-47214/0361/6/1/1

Datum: 17-12-2020



Výsledek zkoušky vyhovuje	Oprávněný zástupce odběratele:
Vypracoval Neubauerová Miluše	Oprávněný zástupce výrobce Kazda Petr vlastní přejmač



¹⁰⁰¹ Žďas a.s. Strojírenská 675/6 Žďár nad Sázavou 1 591 01 Žďár nad Sázavou
¹⁰⁰² Inspekční certifikát EN 10204 3.2 MOJ04 Protokol č. ¹⁰⁰³ 2655/2020

¹⁰⁰⁴ Zakázka K-398-1156	¹⁰⁰⁵ B.c. 1	¹⁰⁰⁶ Objednávka 4 02235380	¹⁰⁰⁷ Zákazník ČEZ ENERGOSERVIS Třebíč
¹⁰⁰⁸ Výkres 3-JA-003138		¹⁰⁰⁹ Název	¹⁰¹⁰ Materiál 08CH18N10T
¹⁰¹¹ Pořadové číslo 775475-775480			

Protokol o mechanických zkouškách

¹⁰¹² Vzorek 775475	¹⁰¹³ Grár 873	¹⁰¹⁴ Směr Tangenciální	¹⁰¹⁵ Tabula 63906
----------------------------------	-----------------------------	--------------------------------------	---------------------------------

Zkouška tahem ČSN EN ISO 6802-1 ¹⁰¹⁶ Teplota: 23±5 °C Zkouška č.: 263869
 Přístroj : Zwick Z 400E Datum: 13.11.2020
 1x do 10.00mm

předepsáno	¹⁰¹⁷ Rp0,2 > 198 MPa	¹⁰¹⁸ Rm > 468 MPa	¹⁰¹⁹ A5 > 30 %	Z > 40 %
zjištěno	Rp0,2= 232 MPa	577 MPa	52.5 %	70.4 %

Zkouška tahem ČSN EN ISO 6892-2 ¹⁰²⁰ Teplota: 350 °C Zkouška č.: 263870
 Přístroj : WALTER BAI Datum: 13.11.2020
 1x do 10.00mm

předepsáno	¹⁰²¹ Rp0,2 > 157 MPa	¹⁰²² Rm > 335 MPa	¹⁰²³ A5 > 20 %	Z > 32 %
zjištěno	Rp0,2= 202 MPa	418 MPa	39.2 %	72.1 %

T1
32

17-12-2020

Výsledek zkoušky	vyhovuje	Strana: 1 / 1
¹⁰²⁴ Zapsal Kubálek Luboš, Bg.	 ZDAS, a.s. Žďár nad Sázavou 602 02847 (tel. 52 4034118) • 100 •	¹⁰²⁵ Schválil Kazda Petr firmní pečím



Sériové číslo : 803295 Cas Metax 2.08103112.00.37
 Změřovací kamera
 ID: 5

Složení

1.4541 1.4878 1.4571

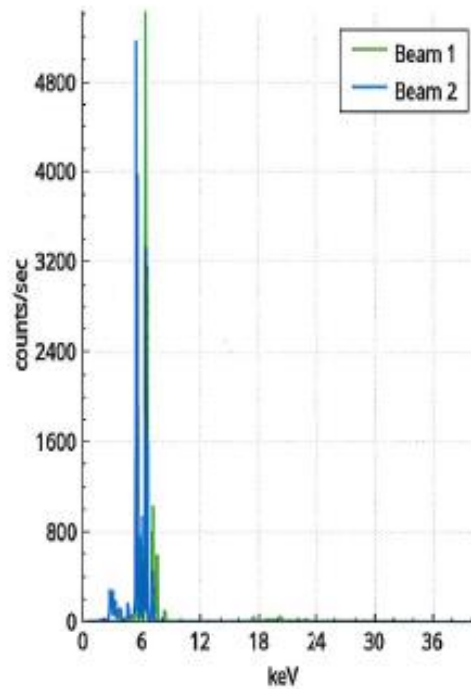
1.4541

Přesný - X6CrNiTi18-10 I3211

El	%	+/-	1.4571
Si	0.625	0.020	
P	ND	<0.008	
S	ND	<0.007	
Ti	0.356	0.009	
V	0.079	0.005	Resid. 0.2
Cr	17.791	0.030	
Mn	1.546	0.020	
Fe	69.341	0.045	
Ni	10.041	0.032	
Cu	0.103	0.007	
Nb	0.0132	0.0005	Resid. 0.1
Mo	0.081	0.001	
Sn	0.023	0.002	Resid. 0.1



Spektrum

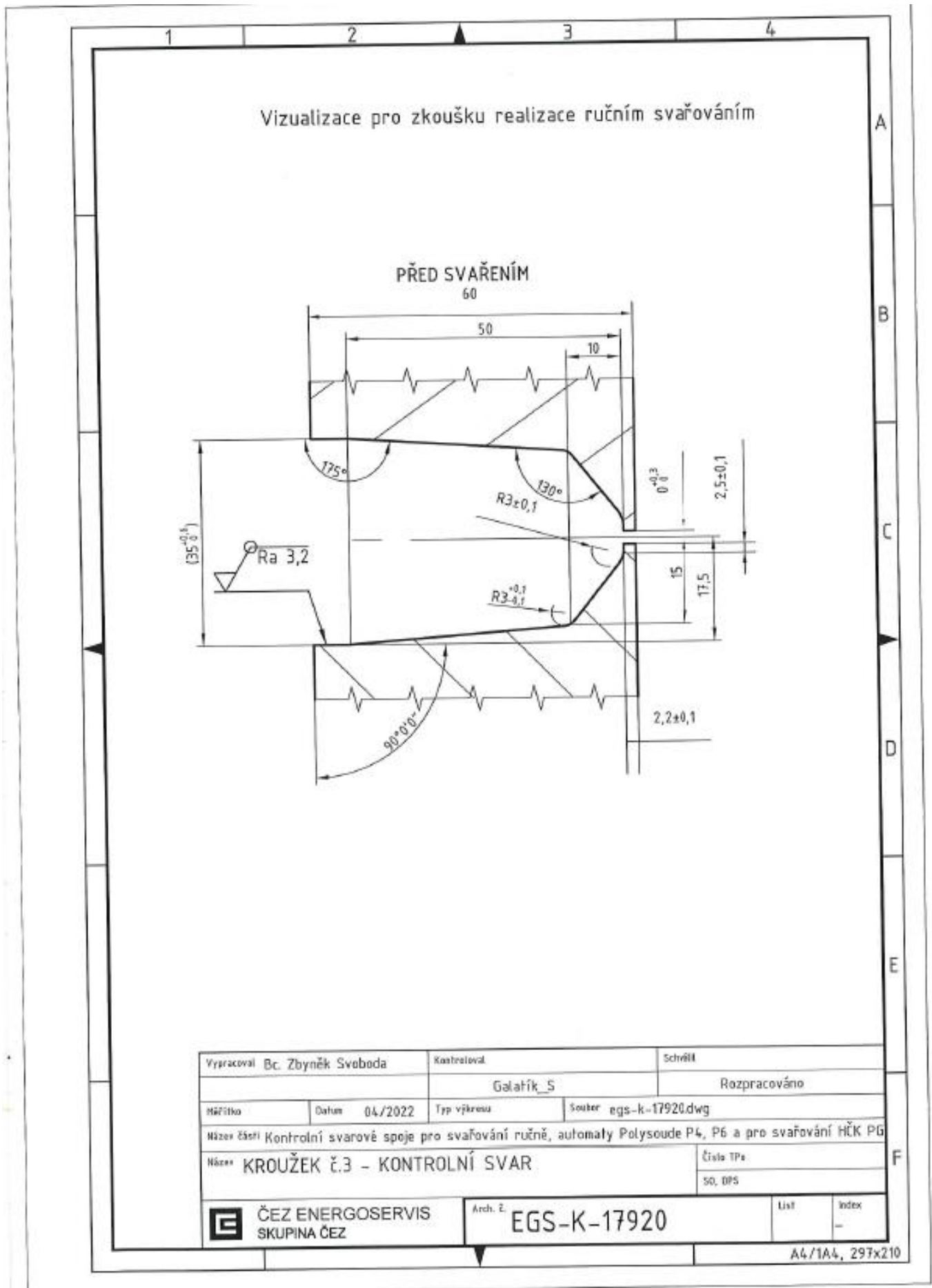



Poznámky

Manufacturer: Vykovek
 Model: 08Ch18N10T
 Mileage: 63906
 VIN: I

Podpis: _____

Datum: _____



 Český svářečský ústav s.r.o. ® Czech Welding Institute Ltd. / Чешский сварочный институт 17.listopadu 2172/15, 708 33 Ostrava - Poruba, Czech Republic	AO 267	strana / page / страница 1 z / из 3

Inspekční certifikát 3.2 podle EN 10204 Inspection certificate 3.2 acc. to EN 10204 Инспекционный Сертификат 3.2 для EN 10204	číslo /No./ №: IC 3.2/12/2015/08
--	-------------------------------------

potvrzující možnost použití přídavného materiálu pro svařování jaderných zařízení typu VVER / confirming the possibility of using filler material for welding of nuclear equipment of VVER type/ удостоверяется что сварочная присадка соответствует требованиям для сварки атомных энергетических установок типа ВВЭР.	Vyhláška č. 309/2005 Sb. Regulation Nr. / Объявление BT: 1
---	--


Souhlas výrobce přídavného materiálu s vystavením inspekčního certifikátu / schvalovacího listu je potvrzen objednávkou/smlouvou na provedení zkoušek. / Permission of filler material producer with making out a inspection certificate is confirmed by purchase order / testing contract. / Инспекционный сертификат выдан на основании контракта на испытание сварочной проволоки

Objednatel Client / Клиент	ŠKODA JS, a.s., Orlik 266, 316 06 Plzeň, Czech Republic
Číslo objednávky / smlouvy Order No. / Заказ №:	КОНТРАКТ № ИСМ/П-108-2015
Typ přídavného materiálu Type of Filler material / Тип сварочной присадки	Svařovací drát / Welding Wire / Проволока сварочная
Označení výrobce Trade designation/ Марка производителя	Sv-04Ch19N11M3 / Св-04Х19Н11М3
Klasifikace přídavného materiálu Classification of filler material / Технические требования св. присадки	GOST 2246-70 / ГОСТ 2246-70
Tavba / LOT Lot-Heat No. / Плавка №:	33162
Průměr [mm] Diameter / Диаметр	0,8 mm / 0,8 мм
Plyn - tavidlo Gas - flux / Газ - Флюс	Argon/Аргон
Výrobce Manufacturer / Производитель	Ижорские сварочные материалы, 196651, Россия, Санкт-Петербург, Колпино, проспект Ленина, д. 1 Ижорские сварочные материалы, 196651, Saint-Petersburg, Kolpino, pr. Lenina, d. 1
Dodané množství Quantity delivered / Количество продукции	493 kg / кг
Požadované normy a předpisy Requirements / Тех. требования	PN AE G-7-010-89, Ae15085/Dok(Rj) Rev.0, NTD A.S.I. Sekce 1

CHEMICKÉ SLOŽENÍ SVAROVÉHO KOVU DRÁTU (%)
 CHEMICAL COMPOSITION ALL-WELD METAL WIRE
 ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СВАРОЧНОГО МЕТАЛЛА ПРОВОЛОКИ

Tavba / LOT Lot/Heat No. / Плавка	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V	Ni	Al	N	Nb	Ti+ Zr	Cu	Co
33162	0,015	1,87	0,37	0,017	0,008	18,44	1,97	-	10,20	-	-	-	-	-	0,049
Požadavek Requirement / Требование	Max / Не более 0,06	0,90 -	Max / Не более 0,60	Max / Не более 0,025	Max / Не более 0,018	17,80 -	1,80 -	-	9,80 -	-	-	-	-	-	Max / Не более 0,050



 Český svářečský ústav s.r.o. ® Czech Welding Institute Ltd. / Чешский сварочный институт 17. listopadu 2172/15, 708 33 Ostrava - Poruba, Czech Republic	AO 267	strana / page / страница 2 z / из 3
	Inspekční certifikát 3.2 podle EN 10204 Inspection certificate 3.2 acc. to EN 10204 Инспекционный Сертификат 3.2 для EN 10204	
Inspekční certifikát 3.2 podle EN 10204 Inspection certificate 3.2 acc. to EN 10204 Инспекционный Сертификат 3.2 для EN 10204		číslo /No./ №: IC 3.2/12/2015/08

ZKOUŠKA TAHEM podle norem: ГОСТ 6996 ТИП II / GOST 6996 Type II
TENSILE TEST according to: / ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ ДЛЯ:


Tavba / LOT Lot/Heat No./ Плавка	Zkušební teplota Test temp./ Температура (°C)	Re	Rp0.2	Rm	A ₅	Z	Tepelné zpracování Heat treatm./ Термообработка	Poznámka Remarks/ Замечание
		(MPa) / (МПа)			(%)			
Požadavek Requirement / Требование	+20 +350	-	274 245	441 392	25	40	-	min / не более
258 П-1	+20	-	550	630	40,0	71	-	-
258 П-2	+20	-	550	650	36,0	74	-	-
258 П-3	+350	-	410	470	21,5	76	-	-
258 П-4	+350	-	410	475	25,0	75	-	-

ZKOUŠKA RÁZEM V OHYBU podle: ГОСТ 6996 ТИП VI / GOST 6996 Type VI
IMPACT TEST according to: / ИСПЫТАНИЯ НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ ДЛЯ:

Tavba / LOT Lot/Heat No./ Плавка	Zkušební teplota Test temp./ Температура (°C)	Tepelné zpracování Heat treatm./ Термообработка	KV (J) (Дж)	KCU 2 (J/cm ²) (Дж/см ²)	Procento houževnatého lomu Percentage of ductile fracture / Процент хрупкого излома
Požadavek Requirement / Требование	+20	-	-	min / н.б. 49	-
258 П-1	+20	-	-	236	-
258 П-2	+20	-	-	223	-
258 П-3	+20	-	-	217	-

PARAMETRY POUŽITÉ PRO NAVAŘENÍ SVAROVÉHO KOVU
WELDING PARAMETERS OF ALL WELD METAL / ПАРАМЕТРЫ СВАРКИ

Tavba / LOT Lot/Heat No./ Плавка	Teplota předehřevu - interpass Preheat-Interpasstemp./ Предварительный нагрев- промежуточных слоев (°C)	Druh - polarita proudu Type of current-Polarity/ Тип тока-полярность	Intenzita proudu Amperage / Сила тока (A)	Napětí Voltage / Напряжение (V)
33162	- / 100	DC/ток постоянный	90-100	11-12
	Rychlost podávání drátu Wire Speed / Подача проволоки (cm/min)	Tepelný příkon Heat input / Потребная энергия (kJ/mm)	Ochranný plyn - tavidlo Shielding gas-flux Защитный газ-флюс	Množství ochranného plynu Gas consumption/ Расход защитного газа (l/min)
	-	-	Argon/Аргон	8

 Český svařovací ústav s.r.o. Czech Welding Institute Ltd. / Чешский сварочный институт 17. listopadu 2172/15, 708 33 Osirava - Ponha, Czech Republic	AO 267	strana / page / stránka 3 z/из 3

Inspekční certifikát 3.2 podle EN 10204 Inspection certificate 3.2 acc. to EN 10204 Инспекционный Сертификат 3.2 для EN 10204	číslo /No./ №: IC 3.2/12/2015/08
--	-------------------------------------

OSTATNÍ ZKOUŠKY / OTHER TESTS / Другие испытания

Zkouška Test / Проба	Metoda Method / Метод	Výsledek Result / Результат:
Stanovení FN Determination of FN Содержание ферритной фазы	GOST 2246-70 / ГОСТ 2246-70 Requirement / Требование: 2 - 8	3,3
Odolnost proti MKK Intercrystalline corrosion resistance Стойкость к МКК	GOST 6032-2003 / ГОСТ 6032-2003	Vyhovuje/ Satisfactory/ Стойкие
Odolnost proti teplým trhlinám Hot cracks resistance Склонность к образованию горячих трещин	GOST 7512 / ГОСТ 7512 PN AE G-7-010-89 / ПН АЭ Г-7-010-89	Vyhovuje/ Satisfactory/ Не склонен
Ověření teploty Tk₀ Verification of Tk ₀ temperature Удостоверение температуры Tk ₀		

Inspekční certifikát byl vystaven v souladu s výsledky uvedenými v inspekční zprávě č.: 12/2015/08
 Inspection certificate was issued in accordance with the results shown in the inspection report No.: 12/2015/08
 Инспекционный сертификат оформлен на основании результатов, представленных в отчете №: 12/2015/08

Všechny stanovené požadavky byly splněny.
 All the test results meet the requirements. / Все установленные требования соответствуют.

Podmínky omezující použití přídatného materiálu: The limiting conditions for using filler material: Условия которые ограничивают применение сварочные присадки:
--

Seznam příloh: Certificate 3.1 acc. to EN 10204 № 544-15 /
 List of annexes: Сертификат 3.1 по EN 10204 № 544-15
 Приложения

Saint-Petersburg / Санкт-Петербург
 Misto / Place / Место



20.03.2015
 Datum / Date / Дата

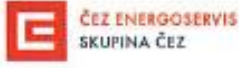



Ижорские Сварочные Материалы
Producer / Изготовитель
 Jméno, Podpis, Razítko
 Name, Signature, Stamp / Имя, Подпись, Штамп

Ing. Martin Sondel, Ph.D.
Inspector AO 267
 Jméno, Podpis, Razítko
 Name, Signature, Stamp / Имя, Подпись, Штамп

Dokument nelze reprodukovat jinak než v celku. Výsledky inspekce se vztahují pouze na předmět inspekce.
 This document may be reproduced only as a whole. Inspection results apply only to the subject of inspection.
 Настоящий документ можно воспроизводить только в качестве комплекта. Результат инспекции касается только предмета инспекции

	PROTOKOL		Datum provedené kontroly: 25.3. 2022
	o provedení rozměrové kontroly		Č.prot.: RK-EWM-1
Název zařízení: Horní kolektor PG	Blok č. ---	EDU-Heřmanice	
	Zakázka č.: ---	Výkres č.: EGS-K-17920	
	Výrobní č.: ---		
Odběratel: ---	Počet ks: 2	Příloha: ---	
Název kontroly a její parametry /specifikace / Rozměrová kontrola			dle vyhl. 358 / 2016 ANO
Kontrola provedena dle / Výkresové dokumentace EGS-K-17920			
<p>Výsledek kontroly (závady nezjištěny, nebo jednoznačná specifikace zjištěných závad):</p> <p>Dne 25.3. 2022 byla provedená rozměrová kontrola vzorku pro opravu Horního kolektoru PG.</p> <p>Použitá měřidla : Luxmetr : X3223 kal. do 3/2021 Svinovací metr 3m : G3519 kal. do 10/2021 Posuvné měřítko 150mm : G3219 kal. do 1/2021 Posuvné měřítko 1000mm : G3327 kal. do 11/2021</p> <p>Závěr : VYHOVUJE dle výkresové dokumentace EGS-K-17920.</p> <p>Kontrolu provedl: David Sobotka</p>			
V Dukovanech dne: 26.3. 2022		Vystavil (razítko, podpis)	
			

	PROTOKOL o provedení kapilární zkoušky		Datum provedené kontroly: 25.3. 2022																
			Č.prot.: PT-EWM-1																
Název zařízení: Horní kolektor PG	Blok č. ---	materiál: Austenit																	
	Poč. ks: 2																		
	Zak.č.: --- Výrobní číslo: ---																		
Odběratel: ---	Číslo výkresu: EGS-K-17920	Č. místnosti: EDU-Heřmanice																	
Název kontroly a její parametry /specifikace / Kapilární zkouška			dle vyhl. 358/2016 ANO																
Kontrola provedena dle: Požadavků: NTD A.S.I. VII 2020 3.2.5 kat.SS I 100%, ČSN EN ISO 3452 -1. Vyhodnoceno dle: ČSN EN ISO 23277 st. I 100%																			
Zkušební zařízení : <table border="0" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;"></th> <th style="width: 20%; text-align: center;"><i>Typ</i></th> <th style="width: 20%; text-align: center;"><i>Výrobce</i></th> <th style="width: 30%; text-align: center;"><i>Identifikační č.</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Čistič</td> <td style="text-align: center;">Metaflux 70-9801</td> <td style="text-align: center;">Metaflux</td> <td style="text-align: center;">39182X</td> </tr> <tr> <td>Kontrastér</td> <td style="text-align: center;">Metaflux 70-9802</td> <td style="text-align: center;">Metaflux</td> <td style="text-align: center;">43183X</td> </tr> <tr> <td>Vývojka</td> <td style="text-align: center;">Metaflux 70-9803</td> <td style="text-align: center;">Metaflux</td> <td style="text-align: center;">27195X</td> </tr> </tbody> </table>					<i>Typ</i>	<i>Výrobce</i>	<i>Identifikační č.</i>	Čistič	Metaflux 70-9801	Metaflux	39182X	Kontrastér	Metaflux 70-9802	Metaflux	43183X	Vývojka	Metaflux 70-9803	Metaflux	27195X
	<i>Typ</i>	<i>Výrobce</i>	<i>Identifikační č.</i>																
Čistič	Metaflux 70-9801	Metaflux	39182X																
Kontrastér	Metaflux 70-9802	Metaflux	43183X																
Vývojka	Metaflux 70-9803	Metaflux	27195X																
<p>Dne 25.3. 2022 byla provedená kapilární zkouška návarových hran zkušebních vzorků Horního kolektoru PG.</p> <p>Zkouška byla provedená penetrační metodou pomocí detekčních prostředků ve sprejích Metaflux.</p> <p>Výsledek zkoušky : kapilární zkouškou nebyly zjištěny žádné indikace kontrolovaného povrchu</p> <p>Závěr : V Y H O V U J E.</p> <p>Zkoušku provedl : David Sobotka</p> <p>Zkoušku vyhodnotil : David Sobotka</p>																			
V Dukovanech dne: 26.3.2022		Vystavil (razítko, podpis) <div style="text-align: right;">  </div>																	

WPS

předběžná specifikace postupu svařování (dle ČSN EN 15609-1)

pWPS č.: 141-A-670x60-EWM

WPQR č.: --- (dle ČSN EN ISO 15614-1)

Výrobce: Bc. Vladimír Šmarda

Místo: JE Dukovany (Heřmanice)

1. Základní informace o svařování:

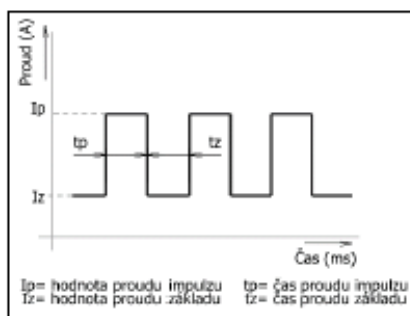
Základní materiál: Skupina dle: TNI CEN ISO/TR 15608: 8.1 + 8.1 Skupina dle: PNAE G-7-003-87: 6+ 6 <u>Označení dle standardu:</u> 1.4541 ; 08CH18N10T + 1.4541 ; 08CH18N10T	Přídavný materiál: - <u>Výrobce:</u> PAO Ižorské závody - <u>Označení výrobce:</u> Sv-04Ch19N11M3 - <u>Výrobní norma:</u> GOST 2246-70 - <u>Rozměr:</u> Ø 0,8 mm (drát na cívce)
Ochranný plyn: (dle: ČSN EN ISO 14175-I) - <u>Označení:</u> Argon 4,6 (Ar 99,996) - <u>Průtočné množství:</u> 12 ÷ 18 l/min. - <u>Ochrana kořene:</u> 7 ÷ 11 l/min.	Zařízení pro svařování: (výrobce: EWM AG) - <u>Svařovací zdroj:</u> Tetrix 300 AC/DC Comfort 2.0 puls 8 - <u>Podavač přídavného materiálu:</u> tigSpeed oscillation drive 45 hotwi
Typ a Ø wolframové elektrody [mm]: (dle: EN ISO 6848) WL 20 Ø 3,2	Interpass teplota [°C]: max.100 (nutno dodržovat po svaření každé housenky)
Teplota předehřevu: neprovádí se	Tepelné zpracování po svařování: neprovádí se
Metoda svařování: (dle: EN ISO 4063) 141 ruční-částečně mechanizované	Poloha svařování: (dle: EN ISO 6947) PC
Typ spoje: BW (tupý)	Uhel sklonu wolframové elektrody k základnímu materiálu: 70°÷110°
Způsob stehování: Ruční (metodou 142- dle EN ISO 4063)	Rychlost svařování [mm/min]: Řídí si svářeč sám, dle aktuálního průběhu svařování.
Rozkyv: Ne	Průměr plynové hubice [mm]: Ø 10 ÷ 24
Tloušťka stěny základního materiálu [mm]: t= 60±3mm	Vnější průměr základního materiálu [mm]: OD= 670±5mm

Výrobce: ČEZ ENERGOSERVIS, spol. s r.o.	Schválil: ČEZ a. s.
<i>Jméno, razítko, podpis, datum</i>	<i>Jméno, razítko, podpis, datum</i>

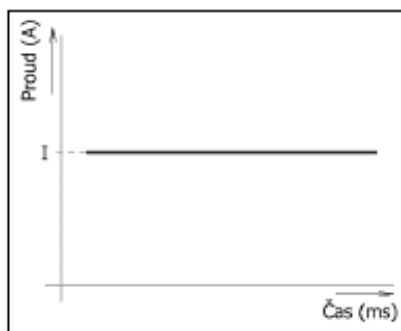
WPS
předběžná specifikace postupu svařování (dle ČSN EN 15609-1)
pWPS č.: 141-A-670x60-EWM
WPQR č.: --- (dle ČSN EN ISO 15614-1)

2. Druh svařovacího proudu/polarita:

- Stejnoseměrný pulzní [DC/-]: Použitý pro první (kořenovou) vrstvu.



- Stejnoseměrný [DC/-]: Použitý pro výplňové vrstvy.



3. Způsob přípravy svařových ploch:

Svařové plochy jsou strojově připraveny dle výkresové dokumentace č. EGS-K-17920

4. Způsob opracování (čištění) svařových ploch:

Svařové plochy a přilehlá oblast základního materiálu (min. do vzdálenosti 20 mm od okraje úkosu), je opracována (očistěna) od viditelných nečistot.

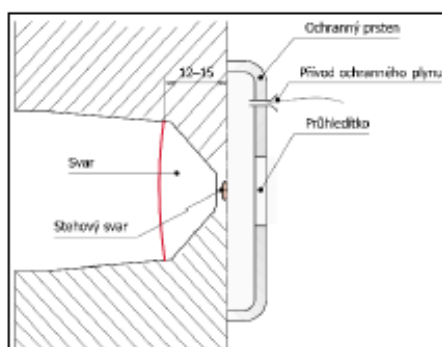
K čištění používáme ocelový kartáč, ocelový pilník, odmašťovací kapalinu. Všechny nástroje musí být vhodné pro práci s chrom-niklovým materiálem.

Výrobce: ČEZ ENERGOSERVIS, spol. s r.o.	Schválil: ČEZ a. s.
<i>Jméno, razítko, podpis, datum</i>	<i>Jméno, razítko, podpis, datum</i>

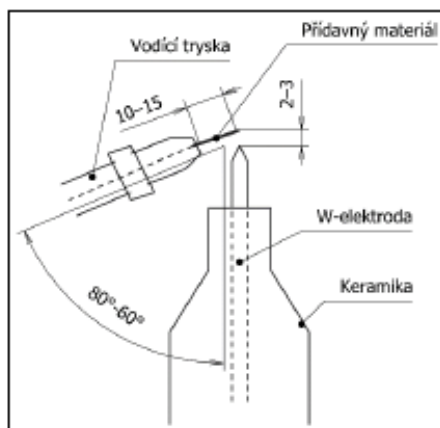
WPS
předběžná specifikace postupu svařování (dle ČSN EN 15609-1)
pWPS č.: 141-A-670x60-EWM
WPQR č.: --- (dle ČSN EN ISO 15614-1)

5. Ochranný prsten kořene svaru:

Jako ochranu kořenové vrstvy svaru používáme silikonový prsten, který obepneme okolo celého venkovního obvodu svařence. Ochranný prsten používáme do vyplnění cca 12-15mm svarového kovu, poté je možno prsten sejmout a pokračovat ve svařování bez ochranného prstene. K ochraně kořenové vrstvy používáme inertní plyn Argon 4,6 (Ar 99,996). Ochranný plyn přivádíme do ochranného prstenu ve dvou místech (naproti sobě). Průtok ochranného plynu je 7-11 l/min.



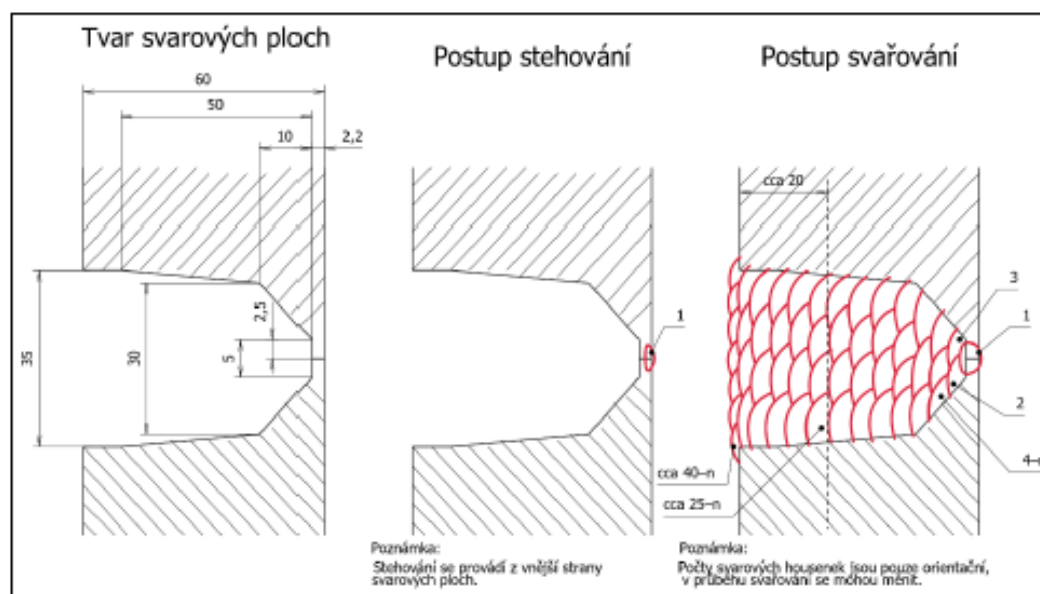
6. Seřízení hořáku a podavače přídavného materiálu.



<p>Výrobce: ČEZ ENERGOSERVIS, spol. s r.o.</p> <p style="text-align: center;"><i>Jméno, razítko, podpis, datum</i></p>	<p>Schválil: ČEZ a. s.</p> <p style="text-align: center;"><i>Jméno, razítko, podpis, datum</i></p>
--	--

WPS
předběžná specifikace postupu svařování (dle ČSN EN 15609-1)
pWPS č.: 141-A-670x60-EWM
WPQR č.: --- (dle ČSN EN ISO 15614-1)

7. Tvar svarových ploch, postup stehování a postup svařování.



8. Postup stehování:

Svarová vrstva	Metoda svařování	Ø přídavného Materiálu [mm]	Proud [A]	Napětí [A]	Druh proudu	Rychlost svařování [mm/s]	Ochrana kořene [l/min.]	Tepelný příkon [kJ/mm]
1	142	---	50-70	10-12	DC/-	---	---	---

Poznámka:

!!! při stehování nesmí dojít k protavení základního materiálu styčných ploch svařence (pérka), do vnitřní strany svarových ploch!!!

Délka stehů je cca 50mm, počet stehů min. 12 po obvodu svařence.

9.1. Parametry svaření 1. vrstvy svaru (kořen):

Metoda svařování	Ø přídavného materiálu [mm]	tp-čas trvání impulzu [ms]	tz- čas trvání základu imp. [ms]	Ip-proud impulzu [A]	Iz- proud základu [A]	Napětí základu impulzu [V]	Rychlost svařování [mm/min.]	Rychlost podávání přídavného materiálu [mm/min]	Tepelný příkon-Q [kJ/mm]
141	0,8	50	50	184 ± 20	75 ± 20	8,9 ± 0,5	---	2000 ± 200	---

Výrobce: ČEZ ENERGOSERVIS, spol. s r.o.

Schválil: ČEZ a. s.

Jméno, razítko, podpis, datum

Jméno, razítko, podpis, datum

WPS
předběžná specifikace postupu svařování (dle ČSN EN 15609-1)
pWPS č.: 141-A-670x60-EWM
WPQR č.: --- (dle ČSN EN ISO 15614-1)

9.2. Parametry svaření 2. a 3. vrstvy svaru:

Metoda svařování	Ø přidávaného materiálu [mm]	Proud [A]	Napětí [V]	Rychlost svařování [mm/min.]	Rychlost podávání přidávaného materiálu [mm/min]	Tepelný příkon-Q [kJ/mm]
141	0,8	195 ± 10	9,4 ± 0,5	---	3500 ± 200	---

9.3. Parametry svaření 4-n vrstvy svaru:

Metoda svařování	Ø přidávaného materiálu [mm]	Proud [A]	Napětí [V]	Rychlost svařování [mm/min.]	Rychlost podávání přidávaného materiálu [mm/min]	Tepelný příkon-Q [kJ/mm]
141	0,8	220 ± 10	8,4 ± 0,5	---	3300 ± 200	---

9.4. Parametry svaření 25-n vrstvy svaru:

Metoda svařování	Ø přidávaného materiálu [mm]	Proud [A]	Proud horkého drátu [A]	Napětí [V]	Rychlost svařování [mm/min.]	Rychlost podávání přidávaného materiálu [mm/min]	Tepelný příkon-Q [kJ/mm]
141	0,8	240 ± 10	75	11,4 ± 0,5	---	3500 ± 200	---

9.5. Parametry svaření 40-n vrstvy svaru:



Metoda svařování	Ø přidávaného materiálu [mm]	Proud [A]	Napětí [V]	Rychlost svařování [mm/min.]	Rychlost podávání přidávaného materiálu [mm/min]	Tepelný příkon- Q [kJ/mm]
141	0,8	184 ± 10	8,4 ± 0,5	---	2000 ± 200	---



10. Očištění hotového svaru:


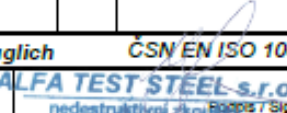
Hotový svar a přilehlou oblast (min. 20mm na každou stranu od okraje svaru), je nutné očistit od nečistot a vměstků vyplavených v průběhu svařování.

K čištění používáme ocelový kartáč, ocelový pilník, odmašťovací kapalinu. Všechny nástroje musí být vhodné pro práci s chrom-niklovým materiálem.

Výrobce: ČEZ ENERGOSERVIS, spol. s r.o.	Schválil: ČEZ a. s.
<i>Jméno, razítko, podpis, datum</i>	<i>Jméno, razítko, podpis, datum</i>

	Protokol o vizuální kontrole	Datum provedené kontroly: 1.4. 2022 Č.prot.: VT-EWM-1
Název zařízení: Horní kolektor PG	ČEZ ENERGOSERVIS spol.s r. o.	
Výrobní číslo: ---	Zakázkové číslo: ---	
Č. výkresů: EGS-K-17920	Rok výroby: 2022	Místnost: EDU-Heřmanice
Název kontroly a její parametry /specifikace / Vizuální kontrola		dle vyhl. 358 / 2016 ANO
Kontrola provedena dle: ČSN EN ISO 17637 Kritéria : NTD A.S.I.VII 2020 3.2.3 kat. SS I 100%		
<p style="text-align: center;">Výsledek kontroly (závady nezjištěny, nebo jednoznačná specifikace zjištěných závad):</p> <p>Dne 1.4. 2022 byla provedena vizuální kontrola svaru zkušebního vzorku Horního kolektoru PG.</p> <p>Intenzita osvětlení: 1050 lx</p> <p>Použité pomůcky: Luxmetr X3223 kal. do 3/2021 Lupa 3x, LED Lampa</p> <p style="text-align: center;">Závěr kontroly : VYHOVUJE</p> <p>Zkoušku provedl: David Sobotka</p> <p>Zkoušku vyhodnotil: David Sobotka</p>		
V Dukovanech dne: 2.4. 2022	Vystavil (razítko, podpis) <div style="text-align: right;">  </div>	

	PROTOKOL		Datum provedené kontroly: 1.4. 2022
	o provedení kapilární zkoušky		Č.prot.: PT-EWM-2
Název zařízení: Horní kolektor PG	Blok č. ---	materiál: Austenit	
	Poč. ks: 1		
	Zak.č.: --- Výrobní číslo: ---		
Odběratel: ---	Číslo výkresu: EGS-K-17920	Č. místnosti: EDU-Heřmanice	
Název kontroly a její parametry /specifikace / Kapilární zkouška			dle vyhl. 358/2016 ANO
Kontrola provedena dle: Požadavků: NTD A.S.I. VII 2020 3.2.5 kat.SS I 100%, ČSN EN ISO 3452 -1.			
Vyhodnoceno dle: ČSN EN ISO 23277 st. I 100%			
Zkušební zařízení :			
	<i>Typ</i>	<i>Výrobce</i>	<i>Identifikační č.</i>
Čistič	Metaflux 70-9801	Metaflux	39182X
Kontrastér	Metaflux 70-9802	Metaflux	43183X
Vývojka	Metaflux 70-9803	Metaflux	27195X
<p>Dne 1.4. 2022 byla provedená kapilární zkouška svaru zkušebního vzorku Horního kolektoru PG. Zkouška byla provedená penetrační metodou pomocí detekčních prostředků ve sprejích Metaflux.</p> <p>Výsledek zkoušky : kapilární zkouškou nebyly zjištěny žádné indikace kontrolovaného povrchu</p> <p>Závěr : VYHOVUJE.</p> <p>Zkoušku provedl : David Sobotka</p> <p>Zkoušku vyhodnotil : David Sobotka</p>			
V Dukovanech dne: 2.4.2022		Vystavil (razítko, podpis)	

 ALFA TEST STEEL		Protokol o radiografické zkoušce Radiographic Testing Report Durchstrahlungsprüfungprotokoll				Protokol č./ Report No./ Protokoll Nr. 0020/2022CEZ RT List 1/1			
Zákazník/ Customer/ Kunde ČEZ Energoserwis spol. s r.o.				Výrobek (model)/ Product (Pattern No. / Produkt (model) Vzorek					
Číslo výkresu/ Drawing No./ Zeichnung Nr. <i>viz. pozn.</i>		Material 08Ch18N10T			Rozměry/ Dimensions/ Maß -		Kusů/ Pieces/ Stück 1		
		Tavba/Melt No./Schmelze		Č. kusů/ Piece No. 1		Stav povrchu/ Surface preparing/ Oberflächenstand Welded joint			
Způsob svařování/ Welding way/ Schweißverfahren el.oblouk		Poznámka Remarks Bemerkung				Zakázka/Order			
Připustnost díle/ Acceptance tol/ Norm ČSN EN ISO 10675-1 st.1									
Objem zkoušek/ Extent of Testing/ Prüfungfang RT 100% svaru		Uspořádání/Schema of exp.							
Specifikace / Specification ČSN EN ISO 17636-1 tř.B									
Typ filmu / Filmmaterial C5 - T200		Měrka/ Gauge type 6FE EN		Počet filmů v kaz./ Films per cass. 1		1(2) stěny/1(2) walls exp./evaluat. 1 / 1			
Rozměry filmů / Film dimensions 30x40cm		Folie / Folies Pb 0.1/0.2		Jakost radiogr./ Quality class of pict B		Poloha měřky/ Gauge Position u zdroje/ source side			
Značka / Internal mark VZ CEZ		X-ray source - Apparatus Ir 192 - Gammamat TIF		Ohnisko/Focus 3x2mm	Napětí / Voltage kV	Proud/ Current 0,0mA	Aktivita/ Activity 2 900 GBq		
Č. svaru Weld No.	Svařec Weider	Exp. čas Exp. Time	SFD	Rozměry Dimmens.	D min.	Drátek Wire	Indikace / Indications	Comply Y / N	Poznámky / Remarks
VZ1	-	30m	750	vyřez	2,3	0	-	Y	
Rozhodnutí / Decision / Entschluss		Vyhovuje / Comply / Tauglich				ČSN EN ISO 10675-1 st.1			
Zkoušku provedl/ Test made Kostyál Pavel		Vyhodnotil Kostyál Pavel		 ALFA TEST STEEL s.r.o. nedestruktivní zkoušky třída Kpt. Jaroše 1922/3, Brno 602 00 IČ: 03920402 DIČ: CZ03920402				Datum vystavení 8.4.2022 Vystavil Kostyál Pavel	
Datum/Date 4.4.2022		Level II.							



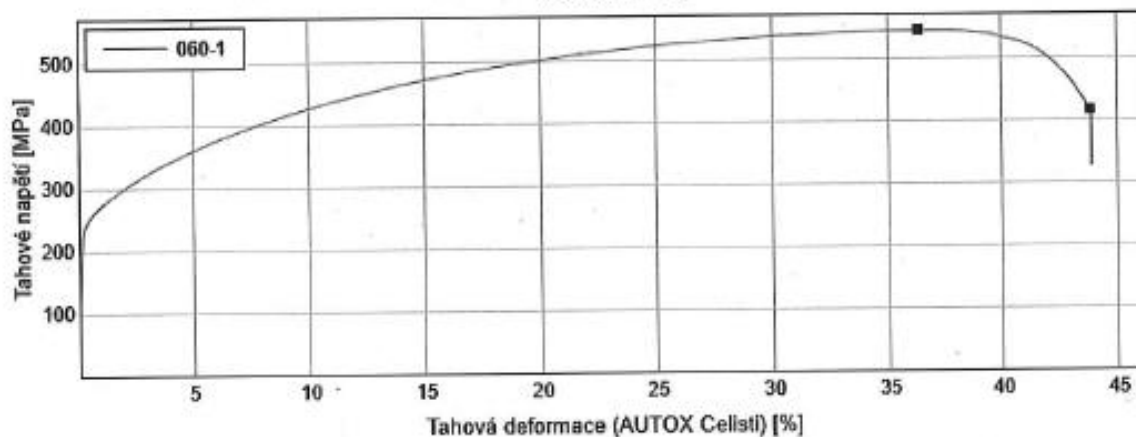
ČEZ, a.s.
Materiálová laboratoř

Protokol č.:

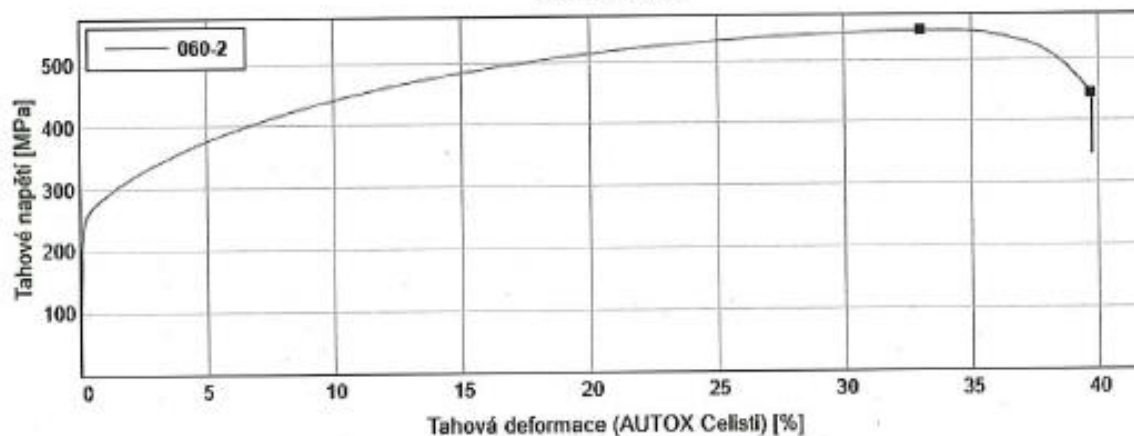
Prvotní záznam
Zkouška tahem LAB_LP_03

Datum posledního testu	úterý 12. dubna 2022
Název metody	C:\Users\Public\Documents\Instron\Bluehill Universal\Templates\Pravoúhlá2_tyč_svar_ČSN EN ISO 4136_fm_metal
Zkušební technik	Ing. Tomáš Kramář
Druh vzorku	Těleso pravoúhlého průřezu
Použito zařízení	INSTRON 5989 v. č. 5989B17650

Vzorek 1 až 1



Vzorek 2 až 2

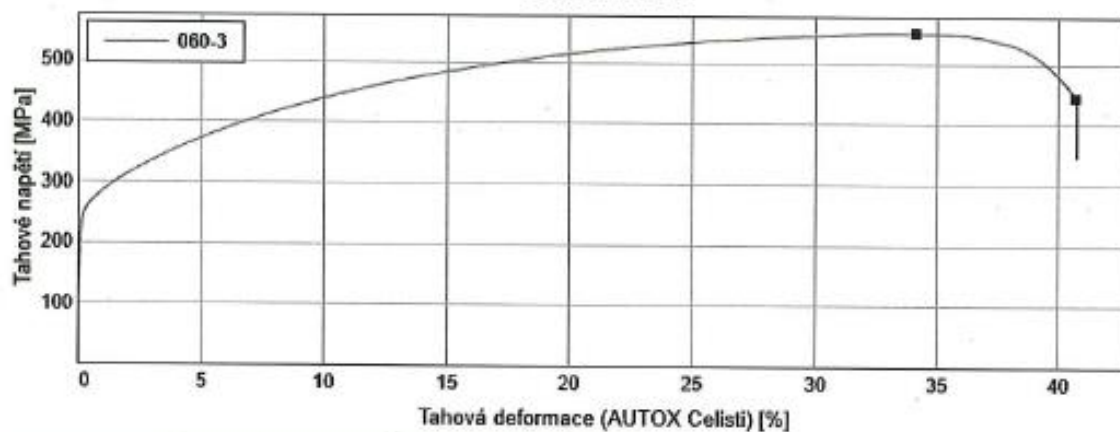




ČEZ, a.s.
Materiálová laboratoř

Protokol č.:

Vzorek 3 až 3



	Jmenovka vzorku	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Délka [mm]	Rm [MPa]	Místo porušení
1	060-1	30,02	24,85	157,00	545	základní materiál
2	060-2	30,13	24,87	157,00	547	základní materiál
3	060-3	29,98	24,98	157,00	551	základní materiál
Střední		30,04	24,90	157,00	548	-----

Teplota:°C

Podpis:



PROTOKOL O ZKOUŠCE č.: 22060
REVIZE 0



Zkouška tahem

Informace o zkušebních podmínkách: $R_m = 4$; e_{Lc}
Odchytky od standardního postupu, které mohly ovlivnit zkoušku: ---
Popis zkušebního tělesa: Obrobené zkušební těleso pravoúhelného průřezu dle ISO 4136 – zkouška s více tyčemi (1 svar - 3 tyče)
Poloha / směr odběru: --- / ---

Naměřené mechanické hodnoty

Označení zkušebního vzorku	Rozměry zkušebního vzorku				Mechanické vlastnosti materiálu			
	Zkoušená délka	Počáteční průřezová plocha	Před přetržením	Teplota zkoušení	Smluvní mez kluzu	Smluvní mez kluzu	Mez pevnost v tahu	Místo porušení
	L_c	S_0	L_0	---	$R_{p0,2}$	$R_{p1,0}$	R_m	---
	[mm]	[mm ²]	[mm]	[°C]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	---
060-1	157	746	---	23	---	---	545	základní materiál
060-2	157	749	---	23	---	---	547	základní materiál
060-3	157	749	---	23	---	---	551	základní materiál
nejistota $U \pm$ [relat. %]	---				---	---	1,42	---
Poznámka	---							

Uvedená rozšířená nejistota měření, je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu k , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu rozšíření $k = 2$.

**Není předmětem akreditace.

Použité rozhodovací pravidlo: ---

Výrok o shodě: ---

Ing. Tomáš Kramár, PhD., IWE
Zkušební technik



ČEZ, a.s.
Materiálová laboratoř

Prvotní záznam

Zkouška rázem v ohybu ČSN EN ISO 148-1, ČSN EN ISO 9016, LAB_LP_02

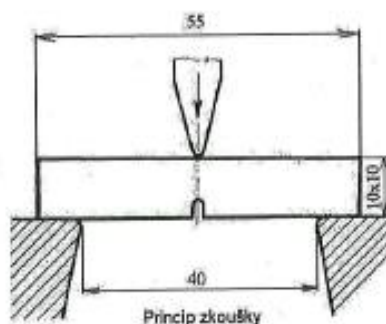
Protokol č.: 22060

Datum: 12. 4. 2022

Tester: Kramár Tomáš, Ducháček Petr

Program: Fracta

Použito zařízení: Charpyho kladio INSTRON 450 J, v. č. 450MP2B17877



Číslo vzorků	Značení*	Stav vzorku po zkoušce	Energie [J]	Pružnost [J/cm ²]	W x B x L	LE [mm]	SFA [%]	Teplota zkoušky [°C]
060-2.1	VWT 0/2	Z	189		10 x 10 x 55	/	/	23
060-4.2	pod povrchním	Z	188		10 x 10 x 55	/	/	23
060-6.3		Č	186		10 x 10 x 55	/	/	23
060-2.4	VWT 0/2		152		10 x 10 x 65	/	/	23
060-4.5	koreňová		145		10 x 10 x 55	/	/	23
060-6.6	strana		140		10 x 10 x 55	/	/	23

* VWT a/b, UWT a/b, VHS a/b, UHS a/b

Z = zkušební tyč zcela přeražena

Č = zkušební tyč částečně přeražena a prošlo skrze podpěry

Teplota: 23 °C

Podpis: Thomáš...



PROTOKOL O ZKOUŠCE č.: 22060
REVIZE 0



Zkouška rázem v ohybu

Popis zkušební vzorku: 10 x 10 x 55 mm
Odchytky od standardního postupu, které mohly ovlivnit zkoušku: ---
Poloha vrubu / směr odběru zkušební tyče: vrub kolmý k povrchu svaru (VWT), vrub je umístění v ose svaru a zkušební těleso je umístěné 2 mm pod povrchem

Naměřené mechanické hodnoty

Označení zkušební vzorku	Teplota zkoušek	Značení	Stav vzorku po zkoušce	Plocha	Rozměry	Nárazová práce
	---	---	---	S₀	W x B x L	KV₂
	[°C]	---	---	[cm ²]	[mm]	[J]
060-2.1	23	VWT 0 / 2 pod povrchem	Z	0,8	10 x 10 x 55	184
060-4.2	23		Z	0,8	10 x 10 x 55	188
060-6.3	23		Č	0,8	10 x 10 x 55	186
∅			---			186
nejistota $U \pm 4,68$ [relat. %]			---			9
060-2.4	23	VWT 0 / 2 z kořenové strany	---	0,8	10 x 10 x 55	157
060-4.5	23		---	0,8	10 x 10 x 55	195
060-6.6	23		---	0,8	10 x 10 x 55	190
∅			---			181
nejistota $U \pm 4,68$ [relat. %]			---			8
Poznámka				---		

Uvedená rozšířená nejistota měření, je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu k, který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu rozšíření $k = 2$.

**Není předmětem akreditace.

Z = zkušební tyč zcela přeražena

Č = zkušební tyč částečně přeražena a prošlo skrze podpěry

Použité rozhodovací pravidlo: ---
Výrok o shodě: ---

Ing. Tomáš Kramár, PhD., IWE
Zkušební technik



ČEZ, a.s.
Materiálová laboratoř

Prvotní záznam

**Zkouška rázem v ohybu ČSN EN ISO 148-1, ČSN
EN ISO 9016, LAB_LP_02**

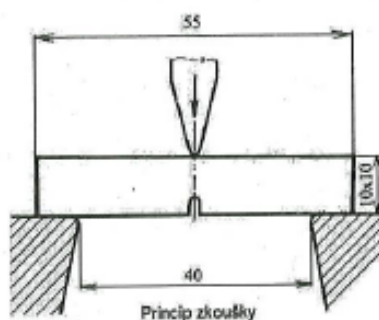
Protokol č.: 22060

Datum: 12. 4. 2022

Tester: Kramár Tomáš, Ducháček Petr

Program: Fracta

Použito zařízení: Charpyho kladivo INSTRON 450 J, v. č. 450MP2B17877



Číslo vzorků	Značení*	Stav vzorku po zkoušce	Energie [J]	Pružnost [J/cm ²]	W x B x L	LE [mm]	SFA [%]	Teplota zkoušky [°C]
060-1.7	VHT 1,5/2 pod povrchem	Z	131		10x10x55	/	/	23
060-3.8		Z	126		10x10x55	/	/	23
060-5.9		C	125		10x10x55	/	/	23
060-1.10	VHT 1,5/2 koreňová strana	C	145		10x10x55	/	/	23
060-3.11		C	132		10x10x55	/	/	23
060-5.11		C	135		10x10x55	/	/	23

* VWT a/b, UWT a/b, VHS a/b, UHS a/b

Z = zkušební tyč zcela přeražena

C = zkušební tyč částečně přeražena a prošlo skrze podpěry

Teplota: 23 °C

Podpis: [Signature]



PROTOKOL O ZKOUŠCE č.: 22060
REVIZE 0



MECHANICKÉ ZKOUŠKY
Zkouška rázem v ohybu

Popis zkušební vzorku: 10 x 10 x 55 mm
Odchytky od standardního postupu, které mohly ovlivnit zkoušku: ---
Poloha vrubu / směr odběru zkušební tyče: vrub kolmý k povrchu svaru (VHT), vrub je umístěn 1,5 mm od hrany natavení a zkušební těleso je umístěné 2 mm pod povrchem

Naměřené mechanické hodnoty

Označení zkušební vzorku	Teplota zkoušek	Značení	Stav vzorku po zkoušce	Plocha	Rozměry	Nárazová práce
	---	---	---	S ₀	W x B x L	KV ₂
	[°C]	---	---	[cm ²]	[mm]	[J]
060-1.7	23	VHT 1,5 / 2 pod povrchem	Z	0,8	10 x10 x 55	131
060-3.8	23		Z	0,8	10 x10 x 55	126
060-5.9	23		Č	0,8	10 x10 x 55	129
∅			---			129
nejistota U ± 4,68 [relat. %]			---			6
060-1.10	23	VHT 1,5 / 2 z kořenové strany	Č	0,8	10 x10 x 55	175
060-3.11	23		Č	0,8	10 x10 x 55	192
060-5.12	23		Č	0,8	10 x10 x 55	185
∅			---			184
nejistota U ± 4,68 [relat. %]			---			9
Poznámka				---		

Uvedená rozšířená nejistota měření, je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu k, který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu rozšíření k = 2.

**Není předmětem akreditace.

Z = zkušební tyč zcela přeražena

Č = zkušební tyč částečně přeražena a prošlo skrze podpěry

Použité rozhodovací pravidlo: ---

Výrok o shodě: ---



PROTOKOL O ZKOUŠCE č.: 22060
REVIZE 0



METALOGRAFICKÉ ZKOUŠKY
Kontrola svarů

Typ spojů: tupý spoj na trubce
Metoda svařování dle **ČSN EN ISO 4063: ---
Hodnocení dle / přípustnost: svarový spoj nebil hodnocený byla zhotovená jenom fotodokumentace / ---
Použita kontrolní zařízení: # AB 710001

č.	Název vady	Pořadové číslo podle **ČSN EN ISO 6520-1	Označení zkušební vzorku --- Obr. č. ---		Označení zkušební vzorku --- Obr. č. ---	
			Hodnoty			
			Maximální	Naměřena	Maximální	Naměřena
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	POVRCHOVÉ VADY					
Bez hodnocení.						

**Není předmětem akreditace.

č.	Název vady	Pořadové číslo podle **ČSN EN ISO 6520-1	Označení zkušební vzorku --- Obr. č. ---		Označení zkušební vzorku --- Obr. č. ---	
			Hodnoty			
			Maximální	Naměřena	Maximální	Naměřena
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
2	VNITŘNÍ VADY					
Bez hodnocení.						

**Není předmětem akreditace.

č.	Název vady	Pořadové číslo podle **ČSN EN ISO 6520-1	Označení zkušební vzorku --- Obr. č. ---		Označení zkušební vzorku --- Obr. č. ---	
			Hodnoty			
			Maximální	Naměřena	Maximální	Naměřena
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
3	VADY V GEOMETRII SPOJE					
Bez hodnocení.						

Nejistota U při $20 \times \pm 131 \mu\text{m}$, $100 \times \pm 25 \mu\text{m}$,

Uvedená rozšířená nejistota měření, je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu k , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu rozšíření $k = 2$.

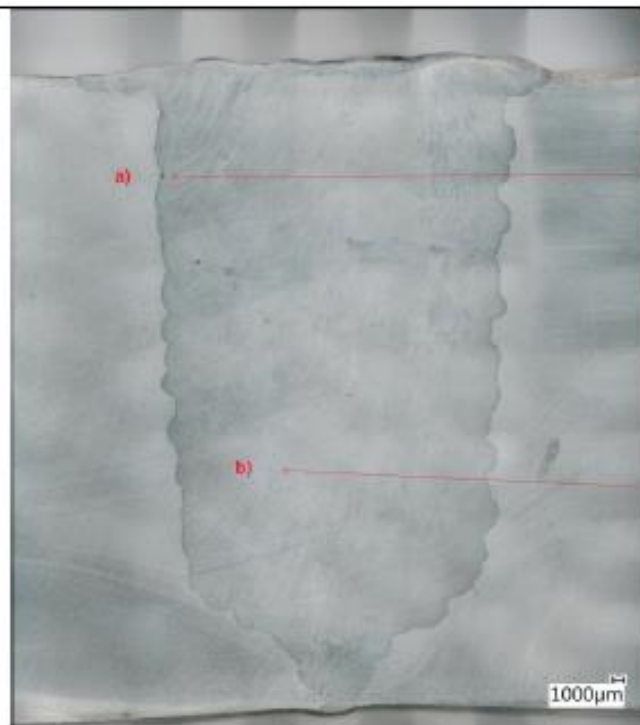
**Není předmětem akreditace.



PROTOKOL O ZKOUŠCE č.: 22060
REVIZE 0



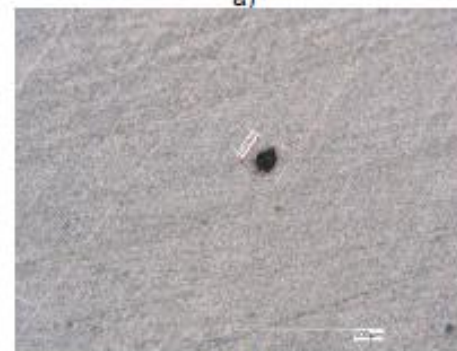
Označení – ČSN EN ISO 17639 - A - E - - 1.5451 / 1.4541 / SV04 / Adler



Obr. 1 - vzorek č. 22060 – leptáno_20x



a)



b)

Obr. 2 a), b) - vzorek č. 22060 – leptáno_100x

Uvedená rozšířená nejistota měření, je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu k , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu rozšíření $k = 2$.

**Není předmětem akreditace.

Použité rozhodovací pravidlo: ---

Výrok o shodě: ---

Ing. Tomáš Kramár, PhD., IWE
Zkušební technik

--- Konec protokolu ---