

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

# **Řešení problematiky heterogenních spojů na jaderných elektrárnách**

## **Solution of the Problems of Heterogeneous Welds to Nuclear Power Plants**

Student:	Bc. Michael Neuman
Osobní číslo:	NEU0075
Vedoucí diplomové práce:	prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.

Ostrava 2020

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michael Neuman**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie

Téma: **Řešení problematiky heterogenních spojů na jaderných elektrárnách**  
**Solution of the Problems of Heterogeneous Welds to Nuclear Power Plants**

Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

1. Provést posouzení současného stavu používaných heterogenních svarových spojů na jaderných elektrárnách.
2. Provést studium svažitelnosti uhlíkových a austenitických ocelí.
3. Návrh postupu svařování heterogenních svarových spojů.
4. Provést vyhodnocení heterogenních svarových spojů.
5. Zhodnocení dosažených výsledků vlastností svarových spojů.

### Seznam doporučené odborné literatury:

KOUKAL, J., SCHWARZ, D., HAJDÍK, J. *Materiály a jejich svažitelnost*. (Učební texty pro kurzy IWE/IWT). Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009, 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.

HLAVATÝ, I. *Teorie a technologie svařování*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009, poslední revize 20. 10. 2014. Dostupné z: < <http://staryweb.ivohlavaty.cz/> >.

HRIVŇÁK, I. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. Bratislava: Veda, 2009, 486 s. ISBN 97-880-2273-167-6.

PTÁČEK, L. A KOL. *Nauka o materiálu I.* Praha: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2001, 505 s. ISBN 80-7204-193-2.


PTÁČEK, L. A KOL. *Nauka o materiálu II.* Praha: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001, 350 s. ISBN 80-7204-130-4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020

  
Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020.



.....

Podpis studenta

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020.



.....  
Podpis studenta

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

NEUMAN, M. Řešení problematiky heterogenních spojů na jaderných elektrárnách: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2020, 74 s, Vedoucí práce: Hlavatý, I.

Diplomová práce se zabývá studiem heterogenních svarových spojů uhlíkových a korozivzdorných austenitických ocelí používaných v jaderném průmyslu. Práce obsahuje teoretický popis problematiky svařování heterogenních svarových spojů, svařitelnosti uhlíkových a vysokolegovaných ocelí a posuzuje současný stav používaných heterogenních svarových spojů v energetice.

V experimentální části byl navržen postup svařování heterogenních a homogenních spojů potrubí z uhlíkové a korozivzdorné austenitické oceli. Vzorky byly zhotoveny a hodnoceny na základě metalografické analýzy a zkoušce mikrotvrdomosti dle Vickerse. Cílem práce bylo rozšíření dosavadních znalostí o těchto heterogenních svarových spojkách z hlediska svařitelnosti, životnosti a bezpečnosti jejich provozování na jaderných elektrárnách.

## **ANNOTATION OF MASTER THESIS**

NEUMAN, M. Solution of the Problems of Heterogeneous Welds to Nuclear Power Plants: Master Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2020, 74 p, Thesis head: Hlavatý, I.

The diploma thesis deals with the study of heterogeneous welded joints of carbon and stainless austenitic steels used in the nuclear industry. The work contains a theoretical description of the problem of welding heterogeneous welded joints, weldability of carbon and high-alloy steels and assesses the current state of heterogeneous welded joints used in power engineering.

In the experimental part was proposed a procedure for welding heterogeneous and homogeneous joints of carbon and stainless austenitic steel pipes. The samples were made and evaluated on the basis of metallographic analysis and Vickers microhardness test. The aim of the work was to expand the existing knowledge about these heterogeneous welded joints in terms of weldability, service life and safety of their operation at nuclear power plants.

# OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ.....	8
ÚVOD.....	9
1 HETEROGENNÍ SVAROVÉ SPOJE.....	10
1.1 Rozdělení svarových spojů .....	11
1.2 Použití Schaefflerova diagramu .....	11
1.3 Heterogenní spoje z pohledu chemického složení a struktury .....	12
1.4 Problematika svařování austenitických ocelí s feritickými ocelmi .....	13
1.4.1 Svarové spoje pracující do provozní teploty 350 °C .....	14
1.4.2 Svarové spoje pracující nad provozní teploty 350 °C .....	15
2 SOUČASNÝ STAV POUŽÍVANÝCH HETEROGENNÍCH SPOJŮ NA JADERNÝCH ELEKTRÁRNÁCH .....	17
2.1 Heterogenní svarové spoje v jaderné energetice v ČR.....	17
2.2 Problematika heterogenních svarových spojů.....	17
2.3 Používané heterogenní svarové spoje v zahraničí na JE.....	20
3 SVAŘITELNOST MATERIÁLŮ .....	21
3.1 Uhlíkový ekvivalent .....	21
3.2 Teplota přehřevu.....	22
3.3 Struktura svarového spoje .....	22
4 SVAŘITELNOST UHLÍKOVÝCH OCELÍ .....	23
5 SVAŘITELNOST VYSOKOLEGOVANÝCH OCELÍ .....	26
5.1 Svařitelnost austenitických Cr – Ni ocelí.....	26
5.2 Struktura vysokolegovaných ocelí .....	28
6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE .....	30
6.1 Popis zkušebních vzorků.....	30
6.2 Příprava vzorků k metalografické analýze.....	37
7 METALOGRAFICKÁ ANALÝZA SVAROVÝCH SPOJŮ .....	40
7.1 Základní materiál č. 1 – uhlíková ocel P265GH .....	40
7.2 Základní materiál č. 2 – austenitická ocel 1.4541 .....	41
7.3 Vzorek A – homogenní svarový spoj, austenitická ocel 1.4541 a přídatný materiál Inertrod 316LSi .....	42
7.4 Vzorek B – heterogenní svarový spoj, austenitická ocel 1.4541 a uhlíková ocel P265GH, přídatný materiál Sv-07Ch25N13 .....	46
7.5 Vzorek C – heterogenní svarový spoj, austenitická ocel 1.4541 a uhlíková ocel P265GH, přídatný materiál Sv-07Ch25N13 .....	53

7.6	Vzorek D – homogenní svarový spoj, uhlíková ocel P265GH a přídavný materiál Carborod 1.....	58
8	ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI.....	62
9	ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....	66
	ZÁVĚR.....	70
	POUŽITÁ LITERATURA.....	72

## SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

Označení	Legenda	Jednotka
A <sub>5</sub>	Tažnost	[%]
ARA	Diagram anizotropického rozpadu austenitu	
BW	Značka pro tupý svar	
BWR	Varný reaktor (Boiling Water Reactor)	
C <sub>E</sub>	Uhlíkový ekvivalent	[%]
Cr <sub>E</sub>	Chromový ekvivalent	[%]
FP	Ferit + perlit	
HSS	Heterogenní svarový spoj	
HV	Tvrdost podle Vickerse	
HV(0,1)	Mikrotvrdost podle Vickerse	
JE	Jaderná elektrárna	
MKK	Mezikrystalová koroze	
Ni <sub>E</sub>	Niklový ekvivalent	[%]
NTD A.S.I.	Normativně technická dokumentace, asociace strojních inženýrů	
PH	Poloha svařování trubky zdola nahoru	
Re	Mez kluzu	[MPa]
Rm	Mez pevnosti	[MPa]
R <sub>p0,2</sub>	Mez pružnosti s maximální povolenou deformací 0,2 %	[MPa]
SK	Svarový kov	
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost	
TIG	Metoda svařování netavící se wolframovou elektrodou	
TOO	Tepelně ovlivněná oblast svarového spoje	
T <sub>p</sub>	Teplota předehřevu	[°C]
VVER	Vodo – vodní energetický reaktor	
WPS	Specifikace postupu svařování	
ZM	Základní materiál	
α	Ferit	
γ	Austenit	
δ	Tuhý roztok uhlíku v železe delta – delta ferit	
σ	Fáze tvořená železem a chromem	



# ÚVOD

Jaderný průmysl se v posledních několika desetiletích stal velmi významnou součástí našeho života. Nejvíce elektrické energie se v České republice vyrábí v tepelných elektrárnách a hned po nich následují elektrárny jaderné. V důsledku hrozby nebezpečí, kterým je např. únik radioaktivního materiálu, nebo ozáření, patří k nejvíce prověřovanému a kontrolovanému průmyslu. Kontroly jsou prováděny Státním úřadem pro jadernou bezpečnost (SÚJB), který klade vysoké požadavky na nejrizikovější místa, ke kterým patří i svarové spoje. [26, 27]

Heterogenní svarové spoje se nacházejí, z pohledu bezpečnosti, na kritických místech komponent jaderných elektráren (např. na hrdlech reaktoru, parogenerátoru, kompenzátoru objemu atd.). Parogenerátor je vyráběn z nízkolegované oceli, v němž jsou umístěny dílce a potrubí z korozivzdorné oceli. Heterogenní svarové spoje jsou tedy nezbytnou součástí energetických zařízení, protože umožňují spojení různých typů ocelí. Mezi obvykle používané heterogenní svary patří spoje uhlíkových, nízkolegovaných ocelí, které mají strukturu feritickou nebo perlitickou s vysokolegovanými ocelemi, které mají strukturu austenitickou. Jedná se o svařování materiálů, které mají odlišné struktury a vzniká tak svarový spoj s rozdílnými chemickými, mechanickými a fyzikálními vlastnostmi. [5, 7, 28]

Difúzní procesy, které probíhají rozdílně kvůli chemickému složení svařovaných ocelí a svarového kovu (tedy především redistribuce uhlíku, legujících prvků a dusíku), způsobují snížení strukturní stability svarového spoje. Pro snížení těchto difúzních procesů se používá tzv. metoda „polštářování“. V principu jde o navaření protidifúzní bariéry – mezivrstvy s vysokým obsahem niklu na straně základního materiálu, kde by vznikala oblast nauhličení. Většinou se však používá přídavný materiál pro vznik tzv. přechodového svarového kovu s vysokým obsahem niklu, kterým se svaří oba materiály. [5, 7]

Vlivem změn struktury dochází ke změně mechanických vlastností. Tyto změny mohou negativně ovlivnit životnost svarového spoje nebo způsobit jeho porušení, případně mohou mít vliv na náchylnost ke koroznímu praskání pod napětím. Požadavkem je, aby svarový spoj měl hodnoty mechanických vlastností na úrovni méně legované oceli. [1, 8]

Teoretická část diplomové práce je zaměřena na problematiku svařování heterogenních spojů, posuzuje současný stav používaných heterogenních spojů na jaderných elektrárnách a zabývá se studiem svařitelnosti uhlíkových a vysokolegovaných ocelí.

V experimentální části byl navržen postup svařování heterogenních a homogenních spojů potrubí z nízkouhlíkové a korozivzdorné austenitické oceli. Vzorky byly zhotoveny a na základě mikrostruktury, makrostruktury a zkoušce mikrotvrdosti byly porovnány z hlediska svařitelnosti.

# 1 HETEROGENNÍ SVAROVÉ SPOJE

Konvenční a jaderné elektrárny jsou složitými systémy, ve kterých se používají různé druhy materiálů. Během výstavby nových a údržby stávajících zařízení se musí počítat se svařováním různých typů ocelí. Takovéto svarové spoje se nazývají heterogenní a od homogenních svarových spojů se odlišují rozdílným chemickým složením. Při svařování heterogenních materiálů se musí brát v úvahu hodně faktorů jako jsou fyzikální vlastnosti (např. teplota tavení, teplotní roztažnost, tepelná vodivost) a mechanické vlastnosti. Při svařování takových spojů je důležité vhodně vybrat složení přídatného materiálu, technologii a metodu svařování, případně tepelné zpracování. [1, 2]

Svařování různorodých ocelí odlišného chemického složení a rozdílných strukturních bází (např. austenit/ferit, austenit/perlit) má vždy negativní vliv na jeden nebo oba svařované materiály. V přechodu materiálů do svarového kovu vzniká oblast roztaveného kovu, která má rozdílné chemické složení a tím i degradované mechanické a fyzikální vlastnosti. Při vlastním svařování, dlouhodobé expozici za vyšších teplot nebo při tepelném zpracování dochází k difúzi intersticiálních atomů z méně legované oceli do vícelegované oceli, přes hranici ztavení. Jedná se zejména o difúzi uhlíku, což má za následek tvorbu nauhličeného pásma na straně více legované oceli a oduhličené zóny v méně legované oceli. Tyto procesy vedou ke snížení spolehlivosti, životnosti a bezpečnosti svarových spojů. [2, 3]

V nauhličených oblastech klesá plasticita a v oduhličených oblastech se výrazně snižují pevnostní vlastnosti. Vzhledem k rozdílným koeficientům lineární roztažnosti dochází ke komplexní napjatosti a rozdílné elektrochemické potenciály mohou způsobit galvanickou korozi. Difúze uhlíku při provozu za zvýšených teplot nebo při tepelném zpracování zvyšuje náchylnost k mezikrystalové korozi. Pokud se původní struktura svarového kovu změní na tolik, že není schopna přenášet namáhání, pro který byla určena, tak zcela vyčerpala svoji životnost a může dojít k porušení. [4, 8]

Existují dvě možnosti, jak zvýšit strukturní stabilitu a zabránit přerozdělování uhlíku (i dalších intersticiálních prvků). První možností je úprava chemického složení a za druhé je to použití difúzní bariéry, která zabrání migraci uhlíku ze základního materiálu do svarového kovu nebo obráceně. První cesta je založená na vhodné volbě kombinace základního materiálu a svarového kovu. Nejlépe se toho docílí legováním oceli s vyšší aktivitou uhlíku takovými prvky, které vytvoří stabilnější karbidy než na opačné straně rozhraní. Tato metoda se používá nejčastěji u svarových spojů ferit/ferit. Druhá možnost spočívá v tom, že se mezi základní materiál a svarový kov vloží další kov, nebo slitina s omezenou rozpustností uhlíku. Tato vložená vrstva slitiny funguje jako bariéra proti migraci uhlíku. Antidifúzní bariéry se volí hlavně u svarových spojů typu ferit/austenit. [5]

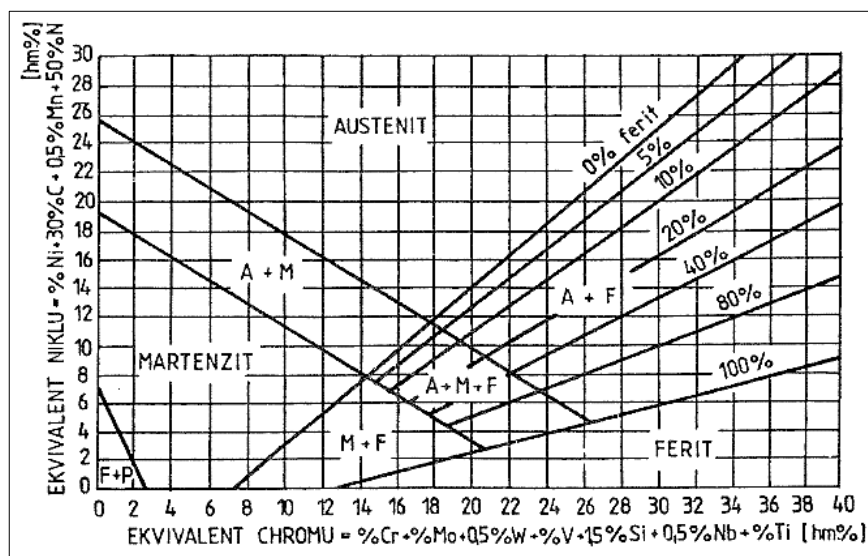
## 1.1 Rozdělení svarových spojů

Homogenní a heterogenní svarové spoje lze rozdělit podle výchozí strukturní báze svařovaných ocelí [5]:

1. **Spoje typu austenit/austenit** – tyto svary se nejvíce přibližují představě homogenních tuhých roztoků.
2. **Spoje typu austenit/ferit** – mají složité dvoufázové struktury. Jsou to heterogenní svarové spoje uhlíkových a nízkolegovaných ocelí s vysokolegovanými oceli; tyto spoje nachází uplatnění v energetickém průmyslu, např. při spojování nerezových potrubí s tlakovou nádobou atomového reaktoru.
3. **Spoje typu ferit/ferit** – zastupují největší část homogenních spojů v energetice, jsou to např. svarové spoje žáruvzdorných ocelí.
4. **Další typy spojů** – jedná se o speciální spoje, kde se využívá metody „polštářování“. Navařovaný materiál je většinou na bázi neželezných kovů (nejčastěji niklu).

## 1.2 Použití Schaefflerova diagramu

Strukturní fáze, které vznikají v oceli po rychlém ochlazení z rozpouštěcí teploty (1050 °C) na teplotu 20 °C jsou ovlivněny především chemickým složením. Tyto strukturní stavy lze zjistit ze Schaefflerova diagramu uvedeného na obrázku č. 1. Po vypočítání chromového a niklového ekvivalentu lze s dostatečnou přesností určit, jaká struktura vznikne v přechodech mezi základními materiály a svarovým kovem. Nežádoucí strukturou ve svarovém spoji je martenzit, který je velmi křehký a může být iniciátorem trhlin za studena, vzniká ve všech případech v přechodu mezi feritickou ocelí a austenitickým svarovým kovem. Pokud může vzniknout martenzit s vyšším obsahem uhlíku, tak se doporučuje předehřev do oblasti prvního stadia rozpadu martenzitu. [6, 7]

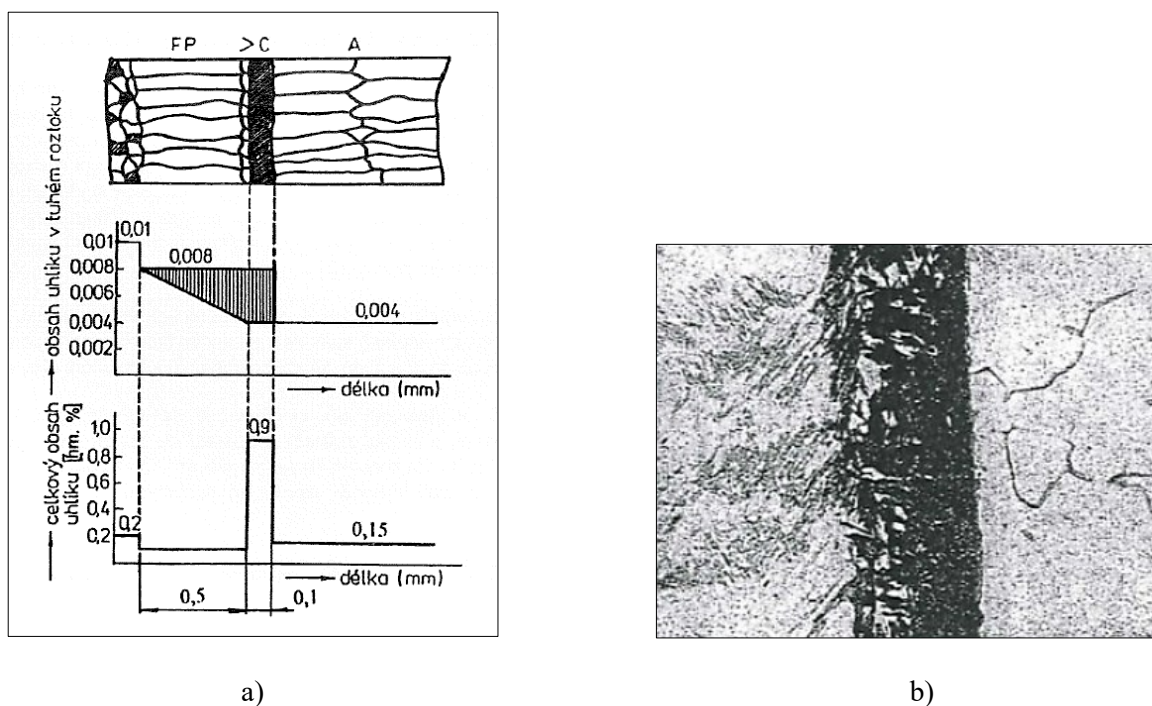


Obrázek 1 – Schaefflerův diagram strukturních stavů [6]

### 1.3 Heterogenní spoje z pohledu chemického složení a struktury

Chemické složení svarového kovu při svařování heterogenních materiálů závisí na chemickém složení základních materiálů, složení přídavného materiálu a na procentu promísení svarového kovu. Při svařování různorodých materiálů je důležité brát v úvahu rozdílné součinitele teplotní roztažnosti a rozdílné chemické složení. Pokud svařované oceli mají výrazně odlišné součinitele teplotní roztažnosti je velmi pravděpodobné, že při cyklickém teplotním namáhání dojde k porušení svaru. K degradaci svarového spoje dochází většinou mezi nauhličenou a oduhličenou oblastí. [1, 6]

Rozbor svarového spoje, který byl vystaven dlouhodobému namáhání za teploty 550 °C je znázorněn na obrázku č. 2a. V určitém pásmu probíhá přerozdělení uhlíku z oceli, která ho obsahuje více do oceli chudší na obsah uhlíku. V praxi nejčastěji dochází k redistribuci uhlíku ve svarových spojích uhlíkových ocelí s vysokolegovanými austenitickými oceli. Z obrázku č. 2b lze vidět, že chemické složení materiálů má značný význam na rychlost difuze. [6, 8]

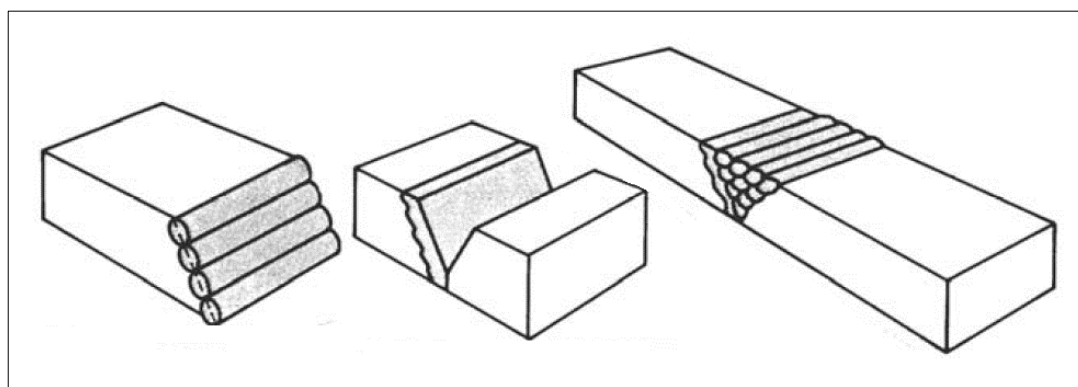


Obrázek 2a (nalevo) – Rozbor svaru dlouhodobě zatíženého teplotou 550 °C; Obrázek 2b (napravo) – Redistribuce uhlíku ve svaru, 1000× zvětšení [6, 8]

Oduhličené a nauhličené pásmo v oblasti kolem hranice ztavení lze zjistit metalograficky a šířka pásma je dána podmínkami a postupem svařování. Difuze uhlíku v austenitických ocelích často způsobuje vznik mezivrstvy martenzitu a svarový spoj v oblasti kolem hranice ztavení výrazně zkřehne. Aby strukturní stálost spoje byla co nejvyšší, je důležité volit přídavné materiály a technologii svařování tak, aby oduhličená a nauhličená pásma nevznikala, nebo vznikala co nejméně. [8, 9]

## 1.4 Problematika svařování austenitických ocelí s feritickými ocelmi

Při svařování heterogenních materiálů je dobré znát jejich různé teploty tavení. Více legovaná (především austenitická) ocel má nižší teplotu tavení než ocel méně legovaná. Další odlišností je širší interval tuhnutí (likvidus – solidus), které mají austenitické oceli. Značné rozdíly v teplotě tavení jsou nežádoucí a mohou způsobit degradační projevy na straně oceli s nižší teplotou tavení. Smrštění svaru na straně méně legované oceli vyvolává působení teplotních napětí na straně austenitické oceli. Tomuto problému lze předcházet nanesením jedné nebo více housenek na méně legovanou ocel. Tato metoda je známá jako „polštářování“ nebo „navarování hrany“ (resp. plochy) a je uvedena na obrázku č. 3. Postup navarování je výhodný v tom, že tvoří tzv. difuzní bariéru proti nežádoucí migraci uhlíku. [1, 8]



Obrázek 3 – Postup svařování feritické oceli s austenitickou ocelí [1]

Svarový spoj musí splňovat požadavky konstruktéra, který jej navrhoval. Výběr vhodného typu přídatného materiálu závisí na mnoha faktorech, především musí mít potřebné mechanické, fyzikální a korozní vlastnosti. Pokud je rozdíl v teplotě tavení obou svařovaných materiálů příliš velký, volí se přídatný materiál podle teploty tavení níže tavitelného ZM. Přídatný materiál musí mít také dostatečnou tažnost, aby se překonali rozdíly v tepelné roztažnosti základních materiálů. Značný vliv má také obsah intersticiálních prvků (uhlíku, kyslíku, dusíku a vodíku), přídatný materiál by jich měl mít co nejméně. [8]

Platí všeobecné pravidlo, že pevnost a korozní odolnost svarového kovu se musí nejméně rovnat vlastnostem horšímu ze svařovaných materiálů a svar musí být odolný vůči trhlinám. K tomu je výhodné používat austenitický přídatný materiál s obsahem 5 – 10 % feritu, nebo používat přídatný materiál na bázi niklu. Pokud se svařují dva rozdílné austenitické materiály, potom legování svarového kovu musí být podobné k více legované oceli, ale se zachováním určitého podílu feritu, vzhledem k vysokoteplotním a korozním vlastnostem. [1]

### 1.4.1 Svarové spoje pracující do provozní teploty 350 °C

Pro svařování austenitických ocelí s feritickými se používá polštářování na feritické oceli nízkouhlíkovým svarovým kovem. Po navaření vrstvy se materiály svařují elektrodami z austenitického svarového kovu, který je svým chemickým složením nejvíce podobný základnímu austenitickému materiálu. Je doporučeno svařovat nejméně dvěma vrstvami, protože druhá vrstva má funkci žíhací vrstvy a snižuje náchylnost na vznik trhlin v tepelně ovlivněné oblasti feritické oceli. U svarových spojů pracujících za provozní teploty do 350 °C, nevznikají tak výrazně teplem aktivované děje související s migrací uhlíku. Z tohoto hlediska je možné austenitické oceli s feritickými svařovat všemi způsoby, které eliminují náchylnost na vznik studených trhlin (tj. trhlin indukovaných vodíkem). Pak je důležité svařovat elektrodami s bazickým obalem kvůli jejich nízkému obsahu difuzního vodíku a proto, že zaručují malé nalegování svarového kovu základní feritickou ocelí. [7]

Svarové spoje pracující do teploty 350 °C je doporučeno svařovat austenitickými elektrodami, které tvoří plastický kov s vysokou houževnatostí. Často se používají austenitické nízkouhlíkové elektrody, které obsahují ve svarovém kovu 18 hm. % Cr, 8 hm. % Ni a 7 hm. % Mn nebo elektrody 18 hm. % Cr a 10 hm. % Ni, ty musí být stabilizované podle množství uhlíku niobem. Stabilizovaný svarový kov je výhodnější z hlediska odolnosti vůči mezikrystalové korozi v porovnání s nestabilizovaným svarovým kovem. [6, 7]

Samotné svařování je doporučeno provádět metodou „polštářování“, navařuje se na feritickou ocel austenitickými elektrodami ve dvou vrstvách, druhá vrstva se používá jako žíhací vrstva. Navařuje se za teploty 150 °C a návar se pak zarovná, je doporučeno odbrousit 1/3 výšky navařené housenky. Výplň svaru se zhotoví bez přehřevu austenitickými elektrodami. [1]

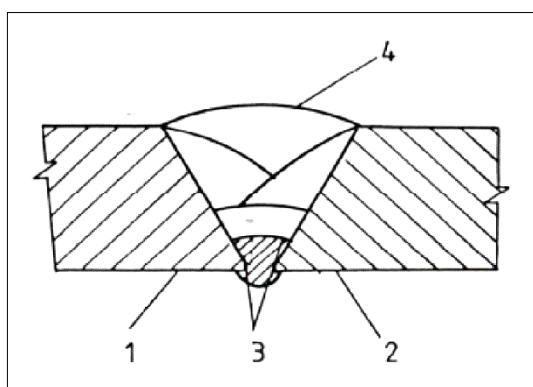
Střednělegované oceli se rovněž navařují s přehřevem (150 °C). Používají se elektrody, které mají ve svarovém kovu 25 hm. % Cr a 13 hm. % Ni, na tento návar se musí nanést žíhací vrstva bez přehřevu o chemickém složení 18 hm. % Cr, 10 hm. % Ni pro žíhání tepelně ovlivněné oblasti. U první vrstvy se promísí austenitický svarový kov se základní feritickou ocelí, tzn. že druhá vrstva je odolnější vůči korozi. Tato metoda se osvědčila pro navařování ochranných vrstev tlakových nádob, které pracují za teploty až 330 °C. [8]

Pro svařování vysokopevných, nízko a střednělegovaných ocelí s austenitickými materiály je vhodné používat svarové kovy s nízkým obsahem uhlíku (~ 0,03 hm. % C, 22 hm. % Cr, 9 hm. % Ni). Pokud se svařuje s nízkým tepelným příkonem a přehřevem 150 °C, tak se zvýší odolnost svarového spoje vůči trhlinám za studena. Tento typ elektrod je vhodný i pro spojování feritických ocelí s duplexními feriticko – austenitickými oceli s obsahem 22 hm. % Cr, 9 hm. % Ni a s nízkým obsahem C. Austenitické svarové kovy s obsahem dusíku se používají, když je nutné svar tepelně zpracovat. Dusík ovlivňuje redistribuci uhlíku a snižuje tak jeho nepříznivý vliv. [8]

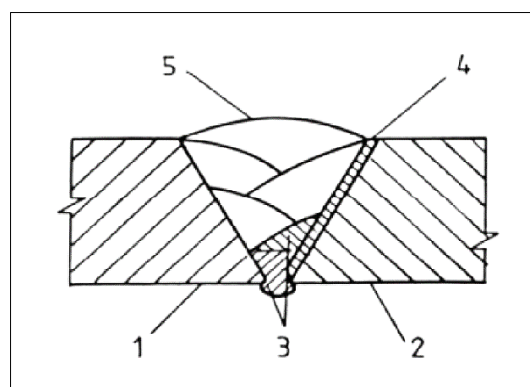
#### 1.4.2 Svarové spoje pracující nad provozní teploty 350 °C

Svařují-li se austenitické spolu s feritickými oceli, které budou pracovat za teplot vyšších než 350 °C, je nutné velmi důsledně řešit strukturní stálost v přechodech mezi svarovým kovem a základními materiály rozdílných strukturních bází. [7]

Pro svarové spoje pracující nad teplotu 350 °C se nejčastěji volí svarový kov, který tvoří bariéru proti migraci uhlíku. Nejvhodnější je používat elektrody s vyšším obsahem niklu než 30 hm. %. Pro eliminaci vzniku trhlin v kořeni svaru je vhodné svařovat kořenovou vrstvu elektrodami s chemickým složením 38 hm. % Ni a 20 hm. % Cr, takový svarový kov je odolný vůči vzniku trhlin. Volba výplňového svarového kovu závisí především na provozní teplotě. Často se svařuje elektrodami s vysokým obsahem niklu nebo se používají elektrody s 60 hm. % Ni a 18 hm. % Cr. Takový typ svaru je uveden na obrázku č. 4. [6]



Obrázek 4 – Svarový spoj feritické spolu s austenitickou ocelí pracující za teplot vyšších než 350 °C; 1 – austenitická ocel (18 hm. % Cr, 8 hm. % Ni); 2 – feritická ocel; 3 – kořen (38 hm. % Ni, 20 hm. % Cr); 4 – výplň svaru (60 hm. % Ni, 18 hm. % Cr) [6]



Obrázek 5 – Svařování feritické spolu s austenitickou ocelí s využitím metody polštářování; 1 – austenitická ocel (18 hm. % Cr, 8 hm. % Ni); 2 – feritická ocel; 3 – kořen (24 hm. % Cr, 13 hm. % Ni); 4 – návar (24 hm. % Cr, 13 hm. % Ni); 5 – výplň svaru (18 hm. % Cr, 8 hm. % Ni) [6]

Další možností je vytvoření protidifuzní bariéry vysokolegovaným přídavným materiálem s obsahem 24 hm. % Cr, 13 hm. % Ni na straně feritické oceli, dvěma vrstvami. Pro výplň svaru se používají elektrody o chemickém složení 18 hm. % Cr, 8 hm. % Ni a s nízkým obsahem uhlíku. Tento přídavný materiál je vhodný z hlediska dobré odolnosti vůči trhlinám. [8]

Po svařování je nutné svar popouštět za teplot na dolní předepsané hranici s prodloužením popouštěcí doby dle předpisu pro feritickou ocel. Teplota předehřevu při svařování návaru se stanovuje podle feritické oceli, kdežto u svařování výplně svaru (svarovým kovem 18 hm. % Cr, 8 hm. % Ni) není předehřev nutný. Metoda polštářování je uvedena na obrázku č. 5. [6]

Při svařování feritických ocelí s austenitickými oceli pracující za teploty vyšších než 550 °C se používají svarové kovy typu Inconel 600, Inconel 625 a Nimonic. Tyto přídavné materiály zaručují obsah niklu vyšší než 60 hm. % a tím tvoří účinnou bariéru proti difuzi uhlíku. Uvedené přídavné materiály jsou určeny pro svařování žáruvzdorných niklových slitin. Jsou schopné si zachovat strukturní stálost až do teploty 1150 °C a vyznačují se výbornými plastickými hodnotami. [6, 7]

Z rozborů studovaných svarových spojů pracujících za vyšších teplot než 350 °C je zřejmé, že difuze uhlíku negativně ovlivňuje životnost svaru. Rychlost difuze uhlíku je dána funkcí teploty a času, největší přerozdělování uhlíku probíhá za teplot vyšších než 600 °C. K migraci uhlíku nedochází jen u svařování a tepelného zpracování ale taky u žhání a během provozu energetického zařízení. Pro dosažení požadované spolehlivosti a životnosti spoje je nutné niklovými bariérami bránit redistribuci uhlíku. [7]

Austenitické oceli mají daleko vyšší rozpustnost uhlíku než feritické oceli, proto bude oduhličená oblast feritické oceli větší, jestli-že byl použit austenitický přídavný materiál. Redistribuce uhlíku a oduhličení se projeví vznikem čistě feritické struktury, ve které většinou zhrubne zrno a na druhé straně vzniká karbidická difuzní vrstva, tento jev má za následek negativní mechanické vlastnosti. Pokud se svarový spoj mezi feritickou a austenitickou ocelí zhotovil pomocí přídavného materiálu obsahující niob tak je většinou vyžadováno konečné tepelné zpracování. Druh a režim tepelného zpracování musí být stanoven v technologické dokumentaci pro daný svarový spoj. Tepelné zpracování pro tyto kombinace materiálů může být buď mezioperační nebo závěrečné popouštění. [8]

Závěrečné popouštění se provádí po ukončení všech svařovacích a tepelných operací na svařovaném dílu. Teplota závěrečného popouštění musí být o 15 °C vyšší než teplota mezioperačního popouštění. Teplota závěrečného popouštění nesmí překročit hranici popouštění základního materiálu, které jsou stanoveny normou nebo technickými podmínkami. [9]

Při svařování heterogenních svarových spojů austenitické oceli spolu s feritickou ocelí, mohou výslednou kvalitu ovlivnit i další technologické problémy. Především se jedná o tzv. foukání elektrického oblouku vlivem magnetických polí na straně feritické oceli při svařování stejnosměrným proudem nebo při svařování pomocí elektronového paprsku ve vakuu. Z důvodu, že feritická ocel je feromagnetická a austenitická ocel je nemagnetická se elektrický oblouk vychyluje směrem k feritické oceli. Toto může mít za následek větší natavování feritické oceli, což může způsobit větší promísení nebo můžou vznikat neprůvary. Snížit projevy foukání elektrického oblouku lze použitím střídavého proudu nebo změnou úhlu sklonu elektrody (tzn. udržovat nejkratší délku oblouku). [1]



## 2 SOUČASNÝ STAV POUŽÍVANÝCH HETEROGENNÍCH SPOJŮ NA JADERNÝCH ELEKTRÁRNÁCH

### 2.1 Heterogenní svarové spoje v jaderné energetice v ČR

Problematika provozu jaderných elektráren souvisí s monitorováním stavu energetických zařízení a vlastností materiálů s cílem zajištění maximální bezpečnosti. Z pohledu zajištění provozu a bezpečnosti jsou nejvíce riziková místa heterogenní svarové spoje, kterým se musí věnovat dostatečná pozornost. Při provozu jaderných elektráren může dojít ke změně strukturní stálosti heterogenních svarových spojů, a právě tyto změny vedou k ovlivnění životnosti nebo k porušení svaru. [8]

Pro jadernou energetiku v České republice byla zhotovena normativně technická dokumentace (NTD A.S.I), která tvoří soubor pravidel pro výrobu, montáž, rekonstrukce, provoz zařízení a potrubí elektráren typu VVER. Sekce I se zabývá problematikou svařování při montáži nových zařízení a potrubí, nebo při opravách stávajících zařízení. Dále popisuje kvalifikace svářečského personálu, destruktivní a nedestruktivní zkoušky svarových spojů. [10]

Při svařování heterogenních spojů v energetice se používají různé typy přídavných materiálů a často se využívá jejich kombinací, tyto kombinace se musí provádět v souladu s předpisem OP 1513-72 pro svařování, navařování uzlů a konstrukcí jaderných elektráren a s předpisem PK 1514-72 pro jejich kontrolu a hodnocení. [11, 12]

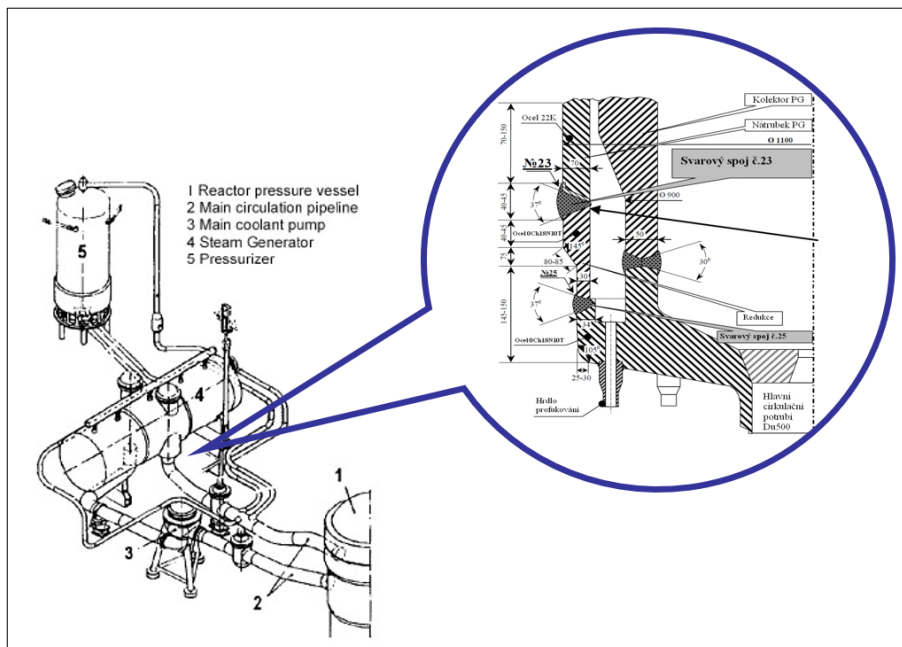
### 2.2 Problematika heterogenních svarových spojů

Na našich jaderných elektrárnách se vyskytují tlakové celky – parogenerátory (obrázek č. 6 – vlevo), kompenzátory objemu, potrubní systémy apod., u kterých se vyskytuje mnoho heterogenních spojů (obrázek č. 6 – vpravo). [8]



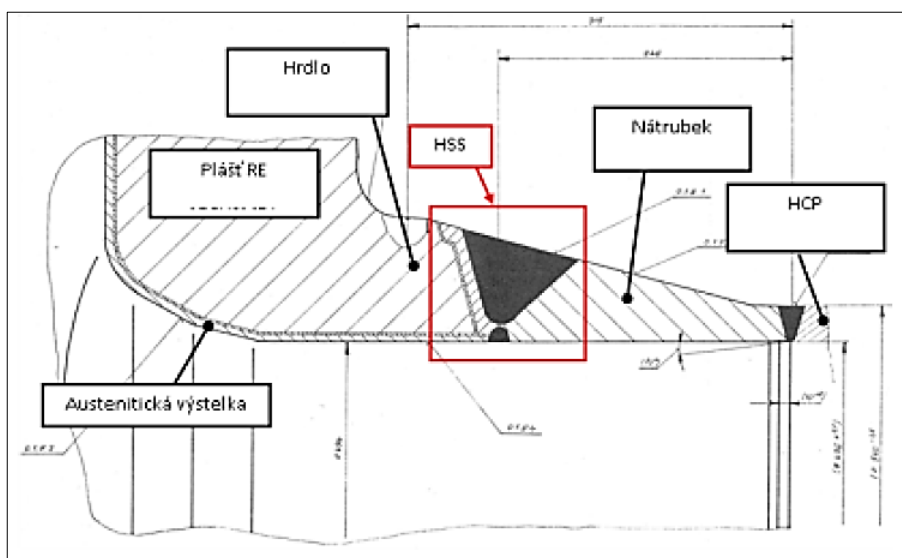
Obrázek 6 – (nalevo) parogenerátor DN 1100, (napravo) heterogenní svarový spoj kolektoru [8]

Jedním z heterogenních svarových spojů je spoj hlavního cirkulačního potrubí mezi kolektorem, který je vyroben z materiálu 08CH18N10T a pláštěm parogenerátoru, který je z materiálu 22K, podle původní ruské dokumentace při výstavbě JE (viz obrázek č. 7). [8, 13]

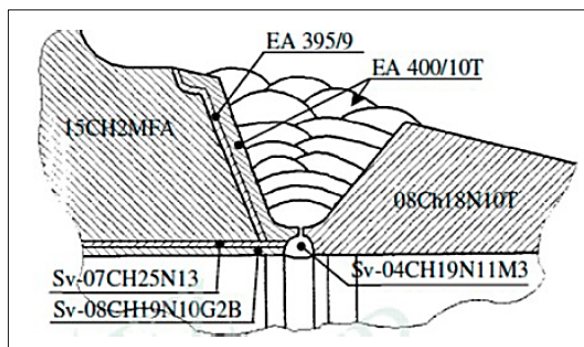


Obrázek 7 – Umístění a koncepce heterogenního svarového spoje na parogenerátoru DN 1100 [13]

K dalším typům heterogenních svarových spojů patří spoje hlavních cirkulačních smyček, kde se jedná o spojení austenitického nátrubku z materiálu 08Ch18N10T s hrdly horního a spodního hrdlového prstence reaktoru, který je vyroben z materiálu 15CH2MFA. Vnitřní strany prstenců jsou potaženy antikorozi ocelí (obrázek č. 8). Konstrukční řešení svarového spoje je na obrázku č. 9. [8]

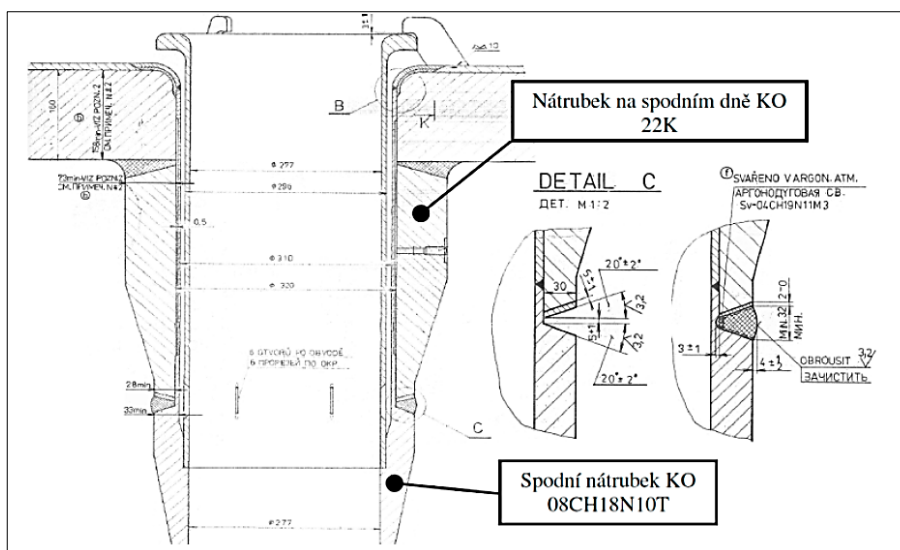


Obrázek 8 – Koncepce heterogenního svarového spoje nátrubků cirkulačních smyček reaktoru [8]

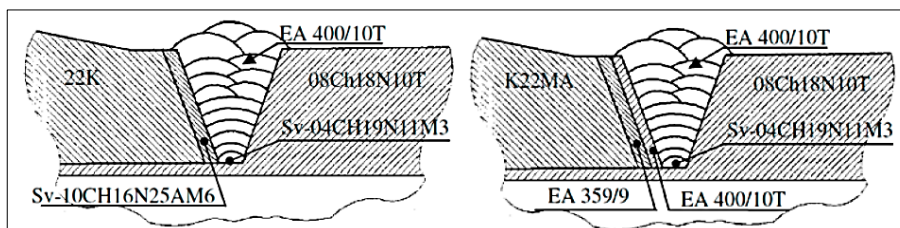


Obrázek 9 – Schéma materiálového provedení HSS nátrubků cirkulačních smyček [8]

Heterogenní svarové spoje se rovněž nacházejí na kompenzátoru objemu (obrázek č. 10) byly vyráběny ve Vítkovických železárnách. Návar byl navařen metodou automatem pod tavidlem a byl použitý svařovací drát typu Sv-10Ch16N25AM6 a tavidlo OF10. Jeden kompenzátor objemu byl vyroben v Polsku podle ruské technologie (obrázek č. 11 napravo). Ruské provedení je složitější a obsahuje 2. návary (1. vrstva EA-395/9, 2. vrstva EA-400/10T). Při navařování byl zvolen technologický přídavek na vnitřním a vnějším průměru a také na výšku. Velikost na výšku byla 3 mm a potom se přídavek opracoval. Navařování se provádělo bez aplikace přehřevu. [8]



Obrázek 10 – Koncepce HSS v oblasti dolního nátrubku kompenzátoru objemu [13]

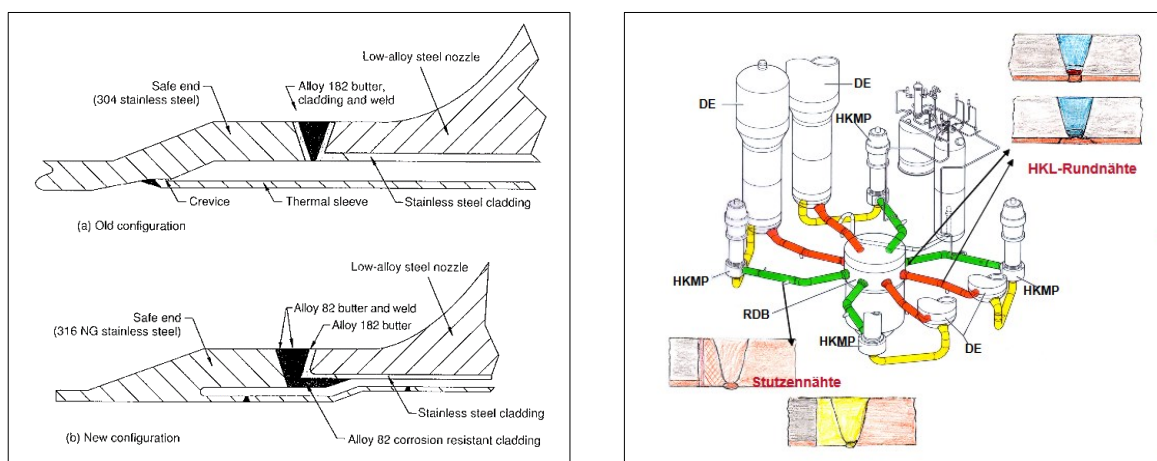


Obrázek 11 – Schéma materiálového provedení v oblasti dolního nátrubku kompenzátoru objemu; (nalevo) vítkovické provedení; (napravo) ruské provedení [8]

## 2.3 Používané heterogenní svarové spoje v zahraničí na JE

### Jaderné elektrárny v USA

Heterogenní svarové spoje v elektrárnách typu BWR jsou většinou vyráběny ve dvou krocích. Prvním krokem je aplikace dvou v některých případech tří návarů na feritickou ocel, tloušťka této vrstvy je 5 až 8 mm. První vrstva je zhotovena z vysokolegovaného materiálu s vysokým obsahem Cr a Ni a zaručí, že se při dalším návaru co nejméně promísí přídavný materiál se základním. Návar se po svařování musí tepelně zpracovat. Doba a teplota tepelného zpracování se určuje podle tloušťky svařované nízkolegované oceli. Druhým krokem je přivaření obou konců k sobě pomocí stejného výplňového materiálu jako pro druhou vrstvu. Tento svar už není tepelně zpracován. Obrázek č. 12 (nalevo) zobrazuje provedení HSS používaných na západních jaderných elektrárnách typu BWR. [14]



Obrázek 12 – (nalevo) Provedení HSS na parogenerátoru v USA, stará a nová konfigurace se liší v materiálech a konstrukci, (napravo) používané HSS v německých JE [14]

### Jaderné elektrárny v Německu

Typické uspořádání elektrárny typu BWR navržené společností Siemens je na obrázku č. 12 (napravo). Potrubí je vyrobeno z uhlíkové oceli a je potaženo korozi vzdornou ocelí. Svar mezi potrubím je tedy homogenní spoj, jak je vidět na obrázku v pravém horním rohu. Mezi potrubím a tryskami jsou heterogenní spoje. Na těchto spojích se používá metoda polštářování, návar i svar se zhotoví přídavným materiálem s vysokým obsahem niklu a chromu (alloy 182 nebo alloy 82). [14]

### Jaderné elektrárny v Rusku

V elektrárnách typu VVER 40 jsou heterogenní svary mezi kovaným prstencem reaktoru a potrubím chladicího média provedeny s návarem, kde je první vrstva na oceli reaktoru vyrobena elektrodou 25Cr/12.5Ni. Následné vrstvy jsou zhotoveny elektrodami 19Cr/10Ni/1Mo/1Nb a na výplň svarového spoje se používají elektrody 18Cr/11Ni/3Mo/V. Pro heterogenní spoje se v elektrárnách typu VVER nepoužívají slitiny na bázi niklu. [8]

### 3 SVAŘITELNOST MATERIÁLŮ

Podmínky svařitelnosti ocelí stanovují hranice ovlivňující požadavky kladené na svarové spoje a návary. Základní materiály jsou svařitelné, pokud za daného způsobu svařování jsou schopny vytvořit pomocí požadované technologie celistvý spoj splňující požadované technické a konstrukční požadavky po celou dobu jeho životnosti. [3]

Svařitelnost materiálu lze rozdělit na [15, 16]:

#### Svařitelnost metalurgická

Lze ji definovat jako vhodnost kovu ke svařování. Je podmíněna zejména chemickým složením a mechanickými vlastnostmi základního a přídavného materiálu. Závisí na jakosti hutních surovin, metalurgickém způsobu výroby oceli a způsobu lití a tváření materiálů.

#### Svařitelnost konstrukční

Udává konstrukční spolehlivost svarového spoje. Závisí na tloušťce materiálu, tvaru svaru a svarových ploch, na množství svarového kovu. Všechny tyto faktory se podílejí na velikosti pnutí a deformací ve svarovém spoji.

#### Svařitelnost technologická

Technologická svařitelnost zabezpečuje způsob svařování, který ovlivňuje množství vneseného tepla do svarového spoje a promísení svarového kovu se základním materiálem. Další vlivy, které ovlivňují technologickou svařitelnost jsou přehřev, mezihouseňková teplota (interpass), dohřev a tepelné zpracování svarového spoje.

#### 3.1 Uhlíkový ekvivalent

Vliv chemického složení na svařitelnost oceli se vyznačuje uhlíkovým ekvivalentem, který se značí  $C_E$ . Vyjadřuje a zahrnuje příspěvek legujících prvků ke kvalitě oceli. Čím snadněji za daná ocel zakalí, tzn. zvyšující se riziko křehkých zakalených struktur (martenzit a spodní bainit) ve svarovém kovu a v TOO svarového spoje, tím komplikovaněji se ocel svařuje. Uhlíkový ekvivalent je ukazatelem svařitelnosti oceli a je vypočítaný z hodnot jejího chemického složení. Do vztahů se dosazují hodnoty obsahu prvků v oceli v hm. % a některé vztahy zohledňují i tloušťku svařovaného materiálu. Norma ČSN EN 1011-2 doporučuje rovnici (viz. 3.1), rovnice je vhodná pro nelegované, jemnozrnné a nízkolegované oceli s obsahem  $C < 0,25$  hm. %. [5, 6]

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad [\%] \quad [3] \quad (3.1)$$

### 3.2 Teplota předehřevu

Významný vliv na svařitelnost materiálů má teplota předehřevu. Je to technologické opatření, kterým se eliminují možné vady ve svarovém kovu ale i v TOO svarového spoje. Zejména se snižuje riziko vzniku studených trhlin. [3]

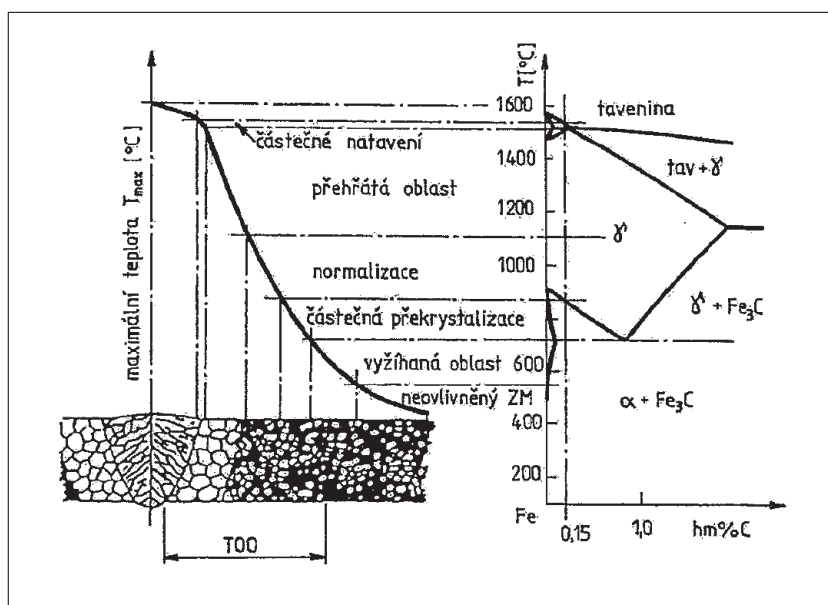
Předehřev svarových spojů má vliv na:

- rychlost ochlazování svaru, tím se zabráňuje zakalení svarového kovu i TOO svarového spoje,
- vznik příznivějších struktur z hlediska difuze vodíku,
- prodloužení času potřebného k difundování vodíku ze svarového spoje,
- snížení teplotních gradientů a tím redukuje zbytkové napětí vyvolané svařováním. [4]

Jestliže se svařuje v nízkých teplotách, nebo v extrémních podmínkách, kde jsou nepříznivé vlivy (např. na venkovních montážích) je nutné použít vyšší teploty předehřevu. Předehřev se provádí dle normy ČSN EN ISO 13916, která definuje vzdálenost měření teploty předehřevu  $T_p$  od místa svaru. Zjednodušeně lze říci, že teplota musí být měřena na opačné straně, než která je ohřívána. [6]

### 3.3 Struktura svarového spoje

Vliv teploty svařování na mikrostrukturu svarového spoje je zobrazen na obrázku č. 13. Při svařování nelegovaných i legovaných ocelí s polymorfní přeměnou  $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ , lze TOO rozdělit na jednotlivá pásma. Pásmo částečného natavení, pásmo přehřátí, pásmo normalizace a pásmo částečné překrystalizace (viz. obr. č. 13). [15]



Obrázek 13 – Struktura svarového spoje [15]

## 4 SVAŘITELNOST UHLÍKOVÝCH OCELÍ

Podle způsobu použití, především dle mechanických a fyzikálních vlastností jsou uhlíkové oceli značeny symboly (S, P, L, E). Uhlíkové oceli mají nízkou korozní odolnost a výrazně snižují svou pevnost při expozici ve vyšších teplotách. [3]

Schopnost uhlíkových ocelí být zaručeně svařitelná, závisí zejména na chemickém složení. Největší vliv na svařitelnost má především uhlík. Síra a fosfor, mají být v těchto ocelích jen v minimálním rozsahu. Uhlík bývá v rozsahu od velmi nízkého až do obsahu 1,7 hm. %, je známo, že zvyšuje mez kluzu, mez pevnosti a tvrdost, ale výrazně snižuje plastické schopnosti. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku roste i náchylnost k zakalení, současně se zvyšuje náchylnost na vznik studených trhlin, a to zejména v TOO svarového spoje. [15]

Problémy, které mohou nastat, při použití uhlíkových ocelí:

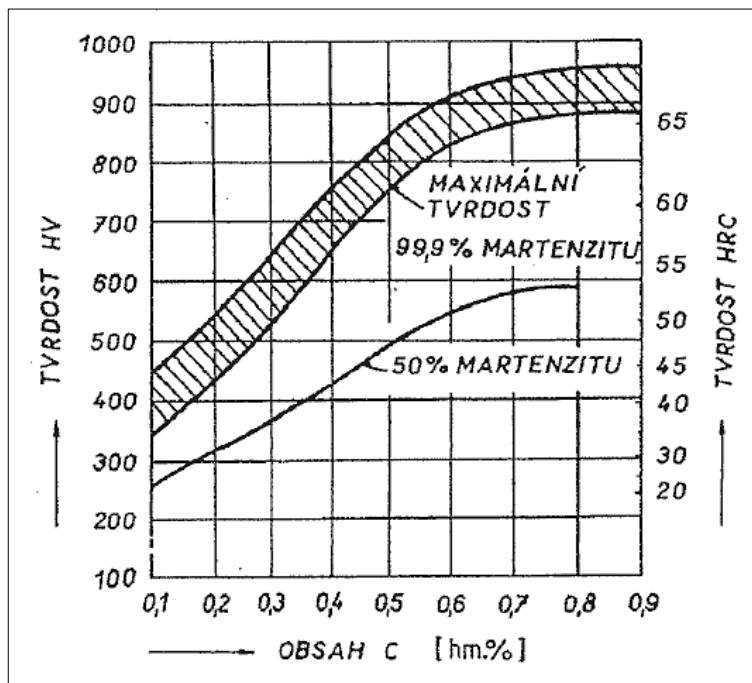
- nízká prokalitelnost,
- velmi nízká korozní odolnost,
- pokles tvrdosti při tepelném zpracování, především při žhání,
- nízká pevnost při expozici ve vysoké teplotě. [3]

Změny obsahu prvků C, Si, Cr, Mn, P, Cu, Ni mění lineárně mez kluzu a mez pevnosti, ale úměrně snižují tažnost a zúžení. Uhlík a fosfor má největší vliv na mechanické vlastnosti. Měď a nikl působí na vlastnosti svarového kovu různě, nikl nemá příliš velký vliv na pevnost oceli. Změna mechanických vlastností závisí na rozpustnosti určitého prvku ve feritu a na druhu vzniklé struktury. Výrobci konstrukčních uhlíkových ocelí obvykle garantují pouze obsahy C, Si, P, Mn, S někdy i N. Obsah ostatních prvků je uveden v maximálním přípustném součtu obsahu prvků, což někdy není dostatečné. [6, 9]

U ocelí, které mají zvýšený obsah manganu je vhodné použít vyšší teplotu předehřevu. Pokud však ocel obsahuje víc jak 1,6 hm. % manganu, může se ve feriticko – perlitické mikrostrukturu vykytovat podíl bainitu nebo martenzitu. Taková mikrostruktura není vhodná, protože může vést ke koroznímu poškození materiálu. Pokud uhlíkové oceli vykazují pokles houževnatosti v tepelně ovlivněné oblasti v důsledku zhrubnutí zrna, je zapotřebí snížit měrný příkon svařování. [29]

Uhlíkové oceli s hodnotou uhlíkového ekvivalentu do 0,40 % s obsahem uhlíku do 0,20 hm. % a s tloušťkou do 20 mm, mají svařitelnost zaručenou. Tyto uhlíkové oceli lze svařovat všemi dostupnými metodami, bez omezujících podmínek. Pokud ale mají vysoký obsah síry nebo fosforu, mohou vzniknout problémy, jako likvační praskání, nebo budou mít svarové spoje nedostatečnou houževnatost. Pro obloukové metody svařování se doporučuje nepřekročit tepelný příkon 25kJ/cm. [1]

Při svařování uhlíkových ocelí se musí počítat s tím, že uhlík má vliv na zvýšení tvrdosti v TOO svarového spoje a současně snižuje plasticitu. Tímto vzniklá napětí mohou způsobovat trhliny. Tolerují se hodnoty 350 HV v tepelně ovlivněné oblasti svaru. Tato tvrdost vzniká při 50 hm. % obsahu martenzitu a při obsahu 0,25 hm. % uhlíku, tato závislost je zobrazena na obrázku č. 14. [15]



Obrázek 14 – Závislost tvrdosti svarového spoje na obsahu uhlíku v oceli a na procentu martenzitu ve struktuře TOO [9]

Se zvyšujícím se obsahem uhlíku v ocelích stoupá pevnost a tím se zvyšuje i tvrdost. Problém nastává, pokud se svařuje ocel s obsahem uhlíku 0,25 hm. % a vyšším. Nejvyšší tvrdost bývá zpravidla v TOO svarového spoje, protože tato oblast se ochlazuje nejrychleji. Rovněž další legující prvky mají vliv na výslednou strukturu oceli, zejména nikl a chrom. Z těchto důvodů je obsah uhlíků v ocelích omezován hodnotou  $C \leq 0,25$  hm. %. Při tomto rozsahu se svarové spoje nemusí předehřívat. International Institute of Welding (IIW) doporučuje nepředehřívat svarové spoje uhlíkových ocelí s mezí pevnosti do 700 MPa, pokud jsou splněna následující kritéria, která jsou zobrazena v tabulce č. 1. [3, 6]

Tabulka 1 – Seznam mezních tloušťek a uhlíkových ekvivalentů podle IIW [15]

Tloušťka svaru s [mm]	Obsah C [hm. %]	$C_{E IIW}$
$s \leq 25$	$C \leq 0,22$	$C_{E IIW} \leq 0,45$
$s \leq 37$	$C \leq 0,22$	$C_{E IIW} \leq 0,41$



Potřebnou teplotu předehřevu pro znemožnění vzniku studených trhlin ovlivňuje nejen chemické složení oceli, ale taky obsah difuzního vodíku a tuhost konstrukce. Dohřev se uplatňuje při svařování materiálů velkých tloušťek, ale při nízkých obsazích difuzního vodíku není nutný. Mezihousenková teplota (interpass teplota) se většinou u svarových spojů uhlíkových ocelí nepředepisuje. [15]

Pokud je nutné svařovat materiály velkých tloušťek nebo s vysokým obsahem uhlíku je důležité zavést předehřev. Zjednodušeně jde teplotu předehřevu určit podle následující tabulky č. 2, která zohledňuje obsah uhlíku. [6]

Tabulka 2 – Závislost teploty předehřevu na obsahu uhlíku v oceli [9]

Obsah C [hm. %]	Teplota předehřevu [°C]
0,20 – 0,30	100 – 150
0,30 – 0,45	150 – 275
0,45 – 0,80	275 – 425

Dalším důležitým aspektem je velikost tepelného příkonu, ten má podobný účinek jako teplota předehřevu. Čím je tato hodnota vyšší, tím více ohřívá okolí svaru a dochází k pomalejšímu ochlazování svarového spoje. Tohoto jevu se dá dosáhnout použitím např. většího průměru elektrody nebo použít metodu s vyšším tepelným příkonem na jednotku délky svaru. Po svařování je doporučeno, svarové spoje s vyšším obsahem uhlíku dohřát, po dobu 2 až 6 hodin na teplotě větší než 200 °C, tímto se dosáhne snížení obsahu vodíku a prodlouží se čas, po který může vodík difundovat ven ze svaru. Dále je doporučeno svařence větších tloušťek žíhat na snížení zbytkových pnutí. [15]

Vhodný tvar svařence také může snížit riziko vzniku trhlin, je vhodné nepoužívat materiály příliš tlustých stěn. K omezení vnitřních pnutí musí být konstrukce dostatečně pružná. Proto je lepší volit tupé spoje nežli koutové. [3]

Volba přídatných materiálů pro svařování uhlíkových ocelí závisí na požadovaných mechanických vlastnostech svarového kovu, tyto vlastnosti musí být v souladu s požadovanými vlastnostmi pro ocelovou konstrukci. Pro svařování uhlíkových ocelí se používají přídatné materiály s nízkým obsahem uhlíku, který nepřevyšuje 0,1 hm. %. Z tohoto důvodu se musí počítat s oduhličením TOO svarového spoje, a naopak s nárůstem obsahu uhlíku v návaru. Závislost oduhličení je ovlivněna mnoha faktory, mezi které patří vnesené teplo, rychlost svařování, množství uhlíku v základním materiálu a chemické složení svařovaných kovů. [6, 9]

## 5 SVAŘITELNOST VYSOKOLEGOVANÝCH OCELÍ

Vysokolegované oceli obsahují více než 10 hm. % legujících prvků a jsou používané hlavně kvůli jejich žáruvzdorným, žarupevným a korozivzdorným vlastnostem. Dále mají zvýšenou odolnost vůči opotřebení a jsou vhodné pro konstrukce, které nachází uplatnění při nízkých teplotách. [9]

Podle mikrostruktury a obsahu hlavních legur tyto oceli dělíme na:

- feritické chromové oceli,
- martenzitické chromové oceli,
- austenitické Cr – Ni a Cr – Ni – Mo oceli,
- austeniticko – feritické neboli duplexní oceli. [3]

### 5.1 Svařitelnost austenitických Cr – Ni ocelí

Austenitické oceli jsou charakteristické tím, že mají o 50 % větší tepelnou roztažnost a o 30 % nižší tepelnou vodivost než oceli feritické. Proto se při svařování projeví větší deformace a napětí než u ocelí feritických. Austenitická mikrostruktura má lepší houževnatost a tažnost než u ocelí uhlíkových a nízkolegovaných. [3]

Obsahují minimálně 16 hm. % chromu s dostatečným množstvím Ni, nebo Mn, C a N pro vytvoření austenitické struktury. Austenitické korozivzdorné oceli lze rozdělit do třech skupin. Stabilizované, nestabilizované a s nízkým obsahem intersticiálních prvků. Pro stabilizaci se používají legury, které mají vyšší afinitu k uhlíku, jako např. chrom a tvoří karbidy, karbonitridy nebo nitridy. Zejména se používá titan, niob a v menší míře vanad. Molybden je přidáván pro zvýšení pevnosti a korozní odolnosti. Někdy obsahují i malý podíl  $\delta$  – feritu, přibližně 8 %. Dalším významným prvkem je křemík, se zvyšujícím se obsahem křemíku se zvyšuje oxidační i nauhličovací odolnost, při vyšších teplotách. [29]

Svařitelnost austenitických Cr – Ni ocelí je ovlivněna třemi faktory:

- precipitací karbidů chromu, která zvyšuje náchylnost k mezikrystalové korozi,
- náchylností k tvorbě teplých trhlin,
- zkřehnutí vznikem  $\sigma$  – fáze. [9]

Např. pokud je při svařování korozivzdorná ocel 18/8CrNi s obsahem uhlíku do 0,05 hm. % vystavena teplotě 700 °C po dobu 6 minut, tak to stačí na vyvolání náchylnosti na mezikrystalovou korozi. Z tohoto hlediska, když svařujeme takovou ocel ve větších tloušťkách, musíme vybrat ocel s nižším obsahem uhlíku, protože mají delší čas na vyvolání náchylnosti k MKK. [1]

Vznik teplých trhlin výrazně ovlivňují prvky jako S, P, Si, Ti, Nb, které při tuhnutí snižují plasticitu kovu tuhnoucího v mezidendritických prostorách, nebo vytvářejí se železem a niklem nízkotavitelná eutektika, která snižují pevnost hranic zrn. Množství síry lze snížit vazbou na mangan za vzniku sulfidu manganatého (MnS), který přechází do strusky. Obsah fosforu, lze snížit pouze využitím jeho velké rozpustnosti v  $\delta$  – feritu. Rozpustnost fosforu v  $\delta$  – feritu je mnohem vyšší než v austenitu. Křemík je z uvedených důvodů limitován na hodnotu max. 0.5 hm. %, avšak doporučený limit je 0,3 hm. %. [3]

K zabránění vzniku teplých trhlin je nutné snížit měrný příkon svařování, používat kvalitní přídavné materiály s vyšším obsahem Mn (vysoké čistoty), používat vhodné metody svařování a tím eliminovat deformace a napětí, nepoužívat housenky s velkým tvarovým koeficientem a malým průřezem v kořenové oblasti, snížit rychlost svařování i teplotu interpass na maximální hodnotu 150 °C. [15]

Fáze –  $\sigma$  vzniká především při obsahu chromu vyšších než 10 hm. %. Je to tvrdá a intermetalická sloučenina, která způsobuje zkřehnutí austenitických chromových ocelí. Většinou vzniká ve svarových spojích při teplotách 500 – 820 °C. Její vznik je podporován feritotvornými prvky (Si, Al, Ti, Mo, Nb) a karbidotvornými prvky (Ti, Nb), dále  $\sigma$  – fázi podporuje heterogenita taveb nebo místní přesycení chromem při rychlém ochlazení. [9]

Austenitické chromové oceli se svařují přídavnými materiály, které mají stejné nebo podobné chemické složení. Důležitým faktorem, je požadovaný podíl  $\delta$  – feritu ve svarovém kovu. Plně austenitické oceli se svařují přelegovanými PM, tímto se vyrovná ztráta legujících prvků a segregace. Superaustenitické oceli se svařují přídavnými materiály s vysokým obsahem niklu. [6]

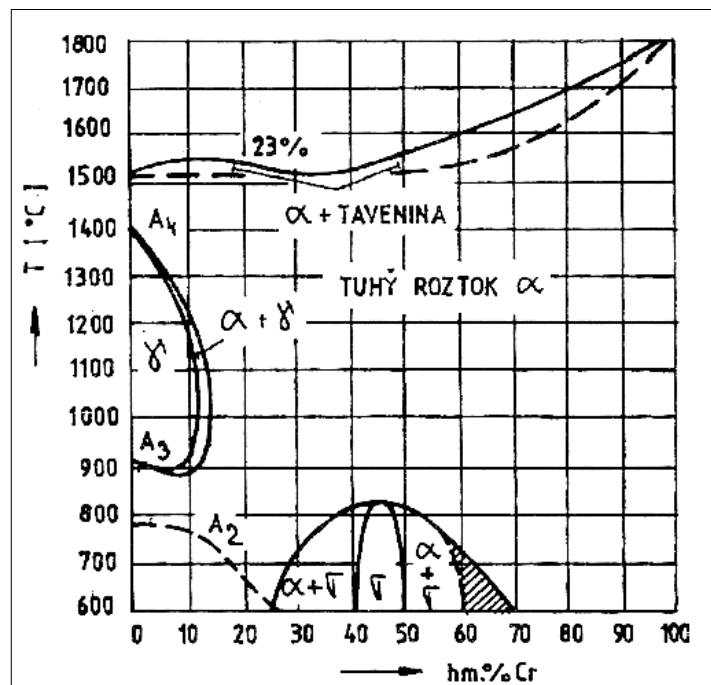
Austenitické oceli je možné svařovat téměř všemi obloukovými metodami. Je však nutné používat ochrannou atmosféru svařovacího oblouku, aby nedocházelo k oxidaci slitinových prvků ve svarovém kovu. Je nutné věnovat pozornost faktorům, které zvyšují obsah uhlíku ve svarovém kovu a plynům, které by mohly způsobit pórovitost svarového kovu. Při svařování metodou TIG (141) je doporučeno používat čistý argon nebo směsi argonu a hélia. Není však vhodné používat směsné plyny CO<sub>2</sub> s obsahem větším než 2,5 %. Při svařování austenitických ocelí se nesmí používat přehřev, protože by mohl ovlivnit korozní odolnost. [1]

Svarové spoje austenitických ocelí není nutné tepelně zpracovávat. Pokud se svařuje komplikovaný svařenec, je možné použít žíhání na snížení pnutí při teplotě 850 – 950 °C. Pokud je záměrem eliminovat zcitlivění na korozní praskání, je možné svarové spoje zpracovat rozpouštěcím žíháním při teplotě 1050 – 1100 °C. Potom se musí svarový spoj rychle ochladit ve vodě nebo na vzduchu. [29]

## 5.2 Struktura vysokolegovaných ocelí

Struktura vysokolegovaných korozivzdorných ocelí je dána chemickým složením. Informace o možných strukturách chromových ocelí v závislosti na teplotě, zobrazuje rovnovážný diagram železo – chrom, který je uvedený na obrázku č. 15. [9]

Feritotvorný prvek – chrom stabilizuje fázi –  $\alpha$  a zmenšuje oblast –  $\gamma$ . Slitina prodělává transformaci  $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$  do obsahu chromu cca 13 hm. %. Oblast feritu je nad obsahem 13 hm. % chromu. Pokud je tato jednofázová slitina ohřívána nad 900 °C, bude mít hrubé zrna a křehne. Nad 25 hm. % chromu vzniká nová fáze –  $\sigma$ , která vyvolává křehnutí slitin železo – chrom, tato fáze je stabilní do teploty 820 °C. Pro správnou aplikaci diagramu železo – chrom na oceli, je nutné uvážit vliv uhlíku. Uhlík rozšiřuje oblast  $\gamma$  směrem k vyšším obsahům chromu. [3]

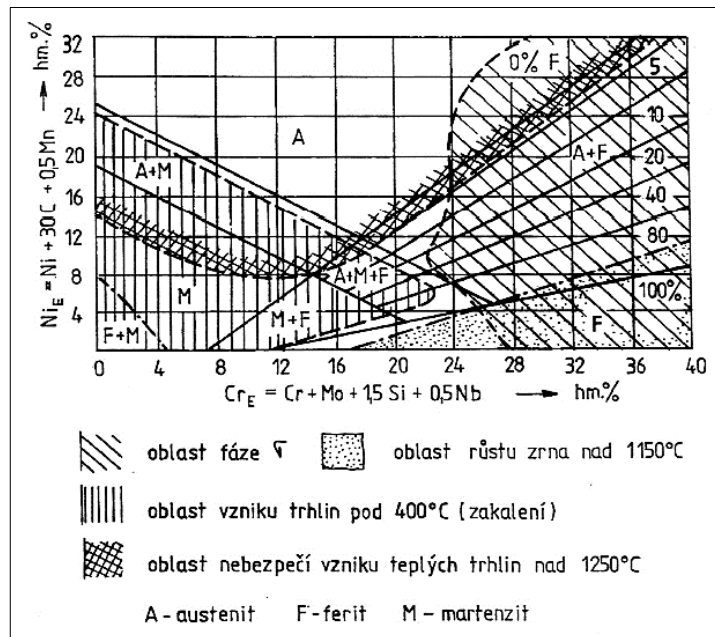


Obrázek 15 – Rovnovážný diagram železo – chrom [3]

Pro dosažení větší korozní odolnosti a větší houževnatosti se do chromových ocelí přidává nikl, který zajišťuje austenitickou strukturu Cr – Ni ocelí. V austenitu je vyšší rozpustnost uhlíku než ve feritu a má lepší plastické vlastnosti než ferit. Větší rozpustnost uhlíku v austenitu snižuje riziko precipitace karbidů chromu. [9]

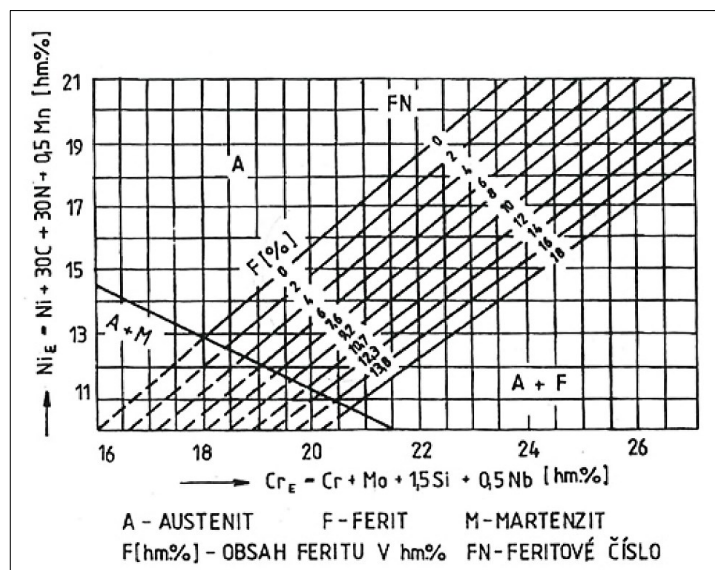
Struktura Cr – Ni ocelí je výsledkem kombinace austenitotvorných a feritotvorných prvků. Ekvivalent chromu ( $Cr_E$ ) vyjadřuje vliv všech feritotvorných prvků, které ocel obsahuje. Ekvivalent niklu ( $Ni_E$ ) vyjadřuje vliv austenitotvorných prvků. Na základě těchto ekvivalentů byly vytvořeny diagramy, které se používají při odhadu výsledné mikrostruktury Cr – Ni austenitických ocelí. Jedná se o Schaefflerův diagram uvedený na obrázku č. 16 a o De Longův diagram zobrazený na obrázku č. 17. [6]

Schaefflerův digram lze použít pro odhad výsledné mikrostruktury Cr – Ni austenitických ocelí s nízkým obsahem dusíku. [9]



Obrázek 16 – Schaefflerův diagram [3]

De Longův diagram slouží pro upřesnění Schaefflerova diagramu a zahrnuje i dusík. Proto je možné De Longův diagram používat pro austenitické Cr – Ni oceli s dusíkem. Lze podle něj dostatečně přesně určit mikrostrukturu u austenitických Cr – Ni ocelí s obsahem feritu 0 – 15 %. Není však vhodný pro oceli s vysokým obsahem manganu. Digramy lze použít pro odhad obsahu feritu a austenitu v základním materiálu i ve svarovém kovu. Při odhadu obsahu feritu ve svarovém kovu se musí počítat s promísením přídavného a základního materiálu. [6]



Obrázek 17 – De Longův diagram [3]

## 6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

### 6.1 Popis zkušebních vzorků

K experimentální části byly připraveny 4 vzorky, které byly označeny A, B, C, D. Tyto vzorky byly odebrány z potrubí, které slouží k dopravě destilované vody pod tlakem. Pro lepší porovnání byly dva vzorky homogenní a dva byly heterogenní.

#### Seznam vzorků

Tabulka 3 – Seznam zkušebních vzorků

Označení	Rozměry	Materiál	Přídavný materiál	Technologie svařování
A	Tr. Ø 114 x 8,5	1.4541	Inertrod 316LSi	141
B	Tr. Ø 108 x 4,0	1.4541 + P265GH	Sv-07Ch25N13	141
C	Tr. Ø 273 x 6,3	1.4541 + P265GH	Sv-07Ch25N13	141
D	Tr. Ø 108 x 4,0	P265GH	Carborod 1	141

#### Charakteristika základního materiálu – P265GH

Základní materiál – P265GH je nízkouhlíková, nelegovaná a žárupevná ocel. Řadí se do skupiny č. 1 a podskupiny č. 1.1. Používá se pro součásti kotlů a tlakových nádob. Svařitelnost je zaručená. Chemické složení bylo popsáno v tabulce č. 5, a mechanické vlastnosti v tabulce č. 6. [17]

Tabulka 4 – Značení oceli P265GH dle norem [17]

Značení oceli dle norem		
W.Nr.	EN 10027-1	ČSN 42 0002
1.0425	P265GH	11 418 (11 416)

Tabulka 5 – Chemické složení oceli P265GH [18]

Chemické složení [hm. %]									
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Ti
<0,2	<1,4	<0,025	<0,01	<0,4	<0,3	<0,3	<0,08	<0,3	<0,04

Tabulka 6 – Mechanické vlastnosti oceli P265GH [18]

<b>Mechanické vlastnosti při 20 °C</b>		
<b>R<sub>p0,2</sub> [MPa]</b>	<b>R<sub>m</sub> [MPa]</b>	<b>Tažnost A<sub>5</sub> [%]</b>
≥ 255	410 – 570	≥ 23

### **Charakteristika základního materiálu – 1.4541**

Základní materiál – 1.4541 je austenitická ocel, stabilizovaná titanem. Řadí se do skupiny č. 8 a podskupiny č. 8.1. Je odolná vůči korozi v průmyslových atmosférách, alkáliích a slabších kyselinách. Odolnost vůči MKK je až do teplot 650 °C. Z těchto důvodů je velmi často používána v tepelných a energetických zařízeních. Svařitelnost je zaručená jakoukoliv technologií, obrobiteľnosť je rovněž dobrá. Chemické složení bylo popsáno v tabulce č. 8 a mechanické vlastnosti jsou v tabulce č. 9. [19]

Tabulka 7 – Značení oceli 1.4541 dle norem [19]

<b>Značení oceli dle norem</b>		
<b>W.Nr.</b>	<b>EN 10027-1</b>	<b>ČSN 42 0002</b>
1.4145	X6CrNiTi18-10	17 247 (17 248)

Tabulka 8 – Chemické složení oceli 1.4541 [18]

<b>Chemické složení [hm. %]</b>							
<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Ti</b>
<0,08	<2,0	<0,04	<0,015	<1,0	9,0 – 12,0	17,0 – 19,0	<0,7

Tabulka 9 – Mechanické vlastnosti oceli 1.4541 [18]

<b>Mechanické vlastnosti při 20 °C</b>		
<b>R<sub>p0,2</sub> [MPa]</b>	<b>R<sub>m</sub> [MPa]</b>	<b>Tažnost A<sub>5</sub> [%]</b>
≥ 200	500 – 730	≥ 35

### **Technologie svařování**

Vzorky potrubí byly svařovány obloukovým svařováním wolframovou elektrodou v inertním plynu, tato metoda je značena zkratkou TIG – 141. Svařování probíhalo za použití stejnosměrného proudu. Všechny svary byly typu V – svar. [20]

Pro svařování byly použity tři přídatné materiály. Pro homogenní spoj, vzorek A – 1.4541 byl použit Inertrod 316LSi. Heterogenní spoje, vzorky B, C byly svařovány pomocí přídatného materiálu Sv-07Ch25N13. A druhý homogenní spoj, vzorek D – P265GH byl svařován přídatným materiálem Carborod 1.

### **Inertrod 316LSi**

Je austenitický svařovací drát, který má velmi nízký obsah uhlíku. Je vhodný zejména pro svařování stabilizovaných i nestabilizovaných korozivzdorných Cr – Ni – Mo ocelí metodou TIG. Je odolný vůči MKK při provozních teplotách do 400 °C. Chemické složení bylo popsáno v tabulce č. 10. [21]

Tabulka 10 – Chemické složení přídatného materiálu Inertrod 316LSi [21]

<b>Chemické složení [hm. %]</b>							
<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>
0,02	1,4	≤0,025	≤0,020	0,85	12,5	19,0	2,6

### **Sv-07Ch25N13**

Drát s velmi nízkým obsahem uhlíku, vhodný pro svařování ocelí podobného složení v litém nebo tvářeném stavu, metodou TIG. Často používaný pro heterogenní spoje, např. pro korozivzdorné oceli s nízkolegovanými oceli. Vhodný i pro navařování. Chemické složení bylo popsáno v tabulce č. 11. [22]

Tabulka 11 – Chemické složení přídatného materiálu Sv-07Ch25N13 [22]

<b>Chemické složení [hm. %]</b>				
<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>
0,09	1,5	0,65	13,0	24,0

### **Carborod 1**

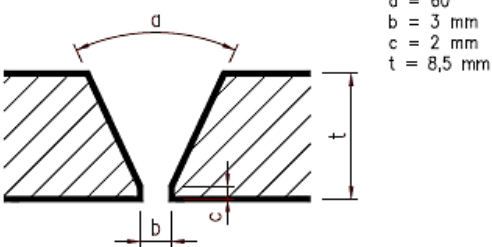
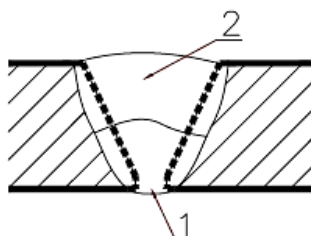
Je poměděný drát, vhodný pro svařování středně legovaných a C – Mn ocelí metodou TIG. Často se používá pro kořenové housenky. Má vynikající mechanické vlastnosti a houževnatost pro aplikace až do -50 °C. Chemické složení bylo popsáno v tabulce č. 12. [23]

Tabulka 12 – Chemické složení přídatného materiálu Carborod 1 [23]

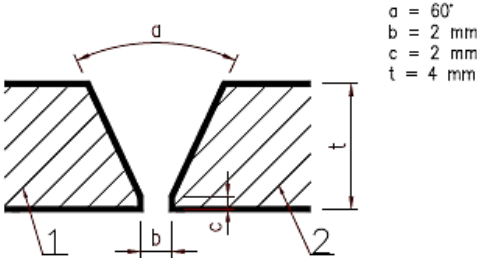
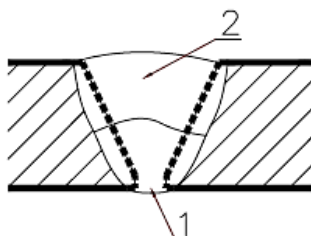
<b>Chemické složení [hm. %]</b>				
<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>
0,08	1,5	0,9	≤0,025	≤0,025



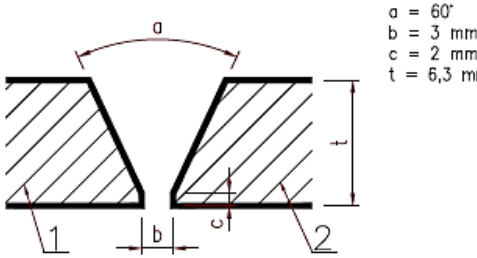
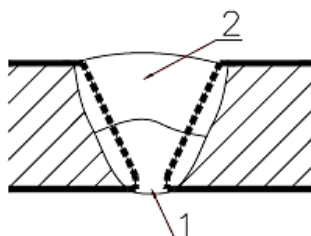
Tabulka 13 – Návrh postupu svařování vzorku A, (austenit/austenit)

<b>SPECIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ (WPS) - A</b>								
Postup svařování, vzorek: A WPQR: - Výrobce: Bc. Michael Neuman Způsob přenosu kovu: zkratový Druh spoje a svaru: BW, V - svar Poloha svařování: PH				Metoda přípravy a čištění: strojní opracování, kartáčování, odmaštění, atd. Označení základního materiálu: ocel 1.4541; X6CrNiTi18-10; 17 247 Tloušťka materiálu (mm): t = 8,5 Vnější průměr (mm): 114				
Podrobnosti přípravy svaru (náčrt): Návrh spoje				Pořadí svařování Poloha PH				
 <p> <math>a = 60^\circ</math>  <math>b = 3 \text{ mm}</math>  <math>c = 2 \text{ mm}</math>  <math>t = 8,5 \text{ mm}</math> </p>								
Podrobnosti svařování PC:								
housenka	metoda svařování	rozměr přidávaného materiálu [mm]	proud [A]	napětí [V]	druh proudu/ polarita	rychlost podávání drátu [m/min]	rychlost svařování [mm/s]	tepelný příkon [KJ/mm]
1	141	Ø 2,4	90 - 120	11 - 13	DC/-	-	-	0,74 - 0,97
2	141	Ø 3	95 - 130	11 - 13	DC/-	-	-	0,74 - 0,97
Označení přidávaného materiálu: Inertrod 316LSi Ochranný plyn: Argon I1 (99.996 %) Průtoková rychlost plynu: 8 - 14 l/min Teplota předehřevu: bez předehřevu Interpass teplota: 60 °C Dodatečný ohřev: bez dohřevu Tepelné zpracování po svařování: bez TZ Chladnutí: volně na vzduchu				Další údaje např: Rozkyv: bez rozkyvu Vzdálenost průvlaku od prac.kusu: - Druh/rozměr wolframové elektrody [Ø (mm)]: Wt20/2,4  Jméno: Bc. Michael Neuman Datum: 18.05.2020      Podpis:				

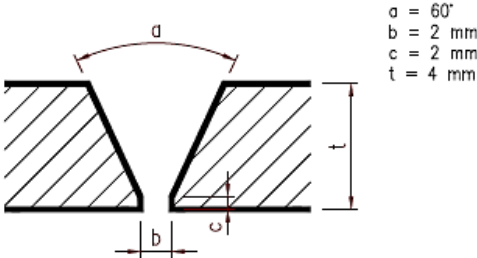
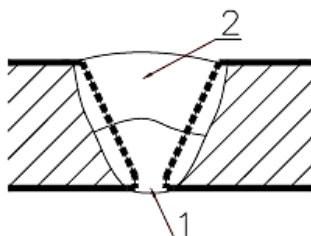
Tabulka 14 – Návrh postupu svařování vzorku B, (austenit/ferit)

<b>SPECIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ (WPS) - B</b>																																			
<p>Postup svařování, vzorek: B                      WPQR: -                      Výrobce: Bc. Michael Neuman                      Způsob přenosu kovu: zkratový                      Druh spoje a svaru: BW, V - svar                      Poloha svařování: PH</p>				<p>Metoda přípravy a čištění:                      strojní opracování, kartáčování, odmaštění, atd.                      Označení základního materiálu:                      (1) - 1.4541; X6CrNiTi18-10 + (2) - 1.0425; P265GH                      Tloušťka materiálu (mm): t = 4,0                      Vnější průměr (mm): 108</p>																															
<p>Podrobnosti přípravy svaru (náčrt):                      Návrh spoje</p>				<p>Pořadí svařování                      Poloha PH</p>																															
 <p> <math>\alpha = 60^\circ</math>  <math>b = 2 \text{ mm}</math>  <math>c = 2 \text{ mm}</math>  <math>t = 4 \text{ mm}</math> </p>																																			
<p>Podrobnosti svařování PC:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>housenka</th> <th>metoda svařování</th> <th>rozměr přidavného materiálu [mm]</th> <th>proud [A]</th> <th>napětí [V]</th> <th>druh proudu/ polarita</th> <th>rychlost podávání drátu [m/min]</th> <th>rychlost svařování [mm/s]</th> <th>tepelný příkon [KJ/mm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>141</td> <td>Ø 2,4</td> <td>90 - 120</td> <td>11 - 13</td> <td>DC/-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>0,74 - 0,97</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>141</td> <td>Ø 3</td> <td>95 - 130</td> <td>11 - 13</td> <td>DC/-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>0,74 - 0,97</td> </tr> </tbody> </table>									housenka	metoda svařování	rozměr přidavného materiálu [mm]	proud [A]	napětí [V]	druh proudu/ polarita	rychlost podávání drátu [m/min]	rychlost svařování [mm/s]	tepelný příkon [KJ/mm]	1	141	Ø 2,4	90 - 120	11 - 13	DC/-	-	-	0,74 - 0,97	2	141	Ø 3	95 - 130	11 - 13	DC/-	-	-	0,74 - 0,97
housenka	metoda svařování	rozměr přidavného materiálu [mm]	proud [A]	napětí [V]	druh proudu/ polarita	rychlost podávání drátu [m/min]	rychlost svařování [mm/s]	tepelný příkon [KJ/mm]																											
1	141	Ø 2,4	90 - 120	11 - 13	DC/-	-	-	0,74 - 0,97																											
2	141	Ø 3	95 - 130	11 - 13	DC/-	-	-	0,74 - 0,97																											
<p>Označení přidavného materiálu:                      Sv-0,7Ch25N13                      Ochranný plyn:                      Argon I1 (99.996 %)                      Průtoková rychlost plynu: 8 - 14 l/min                      Teplota předehřevu: bez předehřevu                      Interpass teplota: 60 °C                      Dodatečný ohřev: bez dohřevu                      Tepelné zpracování po svařování: bez TZ                      Chladnutí: volně na vzduchu</p>				<p>Další údaje např:                      Rozkyv: bez rozkyvu                      Vzdálenost průvlaku od prac.kusu: -                      Druh/rozměr wolframové elektrody [Ø (mm)]: Wt20/2,4</p> <p>Jméno: Bc. Michael Neuman                      Datum: 18.05.2020      Podpis:</p>																															

Tabulka 15 – Návrh postupu svařování vzorku C, (austenit/ferit)

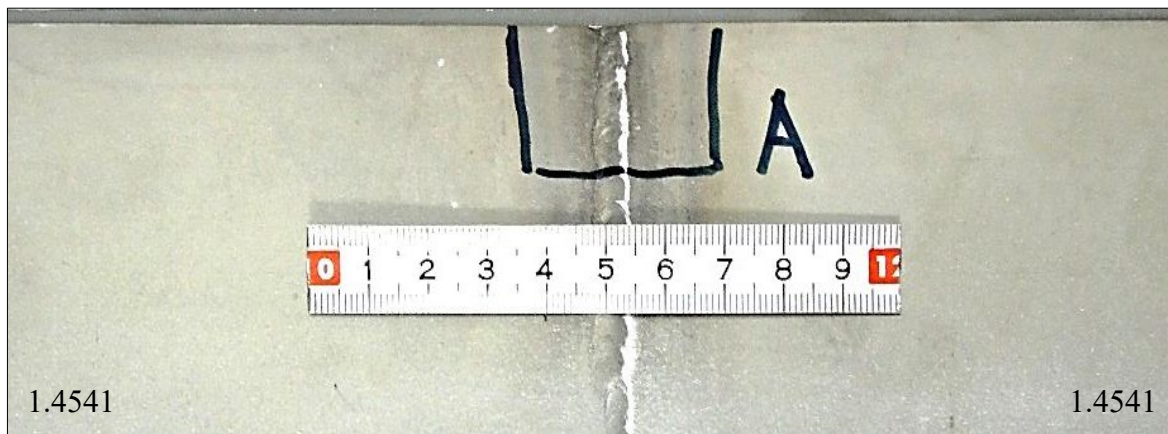
<b>SPECIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ (WPS) - C</b>								
Postup svařování, vzorek: C WPQR: - Výrobce: Bc. Michael Neuman Způsob přenosu kovu: zkratový Druh spoje a svaru: BW, V - svar Poloha svařování: PH				Metoda přípravy a čištění: strojní opracování, kartáčování, odmaštění, atd. Označení základního materiálu: (1) - 1.4541; X6CrNiTi18-10 + (2) - 1.0425; P265GH Tloušťka materiálu (mm): t = 6,3 Vnější průměr (mm): 273				
Podrobnosti přípravy svaru (náčrt): Návrh spoje				Pořadí svařování Poloha PH				
 <p> <math>\alpha = 60^\circ</math>  <math>b = 3 \text{ mm}</math>  <math>c = 2 \text{ mm}</math>  <math>t = 6,3 \text{ mm}</math> </p>								
Podrobnosti svařování PC:								
houseska	metoda svařování	rozměr přidavného materiálu [mm]	proud [A]	napětí [V]	druh proudu/ polarita	rychlost podávání drátu [m/min]	rychlost svařování [mm/s]	tepelný příkon [KJ/mm]
1	141	Ø 2,4	90 - 120	11 - 13	DC/-	-	-	0,74 - 0,97
2	141	Ø 3	95 - 130	11 - 13	DC/-	-	-	0,74 - 0,97
Označení přidavného materiálu: Sv-0,7Ch25N13 Ochranný plyn: Argon I1 (99.996 %) Průtoková rychlost plynu: 8 - 14 l/min Teplota předehřevu: bez předehřevu Interpass teplota: 60 °C Dodatečný ohřev: bez dohřevu Tepelné zpracování po svařování: bez TZ Chladnutí: volně na vzduchu				Další údaje např: Rozkyv: bez rozkyvu Vzdálenost průvlaku od prac.kusu: - Druh/rozměr wolframové elektrody [Ø (mm)]: Wt20/2,4  Jméno: Bc. Michael Neuman Datum: 18.05.2020 Podpis:				

Tabulka 16 – Návrh postupu svařování vzorku B, (ferit/ferit)

<b>SPECIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ (WPS) - D</b>								
Postup svařování, vzorek: D WPQR: - Výrobce: Bc. Michael Neuman Způsob přenosu kovu: zkratový Druh spoje a svaru: BW, V - svar Poloha svařování: PH				Metoda přípravy a čištění: strojní opracování, kartáčování, odmaštění, atd. Označení základního materiálu: ocel 1.0425; P265GH; 11 418 Tloušťka materiálu (mm): $t = 4,0$ Vnější průměr (mm): 108				
Podrobnosti přípravy svaru (náčrt): Návrh spoje				Pořadí svařování Poloha PH				
								
Podrobnosti svařování PC:								
housenka	metoda svařování	rozměr přídavného materiálu [mm]	proud [A]	napětí [V]	druh proudu/polarita	rychlost podávání drátu [m/min]	rychlost svařování [mm/s]	tepelný příkon [KJ/mm]
1	141	Ø 2,4	90 - 120	11 - 13	DC/-	-	-	0,74 - 0,97
2	141	Ø 3	95 - 130	11 - 13	DC/-	-	-	0,74 - 0,97
Označení přídavného materiálu: Carborod 1 Ochranný plyn: Argon I1 (99.996 %)				Další údaje např: Rozkyv: bez rozkyvu Vzdálenost průvlaku od prac.kusu: - Druh/rozměr wolframové elektrody [Ø (mm)]: Wt20/2,4				
Průtoková rychlost plynu: 8 - 14 l/min Teplota předehřevu: bez předehřevu Interpass teplota: 150 °C Dodatečný ohřev: bez dohřevu Tepelné zpracování po svařování: bez TZ Chladnutí: volně na vzduchu				Jméno: Bc. Michael Neuman Datum: 18.05.2020      Podpis:				

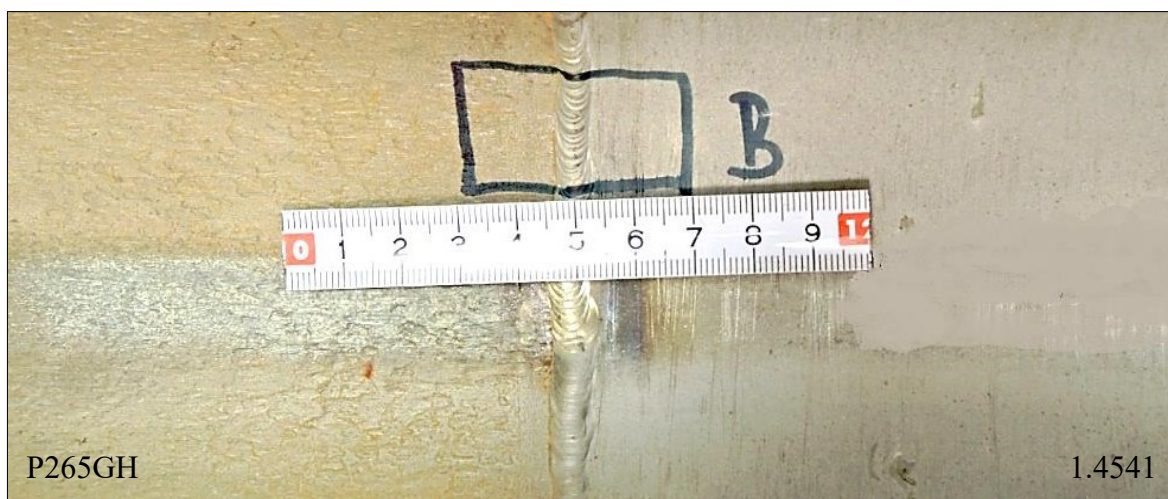
## 6.2 Příprava vzorků k metalografické analýze

K analýzám byl použitý optický mikroskop Carl Zeiss Neophot 21 s možností zvětšení obrazu 10x až 1000x. Pro fotografování snímků byl mikroskop vybaven kamerou Nikon Epiphot 200. Vzorky A, D byly homogenní a vzorky B a C byly heterogenní. [24]



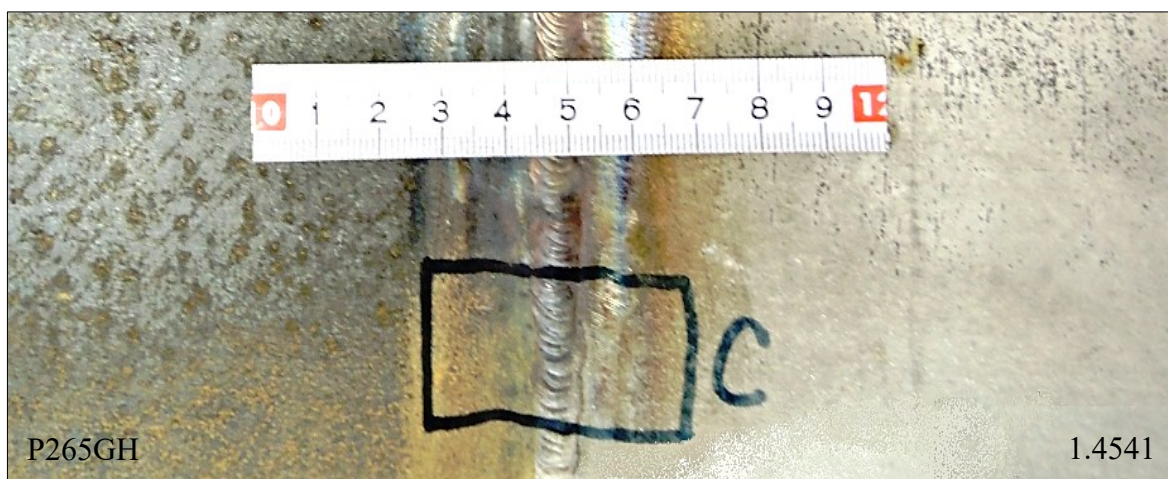
Obrázek 18 – Vzorek A

Obrázek č. 18 zobrazuje homogenní svarový spoj austenitické korozivzdorné oceli 1.4541. Svařování probíhalo s přídavným materiálem Inertrod 316 LSi. Vzorek A byl odebrán z potrubí o velikosti  $\text{Ø}114 \times 8,5$  mm. Označené místo (A) mělo rozměry přibližně  $35 \times 25$  mm a bylo použité pro makroskopickou a mikroskopickou analýzu.



Obrázek 19 – Vzorek B

Na obrázku č. 19 je uveden vzorek B, jedná se o heterogenní svarový spoj. Vlevo na obrázku je uhlíková ocel P265GH a vpravo je austenitická ocel 1.4541. Svařování probíhalo s přídavným materiálem typu Sv-07Ch25N13. Vzorek B byl odebrán z potrubí, které mělo rozměry  $\text{Ø}108 \times 4,0$  mm. Označené místo (B) mělo rozměry cca  $40 \times 25$  mm a bylo použité pro metalografický rozbor.



Obrázek 20 – Vzorek C

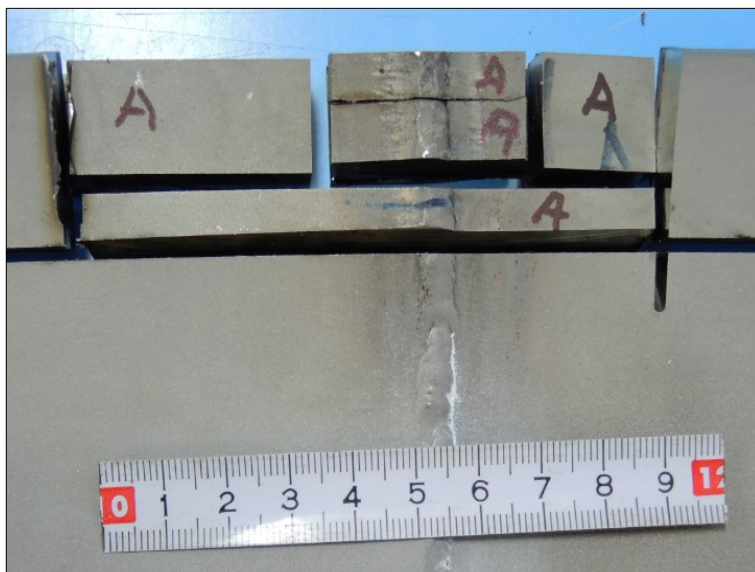
Obrázek č. 20 zobrazuje vzorek C, lze vidět heterogenní svarový spoj. Jedná se o spoj uhlíkové oceli P265GH, která je v obrázku nalevo a austenitické oceli 1.4541, která je umístěná napravo. Jako přídavný materiál byl rovněž použitý typ Sv-07Ch25N13. Tento heterogenní spoj, byl odebrán z potrubí o velikosti  $\text{Ø}273 \times 6,3$  mm. Označená oblast (C) o rozměrech přibližně 40 x 30 mm byla použita pro metalografický rozbor.



Obrázek 21 – Vzorek D

Na obrázku č. 21 lze vidět vzorek D, jedná se o homogenní svarový spoj z uhlíkové oceli P265GH. Svařování probíhalo se svařovacím drátem typu Carborod 1. Tento svarový spoj byl odebraný z potrubí, které mělo rozměry  $\text{Ø}108 \times 4,0$  mm. Označené místo (D) bylo použité pro makroskopickou a mikroskopickou dokumentaci a mělo rozměry přibližně 40 x 30 mm.

Vzorky byly rozřezány na ruční rozbrušovací pile typu Struers Discotom 6 (obrázek č. 22). Nařezané vzorky byly zapouzdřeny za působení tepla a tlaku do epoxidové pryskyřice Epofix (viz. obrázek č. 23), nakonec se vzorky nechaly vytvrdnout ve vakuu.



Obrázek 22 – Nařezaný vzorek A, před lisováním do tablet

Zalisované vzorky byly zbrušeny a vyleštěny na metalografické brusce Struers TegraPol – 35. Zařízení je zcela automatické, broušení i leštění probíhalo za mokra na brusných papírech o různých zrnitostech. Po vyleštění byl vzorek z oceli P265GH leptán 2 % roztokem Nitalu (kyselina dusičná) a vzorky z austenitické oceli byly leptány elektrolyticky v 10 % kyselině šťavelové.

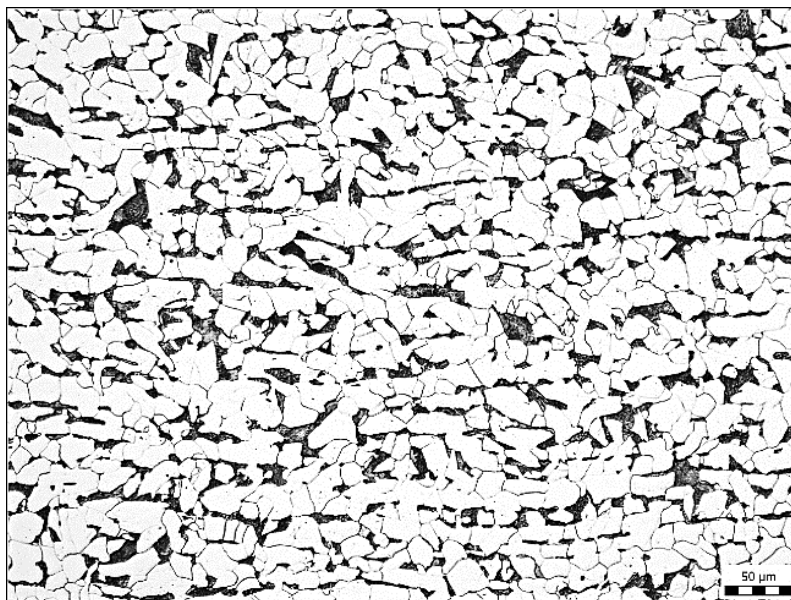


Obrázek 23 – Zkušební vzorky, zalisované do tablet

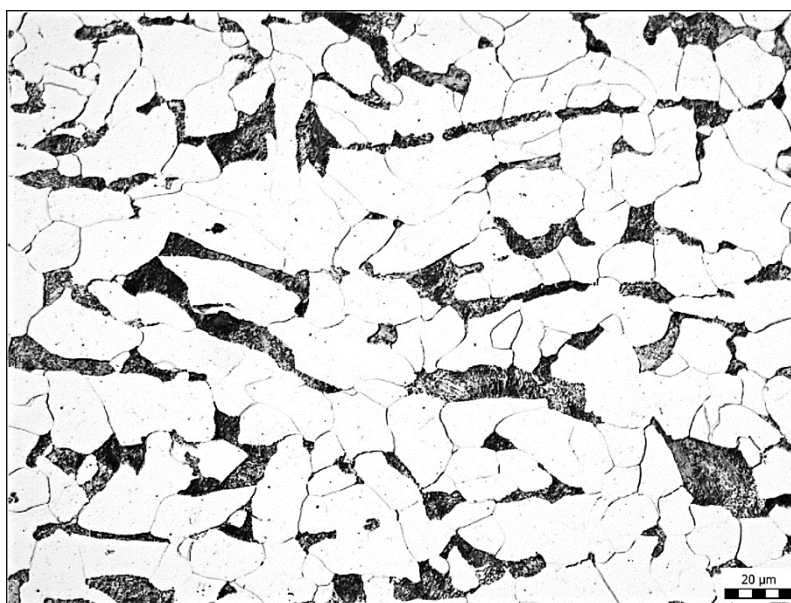
## 7 METALOGRAFICKÁ ANALÝZA SVAROVÝCH SPOJŮ

Kapitola obsahuje makroskopickou a mikroskopickou dokumentaci základních materiálů a svarových spojů.

### 7.1 Základní materiál č. 1 – uhlíková ocel P265GH



Obrázek 24 – Uhlíková ocel P265GH (200× zvětšení)

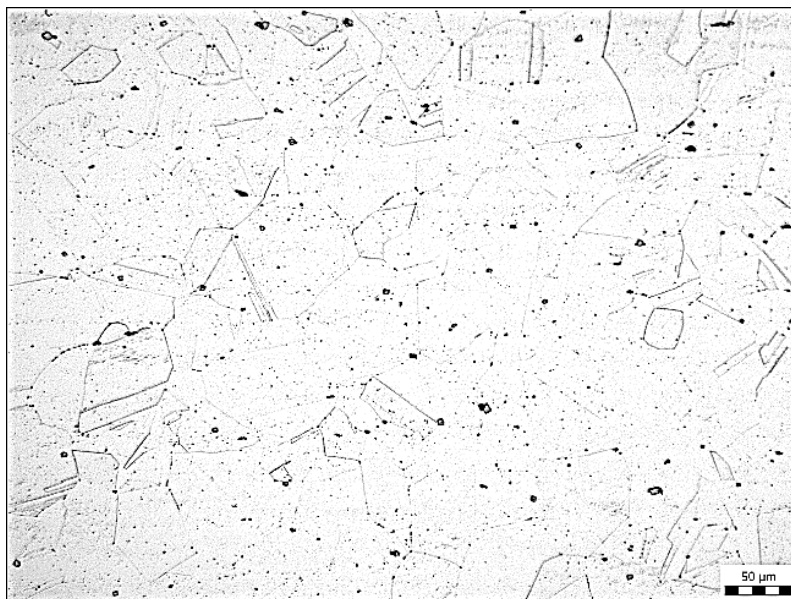


Obrázek 25 – Uhlíková ocel P265GH, detail (500× zvětšení)

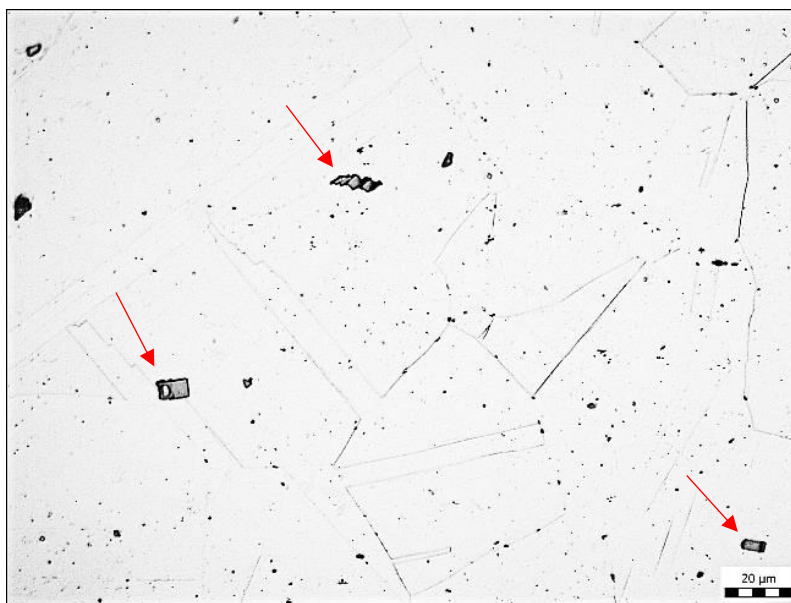
Na obrázcích č. 24 a č. 25 lze vidět základní materiál č. 1, který má označení P265GH. Jeho mikrostruktura byla rovnoměrná a řádkovitá. Struktura byla tvořená zrny feritu a modulemi perlitu, které vykazovaly známky popuštění.



## 7.2 Základní materiál č. 2 – austenitická ocel 1.4541



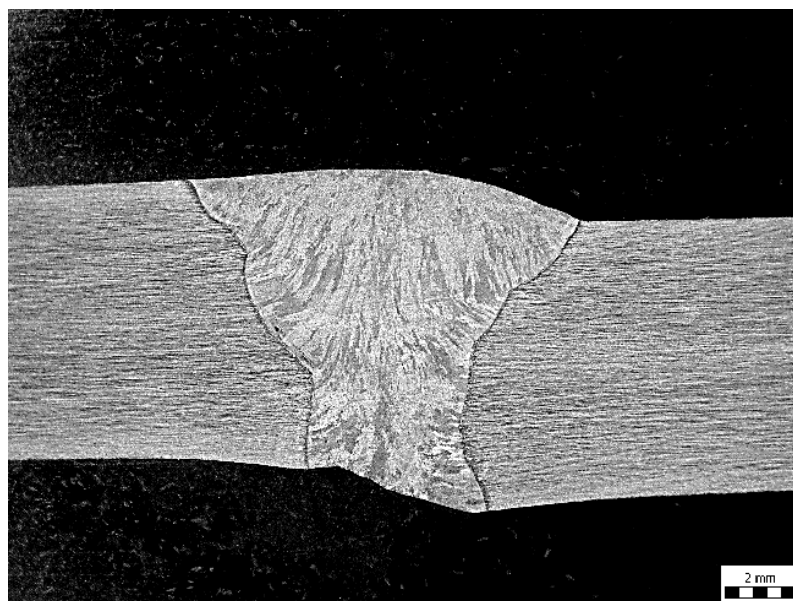
Obrázek 26 – Austenitická ocel 1.4541 (200× zvětšení)



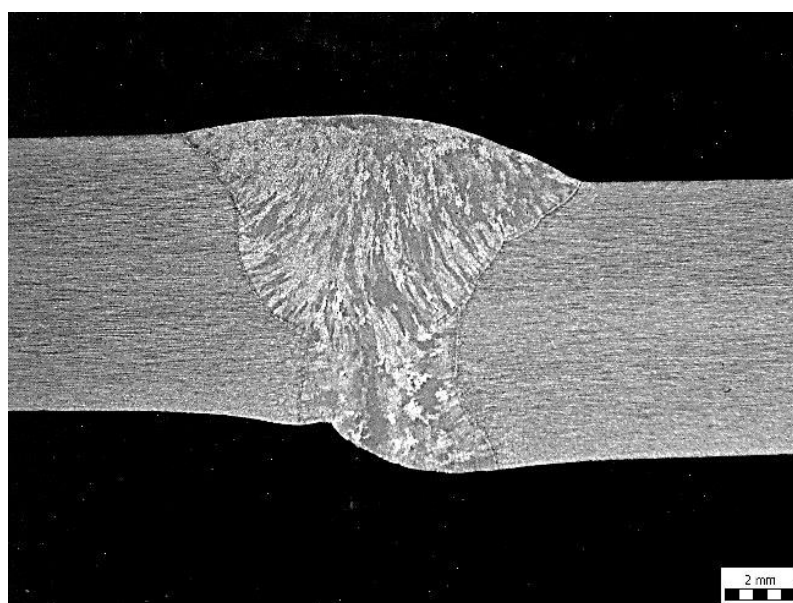
Obrázek 27 – Austenitická ocel 1.4541, detail (500× zvětšení)

Na obrázcích č. 26 a č. 27 lze vidět základní materiál č. 2, který se označuje 1.4541. Jeho mikrostruktura byla tvořena zrny austenitu a karbidy, které byly ojediněle vyloučeny uvnitř i po hranicích zrn. Dále materiál vykazoval přítomnost karbonitridů titanu, které jsou na obrázku č. 27 označeny šipkami. Uvnitř austenitických zrn se místy vyskytovaly deformační dvojčata.

### 7.3 Vzorek A – homogenní svarový spoj, austenitická ocel 1.4541 a přídavný materiál Inertrod 316LSi

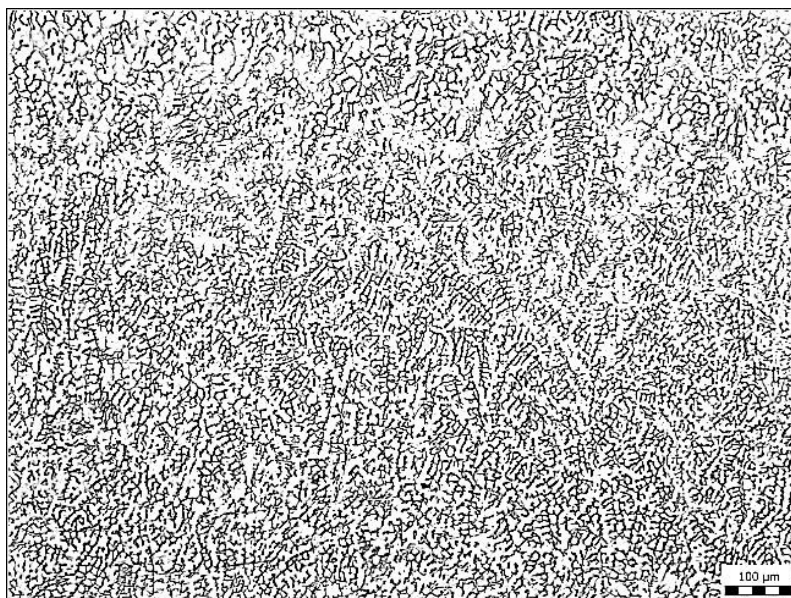


Obrázek 28 – Vzorek A, makrostruktura č. 1



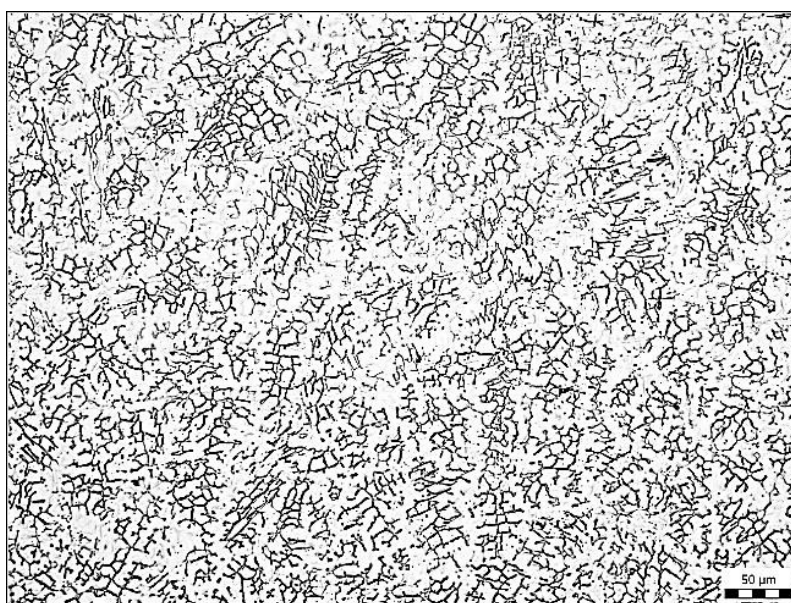
Obrázek 29 – Vzorek A, makrostruktura č. 2

Obrázky č. 28 a č. 29 zobrazují makrostrukturu homogenního svarového spoje austenit/austenit (ocel 1.4541) s přídavným materiálem Inertrod 316LSi. Pro hodnocení makrostruktury byly vytvořeny dva kontrolní řezy č. 1 a č. 2. Makrostruktura svarového spoje vykazuje mírné přesazení svařovaných částí, toto přesazení způsobilo v kořenové oblasti vrub, dále byl svarový spoj bez makroskopických defektů.



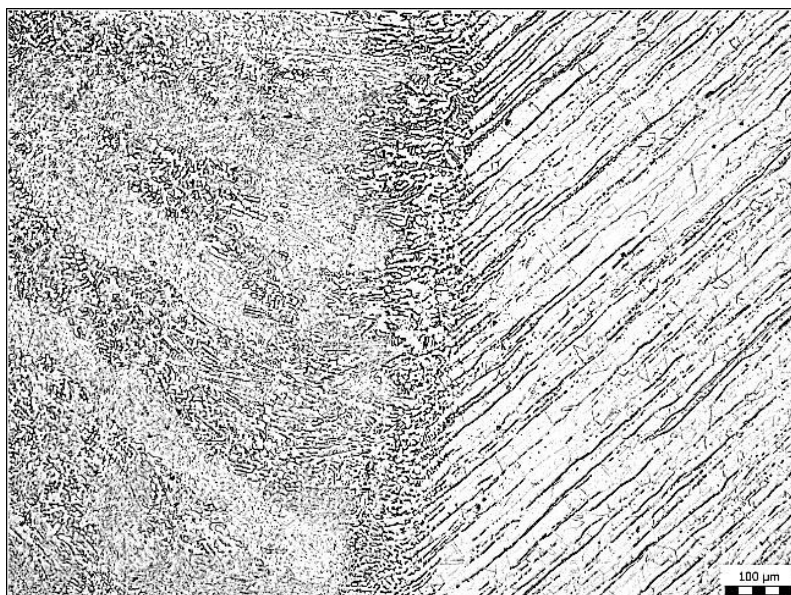
Obrázek 30 – Vzorek A, svarový kov (100× zvětšení)

Obrázek č. 30 zobrazuje svarový kov vzorku A, mikrostruktura svarového kovu byla lící, tvořená austenitem s delta feritem.



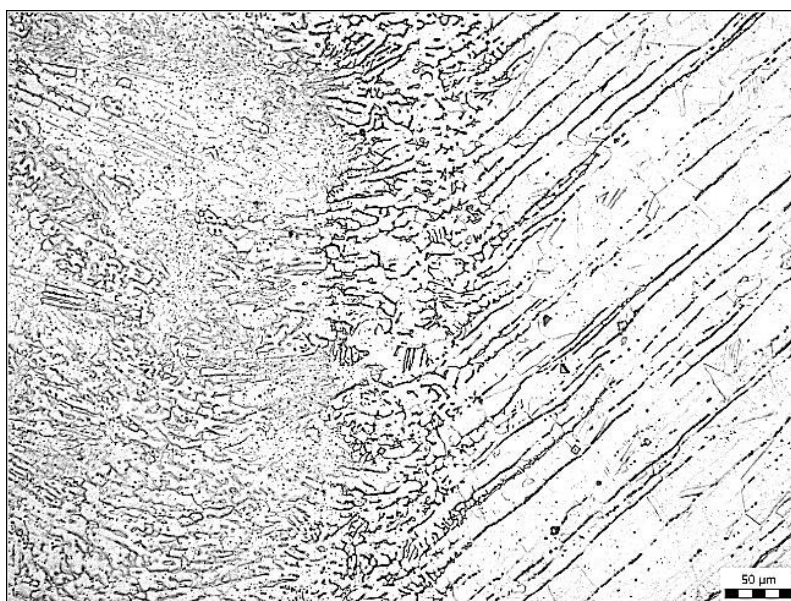
Obrázek 31 – Vzorek A, svarový kov, detail (200× zvětšení)

Na obrázku č. 31 je vyobrazen detail mikrostruktury svarového kovu. Mikrostruktura svarového kovu byla lící, tvořená delta feritem a zrný austenitu.



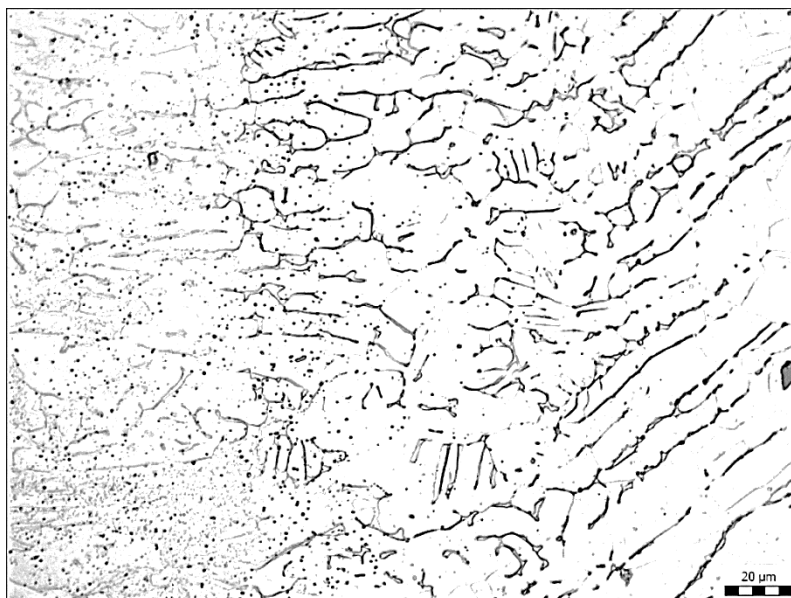
Obrázek 32 – Vzorek A, hranice ztavení (100× zvětšení)

Obrázek č. 32 zobrazuje hranici ztavení. Mikrostruktura hranice ztavení byla rovněž austenitická s delta feritem. Na obrázku č. 33 lze vidět tenkou přechodovou vrstvou, která měla mikrostrukturu austenitickou s delta feritem, ale odlišně uspořádanou než ve svarovém kovu.



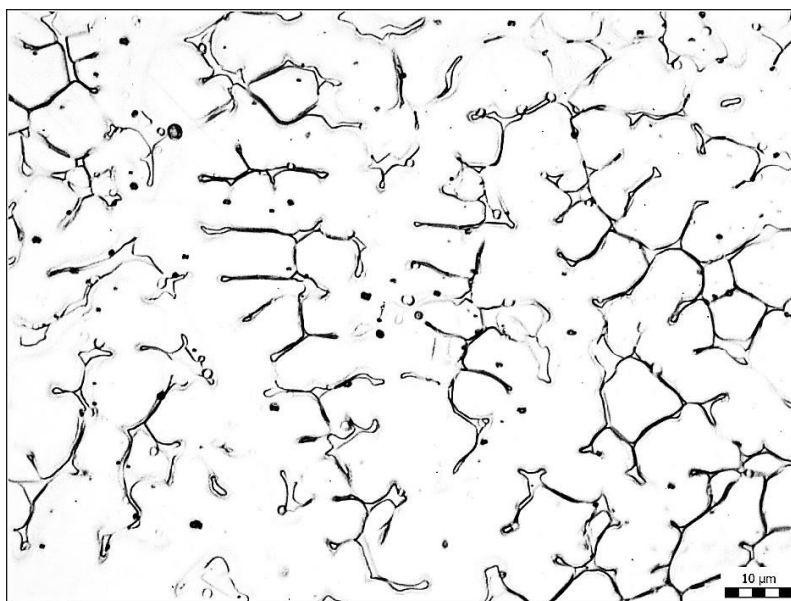
Obrázek 33 – Vzorek A, detail hranice ztavení (200× zvětšení)

Na obrázku č. 33 lze vidět detail hranice ztavení, tento detail byl zaměřen na přechodovou vrstvu mezi svarovým kovem a základním materiálem, mikrostruktura přechodové vrstvy byla austenitická s delta feritem. Přechodová vrstva měla šířku přibližně 70 až 100 μm.



Obrázek 34 – Vzorek A, detail hranice ztavení (500× zvětšení)

Na obrázku č. 34 je vyobrazený detail hranice ztavení mezi základním materiálem a svarovým kovem. Lze vidět mikrostrukturu austenitickou s delta feritem, struktura byla odlišně uspořádána než ve svarovém kovu.

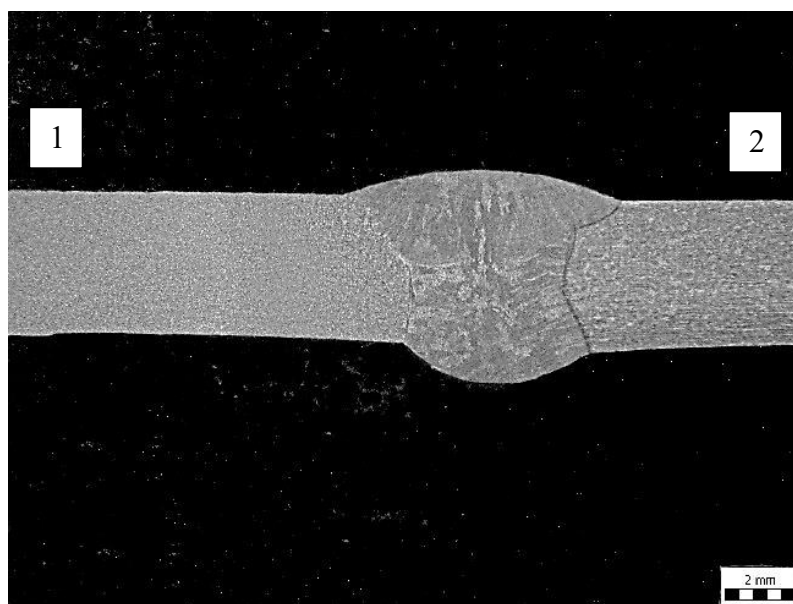


Obrázek 35 – Vzorek A, detail hranice ztavení, mikrostruktura přechodové oblasti (1000× zvětšení)

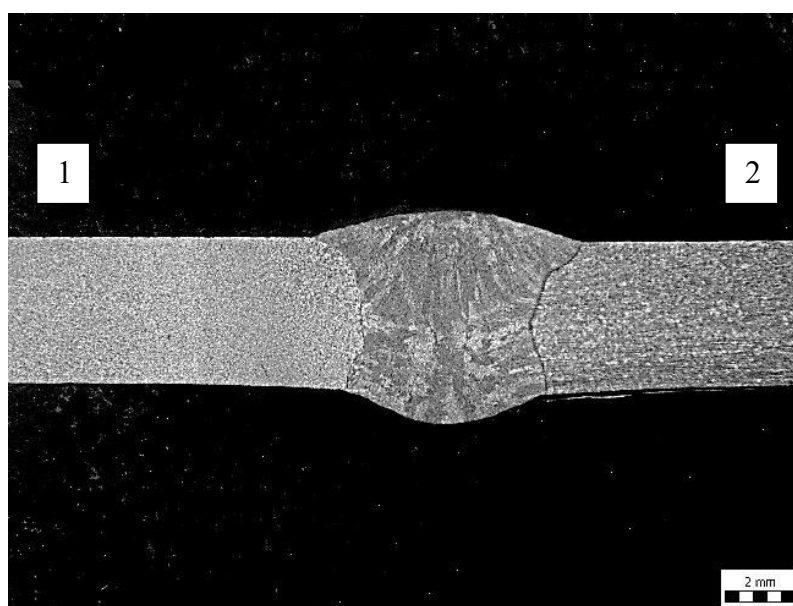
Na obrázku č. 35 lze vidět mikrostrukturu přechodové oblasti mezi základním materiálem a svarovým kovem. Mikrostruktura byla austenitická a v mezidendritických prostorech lze vidět vyloučený delta ferit.

#### 7.4 Vzorek B – heterogenní svarový spoj, austenitická ocel 1.4541 a uhlíková ocel P265GH, přídatný materiál Sv-07Ch25N13

Pro hodnocení makrostruktury byly vytvořeny dva kontrolní řezy, č. 1 a č. 2.

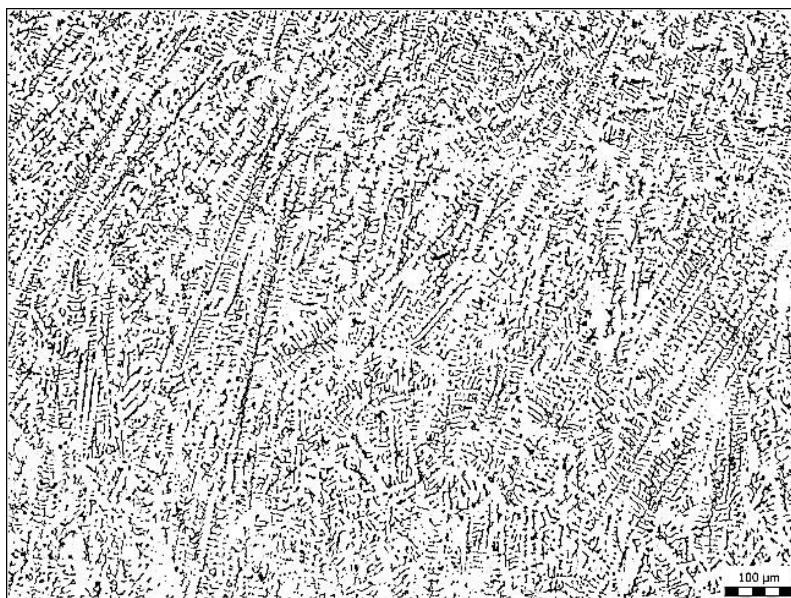


Obrázek 36 – Vzorek B, makrostruktura č. 1



Obrázek 37 – Vzorek B, makrostruktura č. 2

Na obrázcích č. 36 a č. 37 lze vidět makrostrukturu heterogenního svarového spoje. Na levé straně je uhlíková ocel P265GH – (1) a na pravé straně je austenitická ocel 1.4541 – (2). Při svařování byl použitý přídatný materiál Sv-07Ch25N13. Na straně uhlíkové oceli byla patrná teplem ovlivněná oblast, která má šířku přibližně 4 až 4,5 mm. Na straně austenitické oceli není teplem ovlivněná oblast viditelná. I v tomto případě je svarový spoj prostý defektů.



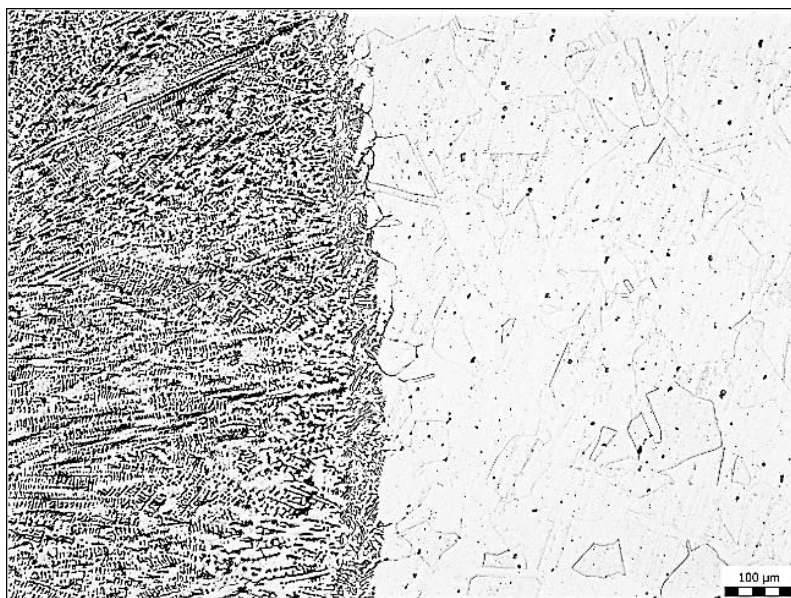
Obrázek 38 – Vzorek B, svarový kov (100× zvětšení)

Na obrázku č. 38 lze vidět svarový kov heterogenního svaru. Mikrostruktura svarového kovu byla lící, tvořená austenitem a delta feritem. Bylo patrné dendritické uspořádání.



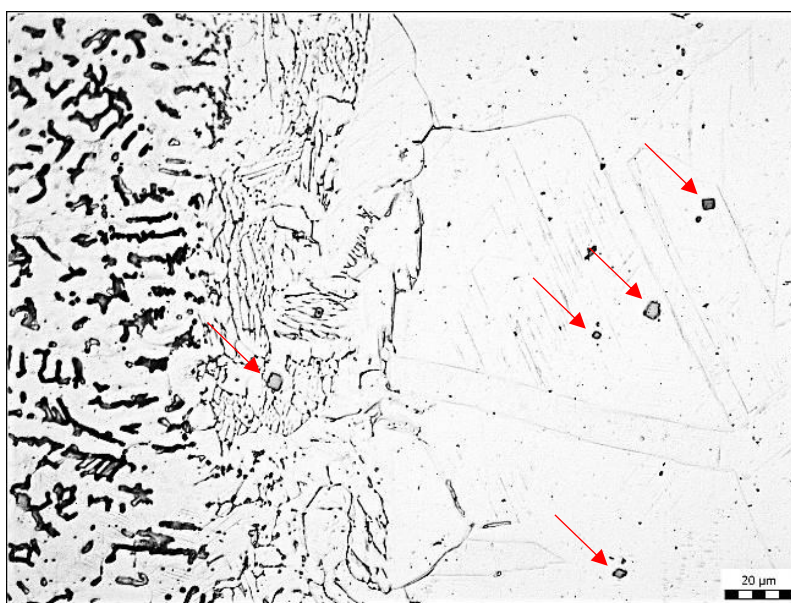
Obrázek 39 – Vzorek B, detail svarového kovu (500× zvětšení)

Obrázek č. 39 zobrazuje detail svarového kovu heterogenního svaru, lze vidět dendritické uspořádání kovu s vyloučeným delta feritem.



Obrázek 40 – Vzorek B, hranice ztavení na straně k austenitické oceli (100× zvětšení)

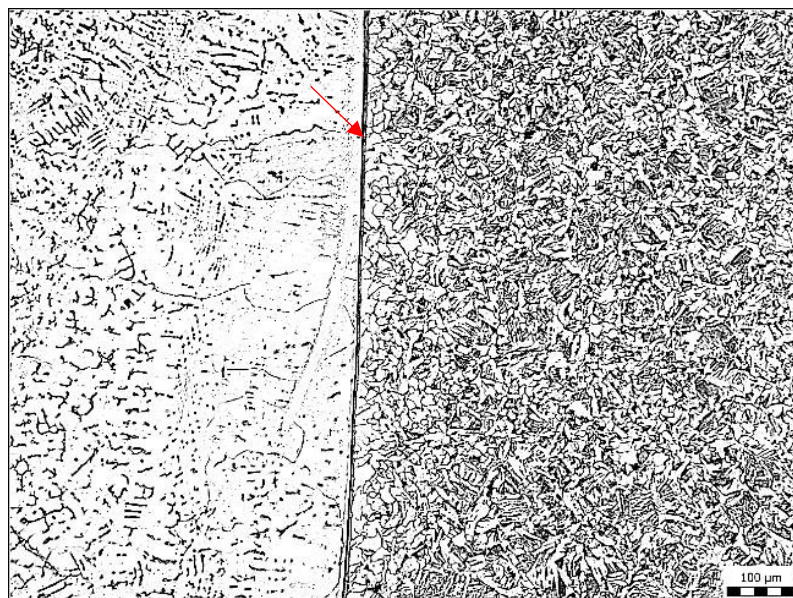
Mikrostruktura hranice ztavení směrem k základnímu materiálu, austenitické oceli (1.4541) je vyobrazená na obrázku č. 40. Mikrostruktura byla tvořena zrny austenitu.



Obrázek 41 – Vzorek B, detail hranice ztavení na straně k austenitické oceli (500× zvětšení)

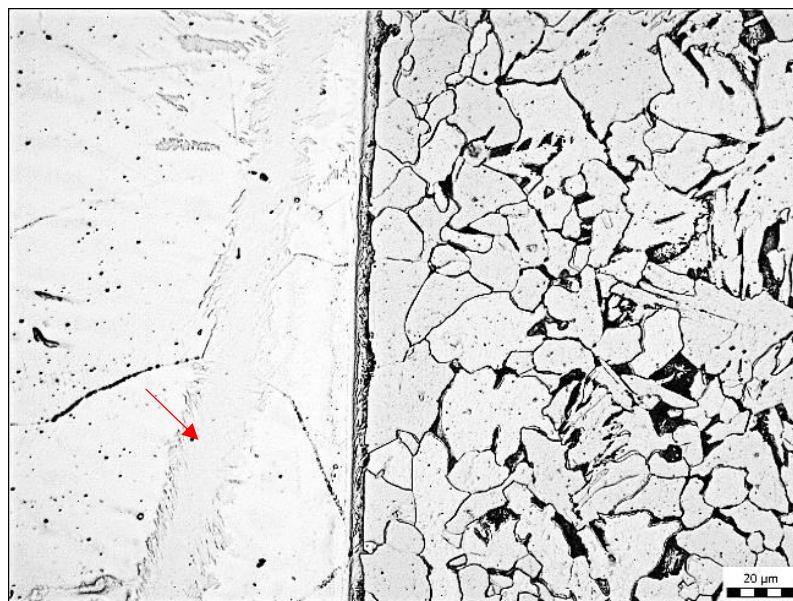
Na obrázku č. 41 je detail hranice ztavení směrem k austenitické oceli (1.4541). Mikrostruktura hranice ztavení byla tvořena zrny austenitu s deformačními dvojčaty a opět lze vidět karbonitridy titanu, které jsou vyznačeny šipkami.





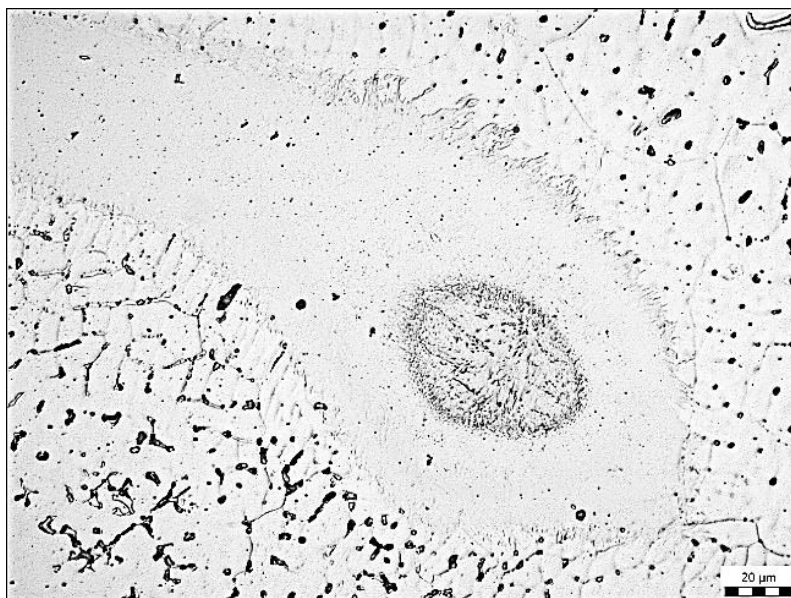
Obrázek 42 – Vzorek B, hranice ztavení na straně k uhlíkové oceli (100× zvětšení)

Hranice ztavení směrem k uhlíkové oceli (P265GH) je zobrazena na obrázku č. 42. Mikrostruktura byla tvořena feritem, perlitem a bainitem. Na hranici ztavení se vyskytovalo souvislé tenké pásmo o šířce 5 až 10  $\mu\text{m}$  (viz. šipka). Pravděpodobně bylo pásmo obohacené o chrom a mikrostruktura v tomto pásmu byla tvořena jehlicovitou martenzitickou strukturou.



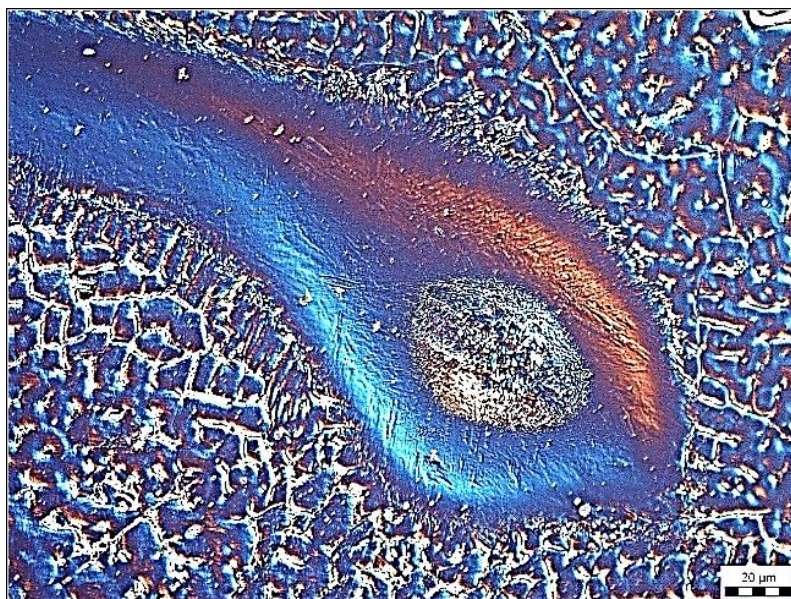
Obrázek 43 – Vzorek B, detail hranice ztavení na straně k uhlíkové oceli (500× zvětšení)

Na obrázku č. 43 lze vidět detail hranice ztavení směrem k uhlíkové oceli (P265GH), mikrostruktura byla tvořena perlitem, bainitem, feritem a martenzitem (viz. šipka).



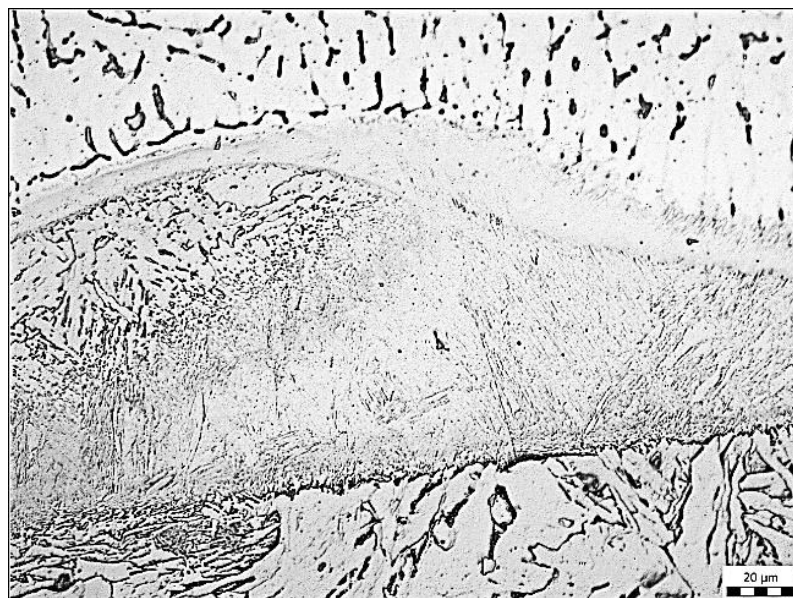
Obrázek 44 – Vzorek B, vměstek (500× zvětšení)

Na obrázku č. 44 lze vidět vměstek kovového charakteru. Tento vměstek byl nalezený ve svarovém kovu, blíže k uhlíkové oceli, kde se pravděpodobně dostal nedokonalým promísením svarového kovu se základním materiálem.



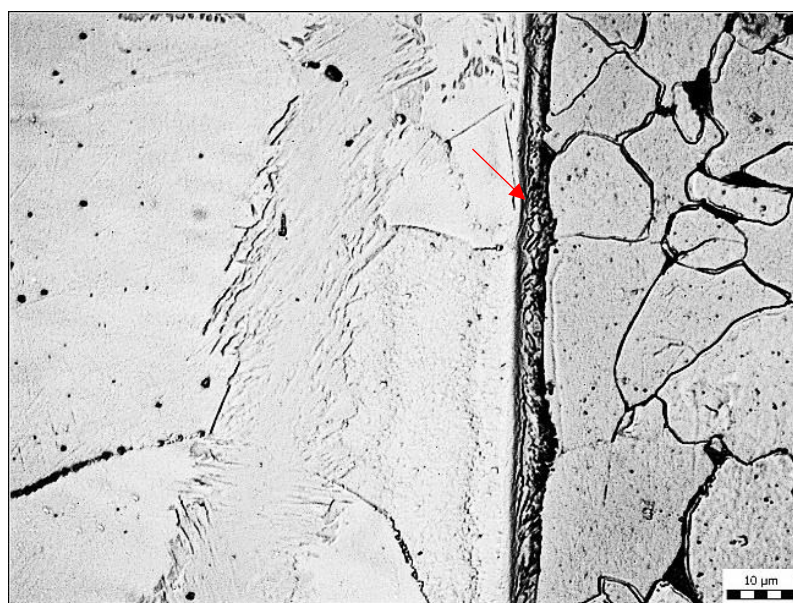
Obrázek 45 – Vzorek B, vměstek, polarizační pole (500× zvětšení)

Obrázek č. 45 zobrazuje vměstek ve svarovém kovu. Kolem vměstku bylo patrné jehlicovité uspořádání struktury, které bylo znázorněné v polarizačním poli.



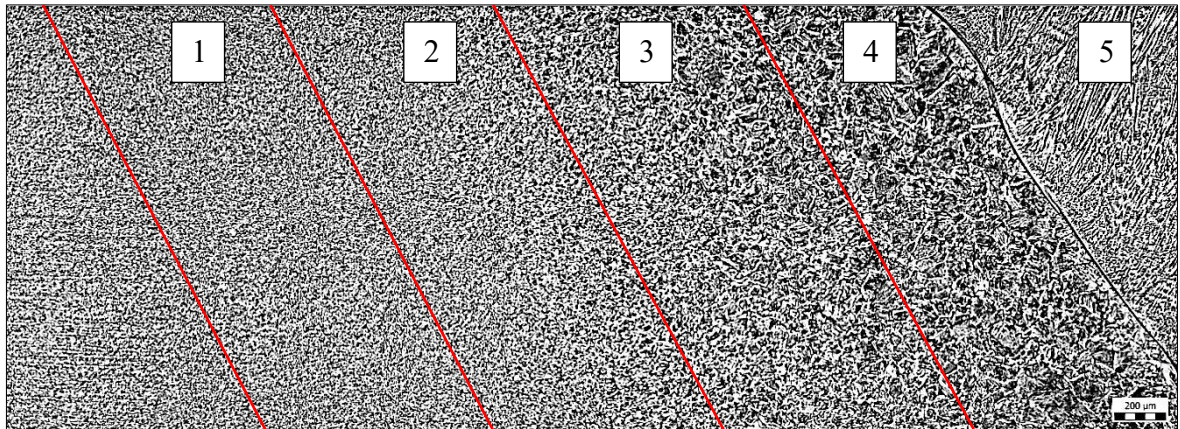
Obrázek 46 – Vzorek B, detail hranice ztavení na straně k uhlíkové oceli (500× zvětšení)

Detail hranice ztavení směrem k uhlíkové oceli je zobrazen na obrázku č. 46. Lze opět vidět jehlicovité uspořádání martenzitické struktury.



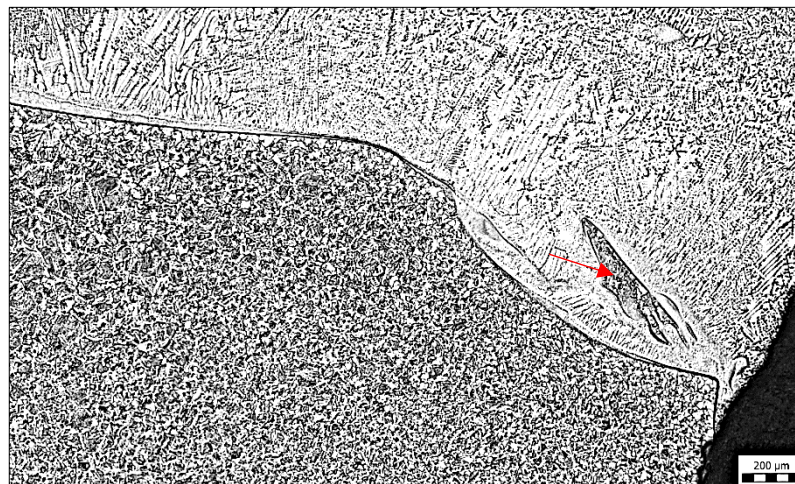
Obrázek 47 – Vzorek B, detail hranice ztavení na straně k uhlíkové oceli (1000× zvětšení)

Na obrázku č. 47 je detail hranice ztavení směrem k uhlíkové oceli, znovu byla vyobrazená tenká souvislá přechodová vrstva (viz. šipka). Tato přechodová vrstva byla po celé linii svarového spoje a její mikrostruktura byla martenzitická.



Obrázek 48 – Vzorek B, TOO (50× zvětšení)

Pro názornost byla zdokumentována část teplem ovlivněné oblasti na straně uhlíkové oceli, kde jsou viditelné jednotlivá pásma TOO. 1 – vyžíhaná oblast, 2 – oblast částečné překrystalizace, 3 – oblast normalizace, 4 – přehřátá oblast, 5 – svarový kov. Teplem ovlivněná oblast byla vyobrazená na obrázku č. 48.

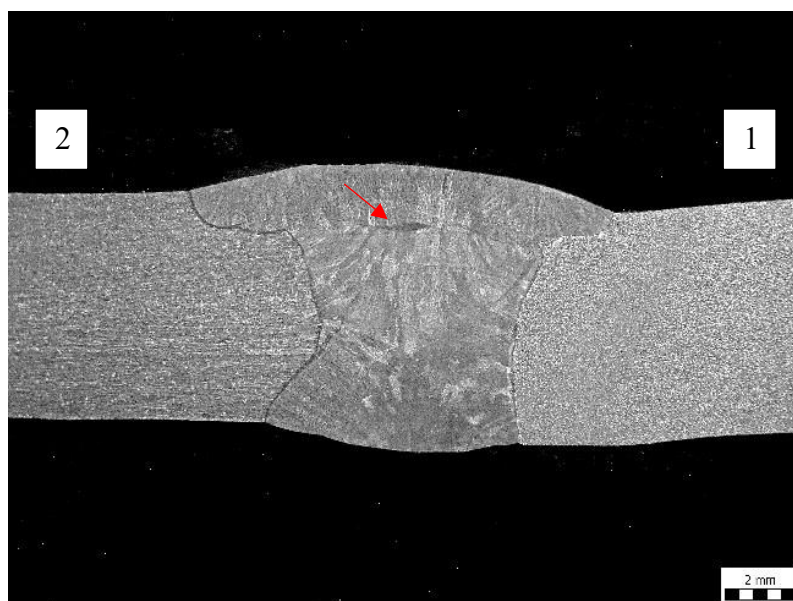


Obrázek 49 – Vzorek B, detail hranice ztavení u kořene, na straně k uhlíkové oceli (50× zvětšení)

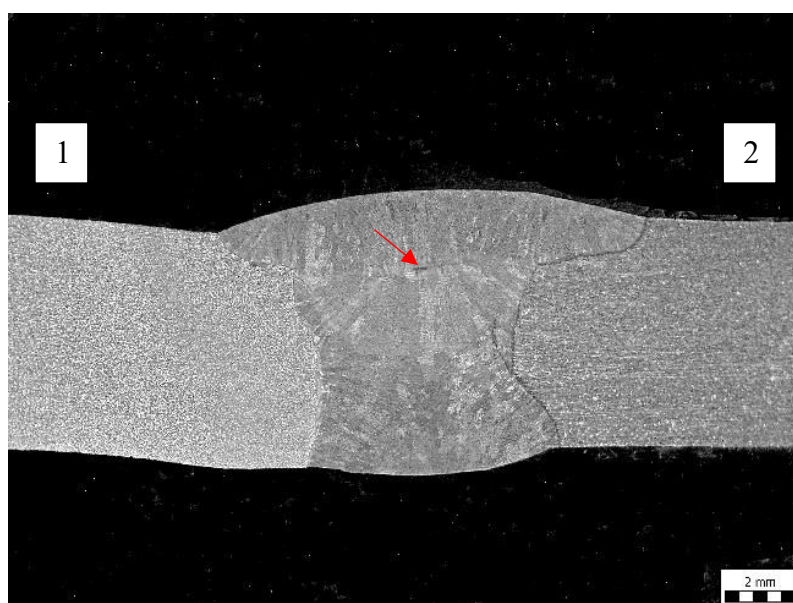
Na obrázku č. 49 lze vidět hranici ztavení u kořene na straně k uhlíkové oceli. Ve svarovém kovu byl nalezený kovový vměstek (viz. šipka), ze základního materiálu, přesněji z uhlíkové oceli P265GH. Mikrostruktura hranice ztavení byla jehlicovitého charakteru a byla tvořená martenzitickou strukturou.

## 7.5 Vzorek C – heterogenní svarový spoj, austenitická ocel 1.4541 a uhlíková ocel P265GH, přídavný materiál Sv-07Ch25N13

Pro hodnocení makrostruktury byly vytvořeny dva kontrolní řezy, č. 1 a č. 2.

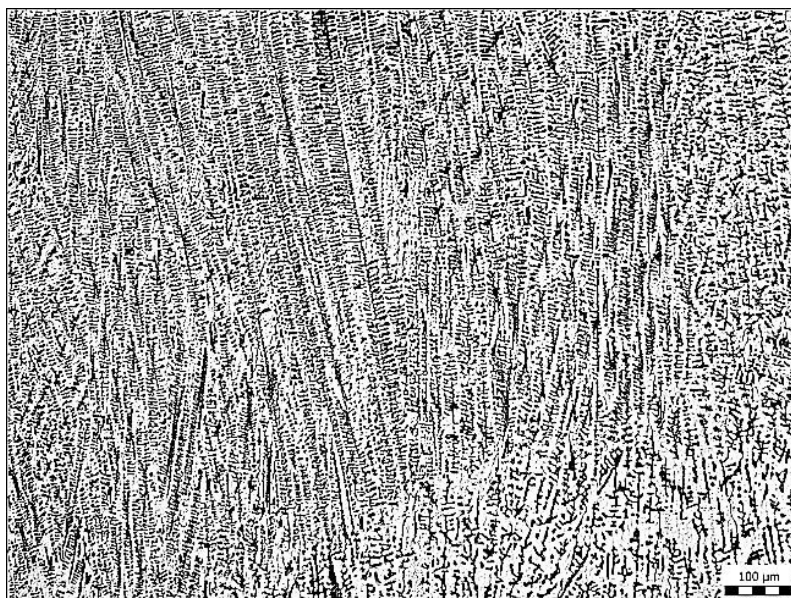


Obrázek 50 – Vzorek C, makrostruktura č. 1



Obrázek 51 – Vzorek C, makrostruktura č. 2

Na obrázcích č. 50 a č. 51 byly vyobrazeny makrostruktury heterogenního svarového spoje vzorku C. Na obrázku č. 50, byla na pravé straně uhlíková ocel P265GH – (1) a na levé straně byla austenitická ocel 1.4541 – (2), na obrázku č. 51 je to naopak. Ve svarovém kovu lze vidět kovový vměstek (viz. šipka), dále byl svarový spoj bez vad. Na straně uhlíkové oceli byla vidět teplem ovlivněná oblast, která měla šířku 5 až 5,5 mm.



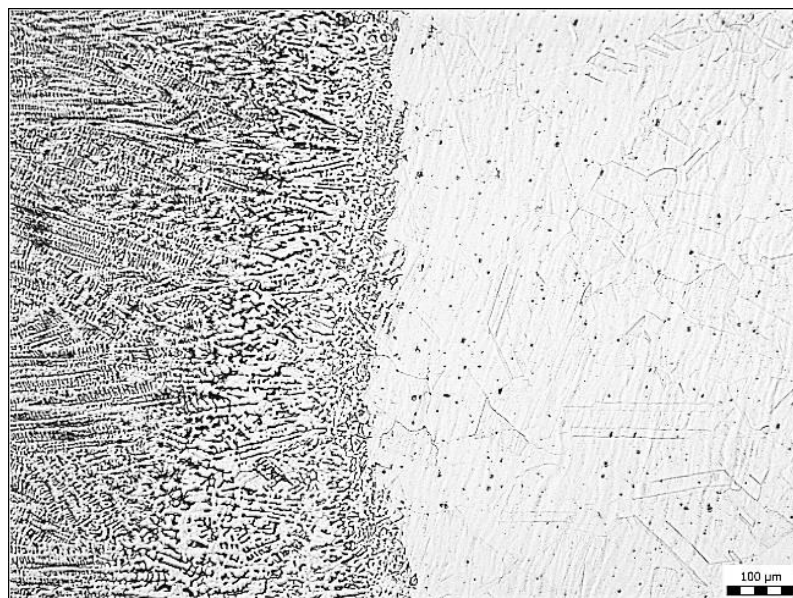
Obrázek 52 – Vzorek C, svarový kov (100× zvětšení)

Svarový kov heterogenního svarového spoje byl zobrazen na obrázku č. 52. Mikrostruktura byla lící, austenitická s vyloučeným delta feritem. Dále bylo patrné výrazné dendritické uspořádání.



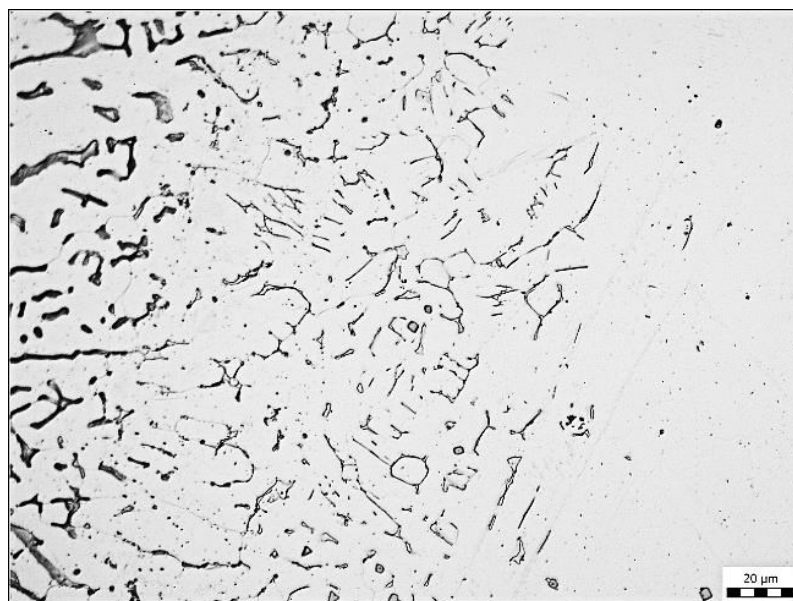
Obrázek 53 – Vzorek C, detail svarového kovu (500× zvětšení)

Na obrázku č. 53 lze vidět detail svarového kovu. Mikrostruktura svarového kovu byla lící, tvořená zrny austenitu s vyloučeným delta feritem. Uspořádání je dendritického charakteru.



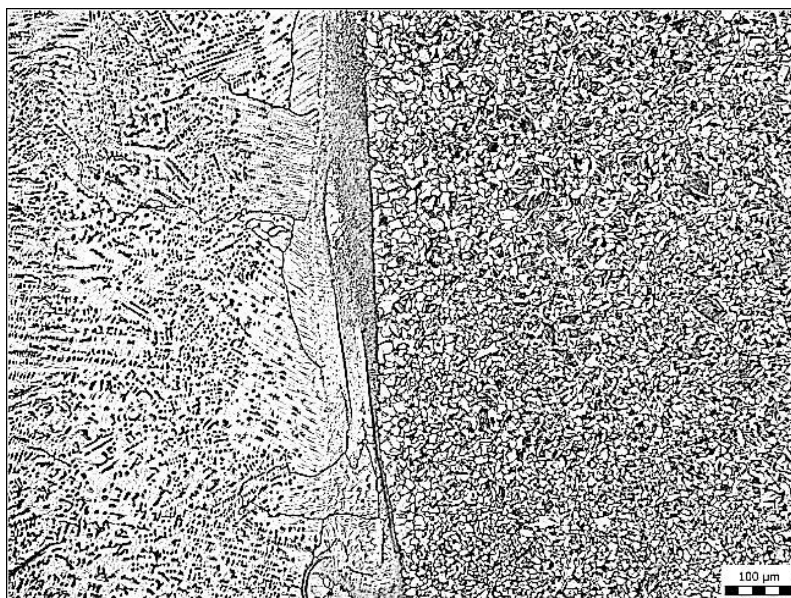
Obrázek 54 – Vzorek C, hranice ztavení na straně k austenitické oceli (100× zvětšení)

Obrázek č. 54 zobrazuje hranici ztavení směrem k austenitické oceli. Mikrostruktura byla tvořená austenitem s vyloučeným delta feritem. Dále byly na hranici ztavení přítomné karbonitridy titanu.



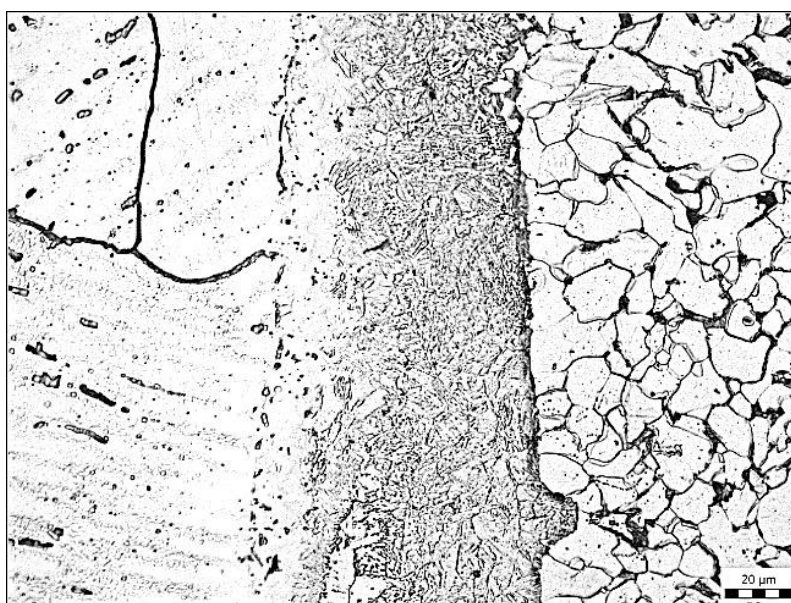
Obrázek 55 – Vzorek C, detail hranice ztavení na straně austenitické oceli (500× zvětšení)

Detail hranice ztavení na straně k austenitické oceli byl uveden na obrázku č. 55. Mikrostruktura byla lící, tvořená zrny austenitu s vyloučeným delta feritem. Opět lze vidět tenké přechodové pásmo mezi základním materiálem a svarovým kovem, toto pásmo mělo šířku přibližně 100 μm.



Obrázek 56 – Vzorek C, hranice ztavení na straně k uhlíkové oceli (100× zvětšení)

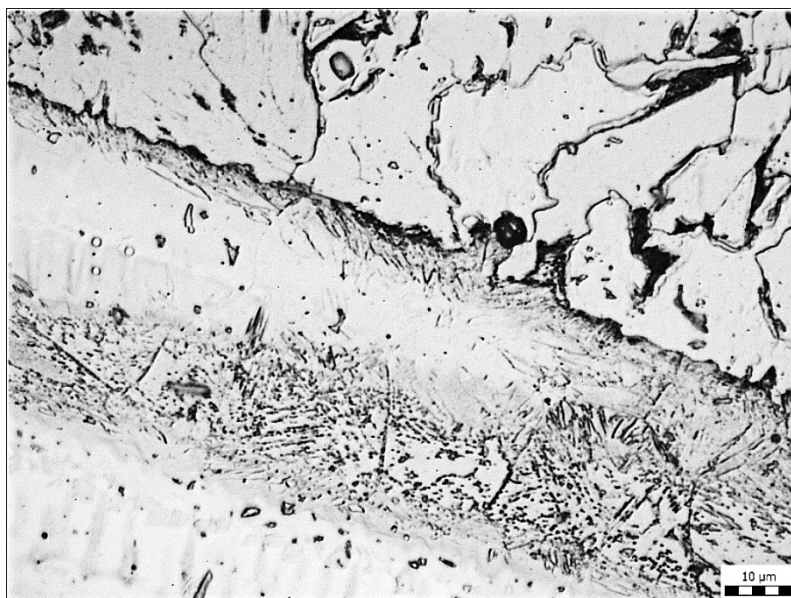
Na obrázku č. 56 lze vidět hranici ztavení směrem k uhlíkové oceli. Mikrostruktura byla tvořena feritem, perlitem a bainitem.



Obrázek 57 – Vzorek C, detail hranice ztavení na straně k uhlíkové oceli (500× zvětšení)

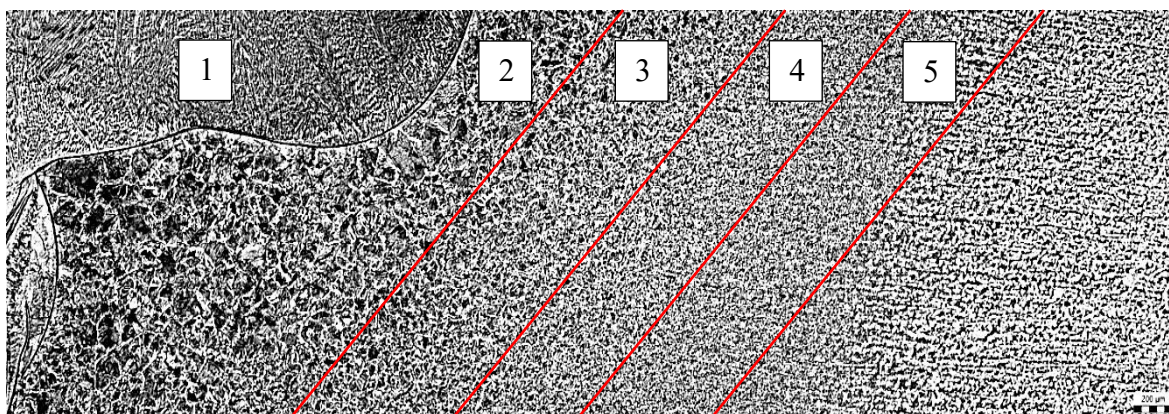
Obrázek č. 57 zobrazuje detail hranice ztavení směrem k uhlíkové oceli P265GH. Lze vidět téměř souvislé přechodové pásmo, které mělo jehlicovitou martenzitickou strukturu, pásmo mělo šířku přibližně 40 až 50 μm.





Obrázek 58 – Detail přechodového pásma na hranici ztavení (1000× zvětšení)

Na obrázku č. 58 byl vyobrazený detail přechodového pásma na hranici ztavení na straně uhlíkové oceli. Lze vidět, že mikrostruktura v pásnu byla jehlicovitá, martenzitická.

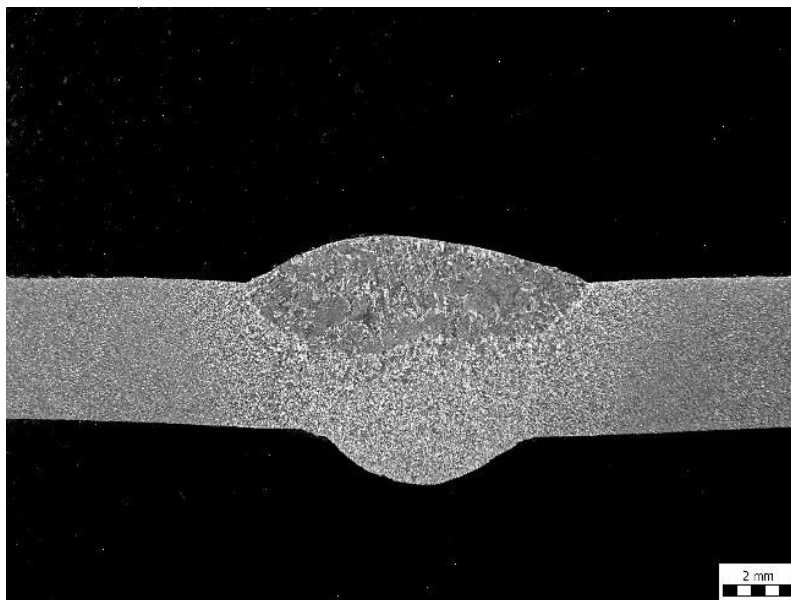


Obrázek 59 – Vzorek C, TOO (50× zvětšení)

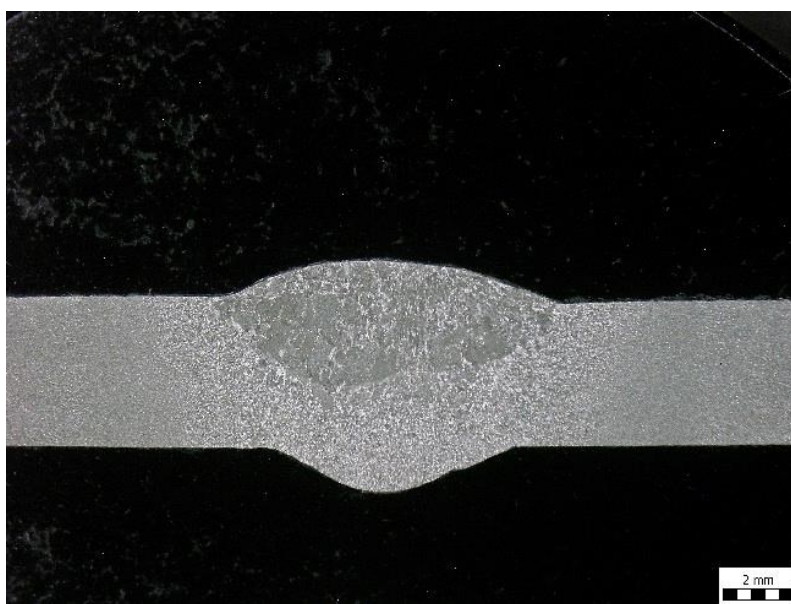
Teplem ovlivněnou oblast na straně uhlíkové oceli zobrazuje obrázek č. 59. Jednotlivá pásma jsou označena čísly 1 až 5. Svarový kov – 1, Přehřátá oblast – 2, pásmo normalizace – 3, pásmo částečné překrytí – 4 a vyžíhaná oblast – 5.

## 7.6 Vzorek D – homogenní svarový spoj, uhlíková ocel P265GH a přídatný materiál Carborod 1

Pro hodnocení makrostruktury byly vytvořeny dva kontrolní řezy, č. 1 a č. 2.

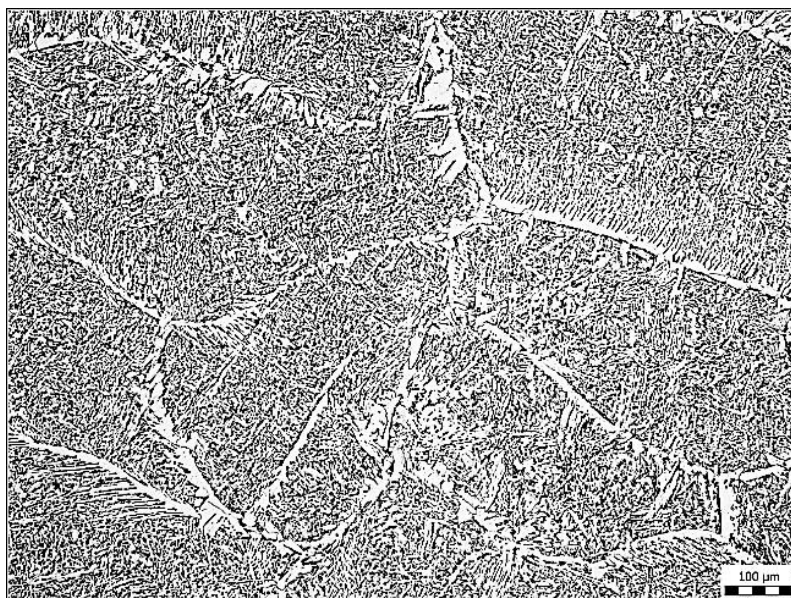


Obrázek 60 – Vzorek D, makrostruktura č. 1



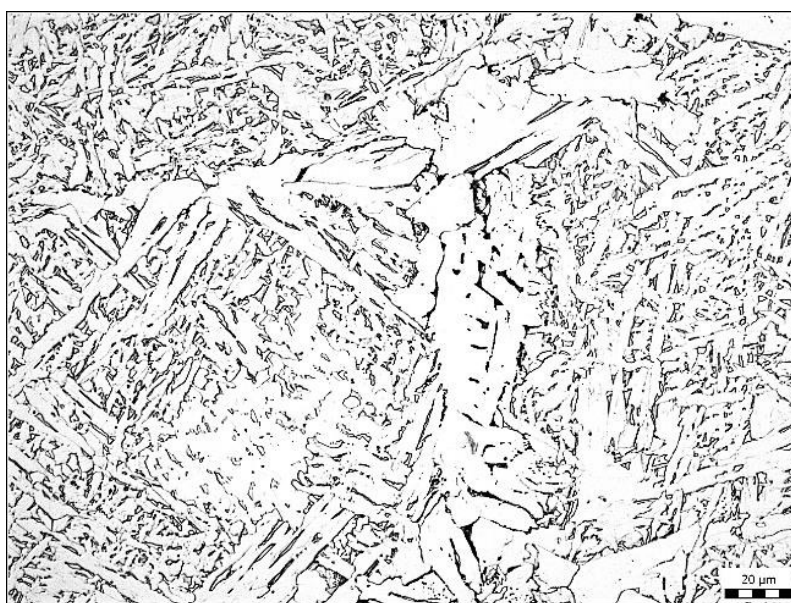
Obrázek 61 – Vzorek D, makrostruktura č. 2

Na obrázcích č. 60 a č. 61 lze vidět homogenní svarový spoj oceli P265GH, kde byl při svařování použitý drát typu Carborod 1. Na makrostruktúře byl vidět lehce převýšený kořen, dále svarový spoj nevykazuje vady. Teplem ovlivněné oblasti měly šířky přibližně 5 až 6 mm.



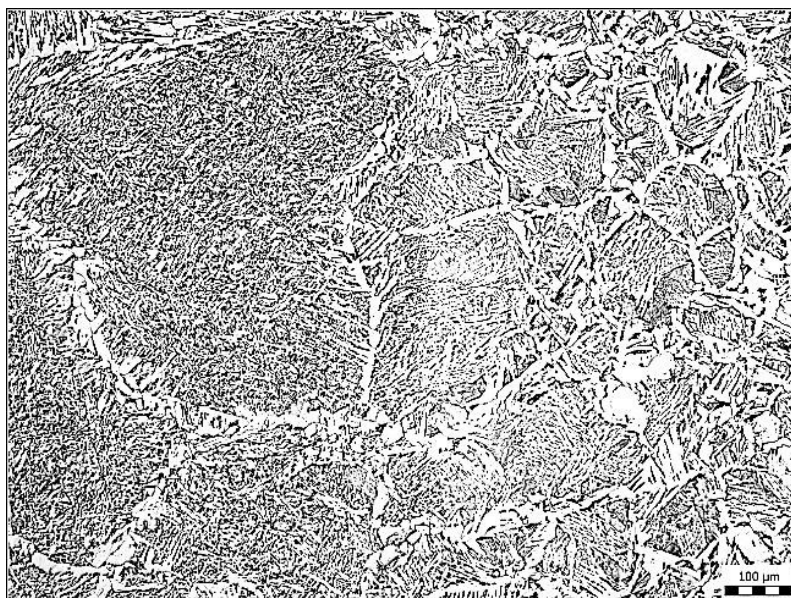
Obrázek 62 – Vzorek D, svarový kov (100× zvětšení)

Obrázek č. 62 zobrazuje mikrostrukturu svarového kovu. Mikrostruktura byla lící, vytvořená bainitem a feritem nesouvisle síťovým.



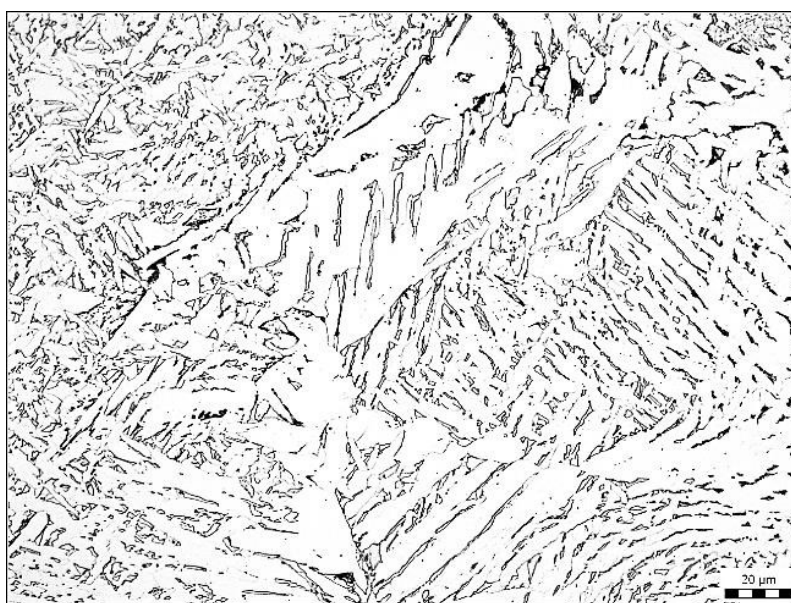
Obrázek 63 – Vzorek D, detail svarového kovu (500× zvětšení)

Na obrázku č. 63 lze vidět detail svarového kovu. Mikrostruktura svarového kovu byla bainiticko – feritická.



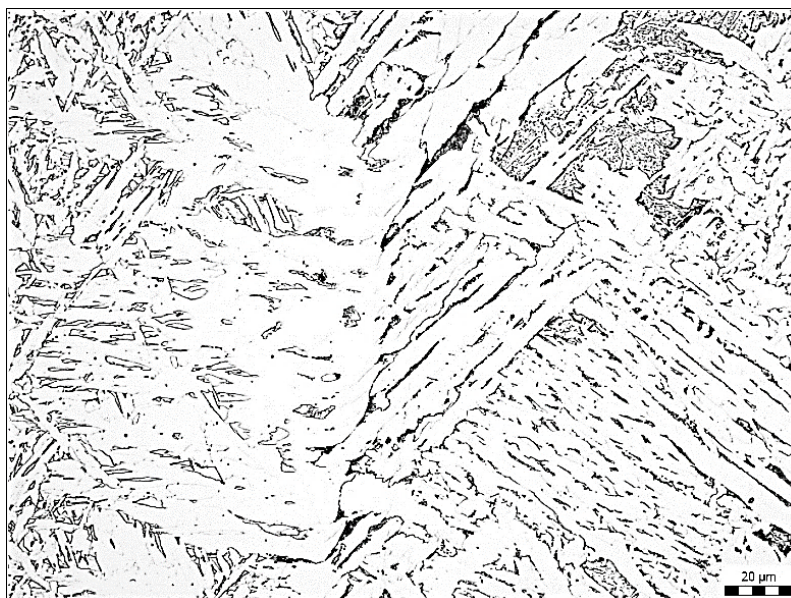
Obrázek 64 – Vzorek D, hranice ztavení (100× zvětšení)

Na hranici ztavení vyobrazené na obrázku č. 64 byla mikrostruktura hrubozrnná, tvořená opět bainitem a feritem nesouvisle síťovým.



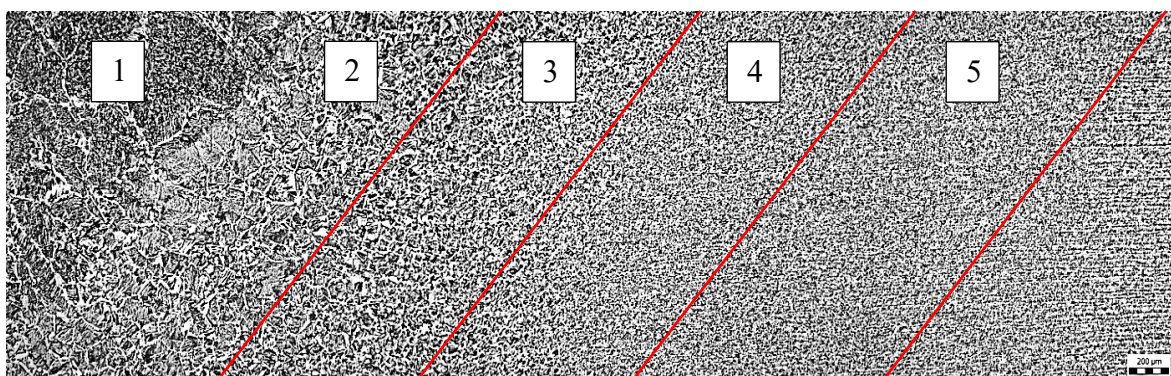
Obrázek 65 – Vzorek D, detail hranice ztavení (500× zvětšení)

Na obrázku č. 65 lze vidět detail hranice ztavení oceli P265GH. Mikrostruktura byla tvořená bainitem a nesouvisle síťovým feritem. Na hranici ztavení se ojediněle vyskytoval perlit.



Obrázek 66 – Vzorek D, detail hranice ztavení (500× zvětšení)

Obrázek č. 66 zobrazuje druhý detail hranice ztavení. Mikrostruktura byla tvořena bainitem a nesouvisle síťovým feritem, místy se vyskytoval perlit.



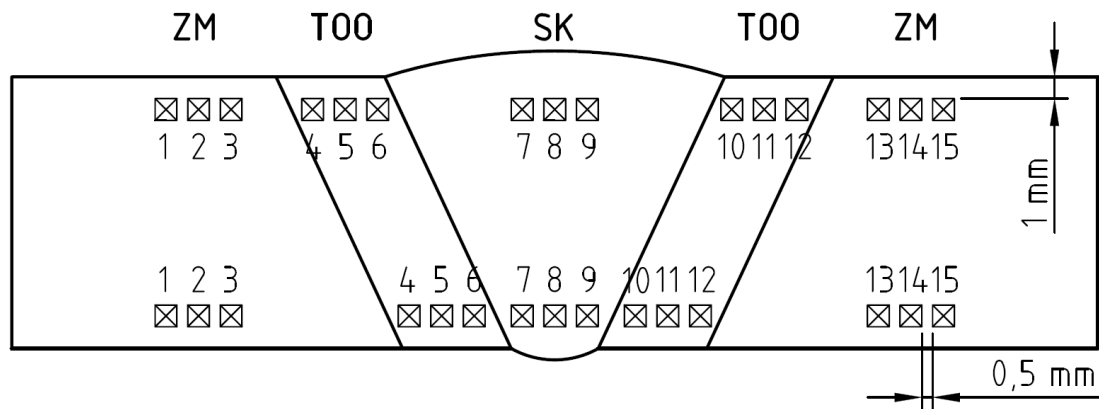
Obrázek 67 –Vzorek D, TOO (50× zvětšení)

Pro názornost byla zdokumentována teplem ovlivněná oblast oceli P265GH. Jednotlivá pásma byla definována a popsána. TOO lze vidět na obrázku č. 67. Svarový kov je označen číslem – 1, pásmo přehřátí – 2. Pásmo normalizace je označeno číslem – 3, pásmo částečné překrystalizace – 4 a vyžíhaná oblast – 5.

## 8 ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI

Měření mikrotvrdomosti probíhalo na přístroji LECO – LM247AT, byla měřena mikrotvrdomost dle Vickerse (HV 0,1). Přístroj umožňoval maximální zatížení 1000 g a byl vybaven ručním, manuálním a automatickým měničem objektivů. Dle zvoleného objektivu lze získat zvětšení od 2,5x až 100x. Tvrdomost byla vyhodnocena softwarově, podle měření rozměrů otlaků od vpichovacího tělesa. [25]

Zkouška mikrotvrdomosti byla hodnocena dle Vickerse a byla provedena na příčných řezech svarových spojů podle ČSN EN ISO 6507-1. Svarové spoje byly hodnoceny ve dvou liniích, na povrchu a u kořene, vždy ve vzdálenosti 1 mm od povrchu. V každé oblasti svarového spoje (ZM, TOO a SK) byly vytvořeny tři vpichy, které byly od sebe ve vzdálenosti 500  $\mu\text{m}$ . Vtlačovací indentor byl zatížen silou 0,98 N (HV0.1). Na obrázku č. 68 je uvedené schéma provedení vpichů.

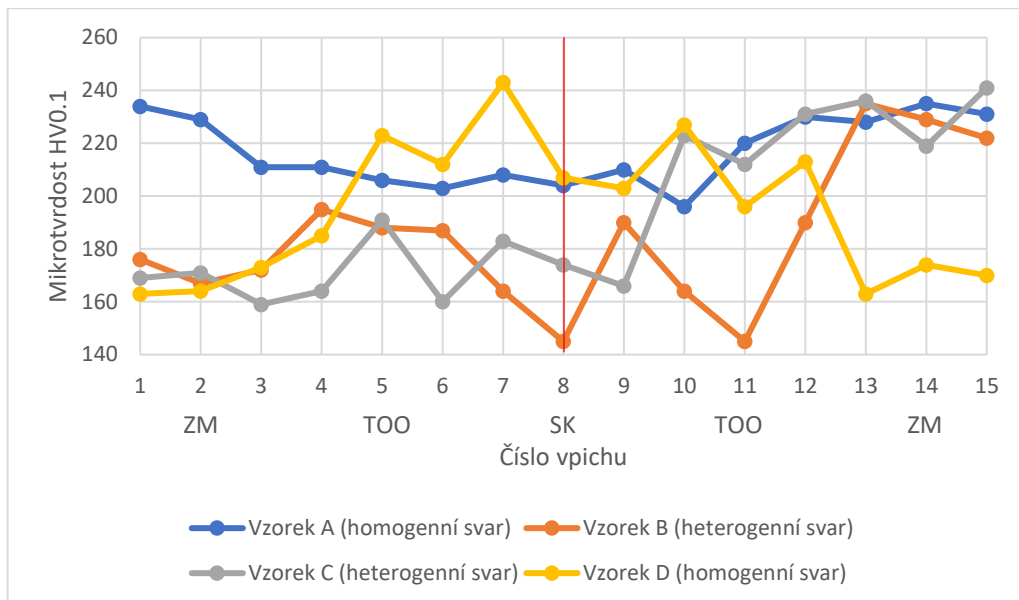


Obrázek 68 – Schéma vpichů při zkoušce mikrotvrdomosti (HV0.1)

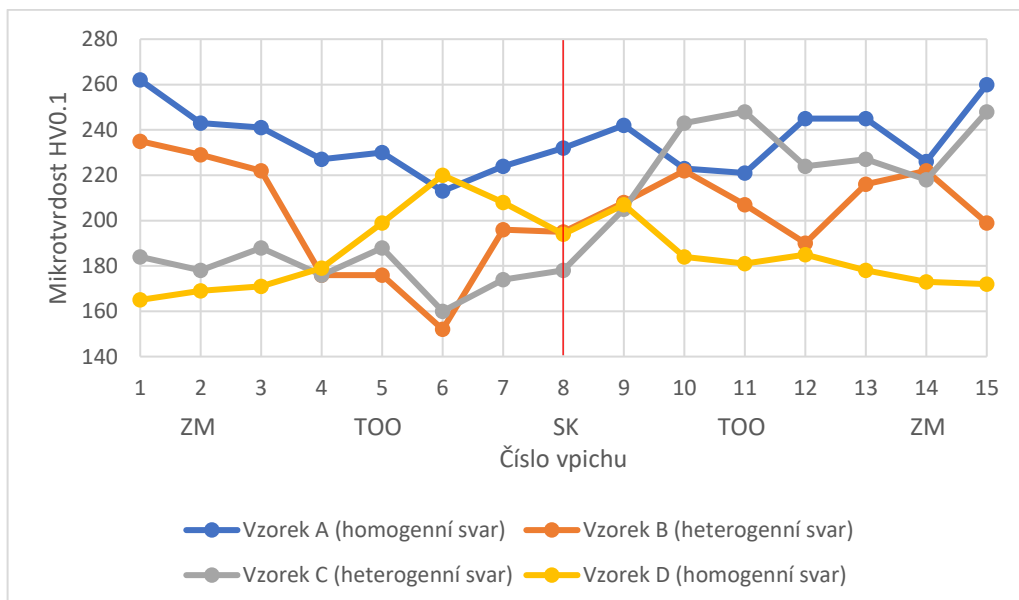
Hodnoty získané ze zkoušky mikrotvrdomosti byly zapsané do tabulky č. 17. Dále byly hodnoty vyneseny do grafů č. 1, 2, 3 a 4. Grafy č. 3 a 4 byly vytvořeny za účelem porovnání výsledků zkoušky mikrotvrdomosti, homogenních a heterogenních svarových spojů. Červená linka v bodě 8 charakterizuje osu svaru.

Tabulka 17 – Výsledky zkoušky mikrotvrdosti

Oblast svaru	Číslo vpichu	Vzorek A		Vzorek B		Vzorek C		Vzorek D	
		Povrch	Kořen	Povrch	Kořen	Povrch	Kořen	Povrch	Kořen
ZM	1	234	262	176	235	169	184	163	165
	2	229	243	167	229	171	178	164	169
	3	211	241	172	222	159	188	173	171
TOO	4	211	227	195	176	164	176	185	179
	5	206	230	188	176	191	188	223	199
	6	203	213	187	152	160	160	212	220
SK	7	208	224	164	196	183	174	243	208
	8	204	232	145	195	174	178	207	194
	9	210	242	190	208	166	205	203	207
TOO	10	196	223	164	222	223	243	227	184
	11	220	221	145	207	212	248	196	181
	12	230	245	190	190	231	224	213	185
ZM	13	228	245	235	216	236	227	163	178
	14	235	226	229	222	219	218	174	173
	15	231	260	222	199	241	248	170	172
<b>Průměr</b>		<b>217,1</b>	<b>235,6</b>	<b>184,6</b>	<b>203,0</b>	<b>193,3</b>	<b>202,6</b>	<b>194,4</b>	<b>185,7</b>

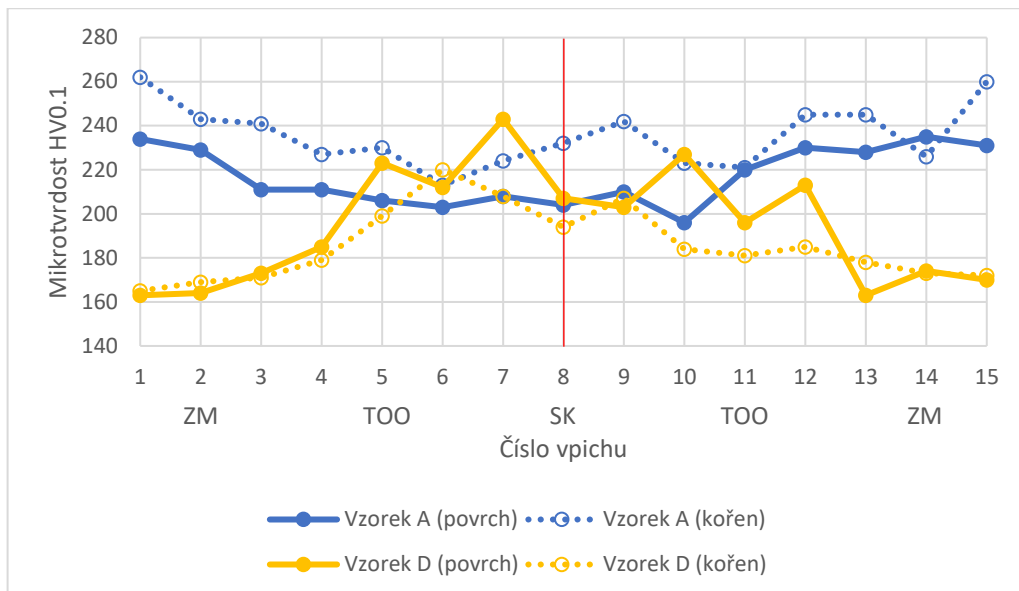


Graf 1 – Měření mikrotvrdosti na povrchu svarových spojů

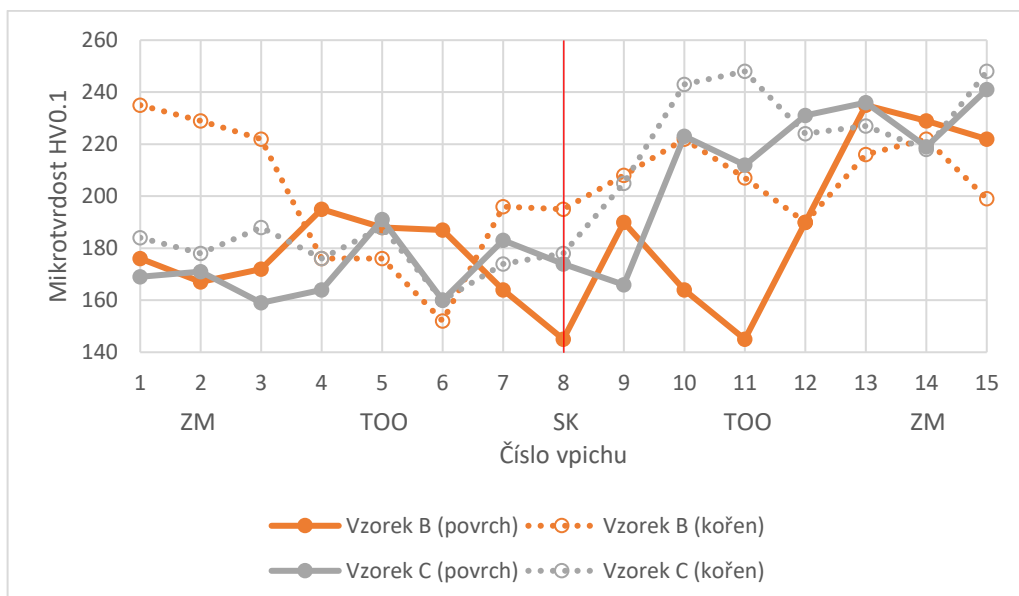


Graf 2 – Měření mikrotvrdosti v oblasti kořene svarových spojů





Graf 3 – Porovnání výsledků mikrotvrdości homogenních svarů



Graf 4 – Porovnání výsledků mikrotvrdości heterogenních svarů

## 9 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

### Hodnocení makrostruktury

#### Vzorek A – homogenní svarový spoj (austenit/austenit), materiál 1.4541

Na makrostrukturu vzorku A lze vidět, že při svařování došlo k menšímu přesazení jedné ze svařovaných částí (obr. č. 28), toto přesazení způsobilo vrub v kořenové oblasti. Dále makrostruktura vzorku A nevykazovala vady.

#### Vzorek B – heterogenní svarový spoj (austenit/ferit), materiál 1.4541 + P265GH

Svarový spoj vzorku B je prostý defektů. Na straně uhlíkové oceli byla patrná teplem ovlivněná oblast, která měla šířku 4 až 4,5 mm.

#### Vzorek C – heterogenní svarový spoj (austenit/ferit), materiál 1.4541 + P265GH

Makrostruktura svarového spoje vzorku C vykazovala vměstek o velikosti 0,5 až 2 mm (obr. č. 50 a 51), který byl umístěn v oblasti druhé svarové housenky. Na straně uhlíkové oceli byla rovněž patrná teplem ovlivněná oblast, která v tomto případě dosahovala šířky 5 až 5,5 mm.

#### Vzorek D – homogenní svarový spoj (ferit/ferit), materiál P265GH

Na makrostrukturu vzorku D lze vidět, že svarový spoj nevykazoval žádné vady, pouze měl lehce převýšený kořen. Teplem ovlivněná oblast měla šířku 5 až 6 mm.

### Hodnocení mikrostruktury

#### Vzorek A

Mikrostruktura svarového kovu byla licí, tvořená austenitem s delta feritem (obr. č. 31). Hranice ztavení byla rovněž austenitická s vyloučeným delta feritem, avšak obsahovala tenkou přechodovou vrstvu, tvořenou austenitickou strukturou s delta feritem (obr. č. 33), ale odlišně uspořádanou než ve svarovém kovu. Tloušťka této přechodové vrstvy dosahovala šířky 70 až 100  $\mu\text{m}$ .

#### Vzorek B

Svarový kov heterogenního svarového spoje byl licí, tvořený zrnny austenitu s vyloučeným delta feritem (obr. 38). Na mikrostrukturu bylo patrné dendritické uspořádání (obr. 39). Hranice ztavení směrem k austenitické oceli byla tvořená zrnny austenitu, uvnitř austenitických zrn se místy vyskytovaly deformační dvojčata. Dále se v základním materiálu i na hranici ztavení vyskytovaly karbonitridy titanu (obr. 41). Mikrostruktura na hranici ztavení směrem k uhlíkové oceli byla tvořená feritem, perlitem a bainitem (obr. 42). Dále se na hranici ztavení vyskytovalo tenké pásmo o šířce 5 až 10  $\mu\text{m}$ .

Pravděpodobně bylo pásmo obohacené o chrom a vznikla tak mikrostruktura martenzitická s jehlicovitým uspořádáním (obr. č. 43). Na straně k uhlíkové oceli, ve svarovém kovu byl nalezený vměstek kovového charakteru (obr. č. 44). Pravděpodobně vznikl nedokonalým promísením základního materiálu (uhlíková ocel) se svarovým kovem. V polarizačním poli lze vidět, že kolem vměstku je jehlicovitá martenzitická struktura. Martenzitická struktura se vyskytovala po celé hranici ztavení směrem k uhlíkové oceli. Další vměstek se vyskytoval v oblasti kořene (obr. č. 49), lze vidět, že to byl kousek základního materiálu (uhlíkové oceli).

### **Vzorek C**

Druhý heterogenní svarový spoj byl vzorek C. Mikrostruktura svarového kovu byla licí, austenitická s vyloučeným delta feritem, uspořádání struktury bylo dendritického charakteru (obr. č. 53). Hranice ztavení na straně k austenitické oceli rovněž obsahovala tenké přechodové pásmo o šířce 100  $\mu\text{m}$ . Mikrostruktura hranice ztavení byla opět licí, tvořená zrny austenitu s vyloučeným delta feritem.

Hranice ztavení směrem k uhlíkové oceli obsahovala ferit, perlit a bainit (obr. č. 56). Rovněž se v ní nacházelo téměř souvislé přechodové pásmo o šířce 40 až 50  $\mu\text{m}$ , které mělo jehlicovitou martenzitickou strukturu (obr. č. 58)

### **Vzorek D**

Vzorek D, byl homogenní svarový spoj uhlíkové oceli P265GH. Mikrostruktura svarového kovu vykazovala licí strukturu, vytvořenou bainitem a feritem s nesouvislým síťovým (obr. č. 62). Na hranici ztavení lze vidět, že struktura byla hrubozrnná, obsahující bainit a ferit nesouvisle síťový. Dále se na hranici ztavení ojediněle vyskytoval perlit.

### **Hodnocení mikrotvrdomosti (HV<sub>0,1</sub>)**

Při zkoušce mikrotvrdomosti nebyla změřena vyšší hodnota než 262 HV<sub>0,1</sub>, takže nebyla překročena limitující hodnota 350 HV<sub>0,1</sub>. Nejnižší naměřená hodnota byla 145 HV<sub>0,1</sub>. Na povrchu svaru byla u vzorků A, B, C naměřená nejvyšší hodnota v základním materiálu. Naopak to bylo u vzorku D, kde byla nejvyšší tvrdost ve svarovém kovu.

V kořenové oblasti vykazoval nejvyšší tvrdost vzorek A, a to bylo v základním materiálu (262 HV<sub>0,1</sub>). Lze říci, že mikrotvrdomost u heterogenních spojů směrem k austenitické oceli rostla. U homogenního spoje vzorku A byla nejnižší v TOO. U vzorku D byla naopak nejvyšší ve svarovém kovu a postupně klesala směrem k základnímu materiálu.

Maximální mikrotvrdomost vzorku A byla 262 HV<sub>0,1</sub> v základním materiálu. U vzorku B byla rovněž nejvyšší hodnota v základním materiálu (235 HV<sub>0,1</sub>). Vzorek C vykazoval maximální hodnotu 248 HV<sub>0,1</sub>, tyto hodnoty byly naměřené v TOO, ale i v základním materiálu na straně k austenitické oceli. U vzorku D byla maximální hodnota 243 HV<sub>0,1</sub> ve svarovém kovu.

## **Z dosažených výsledků lze definovat závěry:**

Vzorek A – homogenní svarový spoj (1.4541), na makroskopické dokumentaci vykazoval jen mírné přesazení svařovaných částí. Při hodnocení mikroskopické dokumentace nebyly objevené žádné vady, pouze byla nalezená přechodová vrstva na hranicích ztavení, která měla šířku 70 až 100  $\mu\text{m}$ . Tato přechodová vrstva měla mikrostrukturu podobnou svarovému kovu (licí, austenitickou s vyloučeným delta feritem), ale odlišně uspořádanou. Tento svarový spoj, obsahující tenkou přechodovou vrstvu (obr. č. 34) by měl být podroben korozní zkoušce, jestli právě tato vrstva nemá degradační vliv.

Vzorek B – heterogenní svarový spoj (1.4541/P265GH). V případě vzorku B nebyly nalezené žádné vady na makrostruktuře. Jinak to bylo při hodnocení mikrostruktury, na hranici ztavení k uhlíkové oceli. Na hranici ztavení bylo nalezené souvislé tenké pásmo, které mělo šířku přibližně 5 až 10  $\mu\text{m}$ . Mikrostruktura v tomto pásmu byla tvořená jehlicovitou martenzitickou strukturou. Mimo pásmo byla mikrostruktura tvořená feritem, perlitem a bainitem. Martenzitická a bainitická struktura není vhodná, nejen z důvodu, že martenzit je velmi křehký a může snadno dojít k porušení svarového spoje, ale také to může vést ke koroznímu poškození.

Na straně k uhlíkové oceli byl ve svarovém kovu nalezený vměstek kovového charakteru, který se tam pravděpodobně dostal nedokonalým promísením svarového kovu se základním materiálem. V polarizačním poli (obr. č. 45) lze vidět, že se kolem vměstku nacházela jehlicovitá martenzitická struktura. Směrem k austenitické oceli byl svarový spoj na hranici ztavení prostý defektů, ale obsahoval výskyt četných karbonitridů titanu.

Vzorek C – heterogenní svarový spoj (1.4541/P265GH). Při hodnocení svarového spoje C, byl na makroskopické dokumentaci nalezený vměstek, který byl v oblasti druhé svarové housenky. Svarový kov vykazoval uspořádání dendritického charakteru. Na hranici ztavení směrem k austenitické oceli byla opět nalezená přechodová vrstva, šířky přibližně 100  $\mu\text{m}$ . Hranice ztavení na straně uhlíkové oceli byla tvořená feritem, perlitem, bainitem a také byla nalezená jehlicovitá martenzitická struktura.

Vzorek D – homogenní svarový spoj (P265GH), vykazoval na makroskopické dokumentaci mírně převýšený kořen. Teplem ovlivněné oblasti byly viditelné a dosahovaly šířek 5 až 6 mm. Dále makroskopická dokumentace nevykazovala defekty. Mikrostruktura svarového kovu byla licí vytvořená bainitem a feritem nesouvisle síťovým. Na hranicích ztavení byla mikrostruktura hrubozrná a ojedinele obsahovala perlit.

Při zkoušce mikrotvrdomosti svarových spojů nebyly zjištěné hodnoty, které by přesahovaly limitující hodnotu 350 HV<sub>0,1</sub>. Maximální naměřená hodnota byla 262 HV<sub>0,1</sub>. Z tohoto hlediska byly všechny vzorky vyhovující.

Vzorek A – (homogenní svarový spoj) lze hodnotit jako vyhovující, ale bylo by adekvátní, vyzkoušet chování přechodové vrstvy na hranici ztavení v korozním prostředí.

Vzorky B, C – (heterogenní svarové spoje) lze vyhodnotit jako nevyhovující, z důvodů výskytu přechodového pásma na straně uhlíkové oceli, které obsahuje vysoké procento martenzitu i bainitu. Tato kombinace může vést ke koroznímu poškození při expozicích ve vyšších teplotách a k následnému porušení svaru.

Vzorek D – (homogenní svarový spoj) lze hodnotit jako vyhovující, ale z důvodu vysokého obsahu bainitu, by bylo vhodné dále sledovat chování svarového spoje v korozním prostředí.

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo rozšíření dosavadních znalostí o heterogenních (austenit/ferit) i homogenních (austenit/austenit, ferit/ferit) svarových spojích z hlediska svařitelnosti, životnosti a bezpečnosti jejich provozování na jaderných elektrárnách.

Teoretická část diplomové práce byla zaměřená na problematiku svařování heterogenních svarových spojů (austenit/ferit), často používaných pro výrobu jaderných komponent. Tato část byla rozdělena do dvou podkapitol, nejprve byla popsána problematika svarových spojů pracujících do provozní teploty 350 °C a druhá podkapitola byla věnována svarovým spojům pracujícím nad 350 °C. V druhé kapitole byl popsán současný stav používaných heterogenních svarových spojů na jaderných elektrárnách. Byly vybrány některé základní heterogenní svarové spoje, které byly popsány z hlediska umístění a koncepce. Další kapitoly byly věnovány svařitelnosti uhlíkových a vysokolegovaných, zejména austenitických Cr – Ni ocelí.

V experimentální části práce byly popsány základní materiály (1.4541, P265GH) a přídavné svařovací materiály (Inertrod 316LSi, Sv-07Ch25N13, Carborod 1). Dále byly vytvořeny návrhy postupu svařování (WPS) heterogenních a homogenních svarových spojů, podle kterých byly svary zhotoveny. Další kapitola byla zaměřená na vizuální hodnocení makroskopické a mikroskopické dokumentace svarových spojů. Součástí poslední kapitoly experimentální části bylo posouzení svarových spojů z hlediska hodnot mikrotvrdostí vybraných oblastí.

Výsledky diplomové práce jsou již dnes využívány na jaderných elektrárnách v České republice.

## **Poděkování**

Závěrem své diplomové práce věnuji poděkování vedoucímu práce panu prof. Ing. Ivo Hlavatému, Ph.D. za odborné vedení práce, za vstřícnost a za poskytnuté rady.

Dále věnuji poděkování panu Ing. Zdeňkovi Štorkánovi za pomoc při hodnocení svarových spojů z hlediska makrostruktury a mikrostruktury.

V poslední řadě děkuji panu Ing. Jindřichovi Kozákovi, Ph.D. za odborné vedení při zkoušce mikrotvrdosti.

## POUŽITÁ LITERATURA

1. HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. V Bratislavě: Slovenská technická univerzita, 2009. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3167-6.
2. SONDEL, Martin, Drahomír SCHWARZ a Jaroslav KOUKAL. *Mikrostrukturní parametry kombinovaného svarového spoje po dlouhodobé vysokoteplotní expozici. PROMATTEN 2011*. Ostrava: Flash Steel Power, 2011, s. 11. ISBN 978-80-260-0931-3.
3. KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich svařitelnost*. Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: Zeross, 1999. 292 s. ISBN 80-85771-63-2.
4. BEŇO, Marcel, František BEŇO a Jaroslav KOUKAL. *Studium přechodových oblastí heterogenních návarů v jaderné energetice* [online]. Duben 2013, 7 [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: [http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/2011/beno\\_4\\_2014.pdf](http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/2011/beno_4_2014.pdf)
5. PILOUS, V., STRÁNSKÝ, K. *Strukturní stálost návarů a svarových spojů v energetickém strojírenství*. 1. vyd. Prah: Academia, 1989. 208 s. ISBN 80-200-0007-0
6. KOLEKTIV AUTORŮ. *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.
7. PILOUS, Václav, Karel STRÁNSKÝ a Ladislav SEJPKA. *Svařování austenitických ocelí spolu s feritickými ocelmi*.
8. BEŇO, Marcel. *Zvýšení životnosti a provozní spolehlivosti heterogenních svarových spojů zařízení jaderné energetiky*. Ostrava, 2015. Disertační práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Jaroslav Koukal.
9. KOUKAL, Jaroslav; SCHWARZ, Drahomír; HAJDÍK, Jiří. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1. vydání. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o. Ostrava, 2009. 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
10. NTD A.S.I. SEKCE I. *Svařování zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER (Technický kód pro jaderná zařízení)*. A.S.I. Identifikační číslo: NTD ASI-I-2020, Ostrava 2020, 128 s



11. OP 1513-72. Předpisy pro svařování a navařování uzlů a konstrukcí jaderných elektráren, experimentálních a výzkumných jaderných reaktorů a souborů. Gosgortekhnadzor SSSR, Moskva, 1974.
12. PK1514-72. Předpisy pro kontrolu svarových spojů a návarů uzlů a konstrukcí jaderných elektráren, experimentálních a výzkumných jaderných reaktorů a souborů. souborů. Gosgortekhnadzor SSSR, Moskva, 1974.
13. SOUKUP, Tomáš. Oprava HTG svaru PG DN 1100 na EDU a opravné svařování v ŠKODA JS a.s.: Presentace. 2017.
14. HANNINEN, Hannu, Pertti AALTONEN, Anssi BREDERHOLM, Ulla EHRNSTÈN, Hans GRIPENBERG, Aki TOIVONEN, Jorma PITKANEN a Likka VIRKKUNEN. *Dissimilar metal weld joints and their performance in nuclear power plant and oil refinery conditions*. 1. Helsinki: Valopaino Oy, 2006. ISBN 951-38-6805-2.
15. KOUKAL, Jaroslav a Tomáš ZMYDLENÝ. *Svařování I*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2005. ISBN 80-248-0870-6.
16. KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-697-5.
17. Jakosti oceli. *Feromat* [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: [http://www.feromat.cz/jakosti\\_oceli](http://www.feromat.cz/jakosti_oceli)
18. *Total Materia: Světově nejobsáhlejší databáze materiálů* [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=Home&LN=CZ>
19. NEREZOVÁ OCEL 1.4541: Nerezový hutní materiál. *INOX* [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14541.html>
20. HLAVATÝ, I. *Teorie a technologie svařování*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009, poslední revize 20. 10. 2011. Dostupné z: <http://staryweb.ivohlavaty.cz/>
21. Drát INERTROD 316LSi. *WELD-EXPERT* [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://www.weldexpert.sk/kategoria/pridavne-materialy/zvaracie-droty/droty-na-nerez/tig-droty-na-nerez/drot-inertrod-316lsi/>

22. SLOVÁČEK, Marek a Lubomír JUNEK. Effect on Residual Life Time Due To Welding Repairs of NPP Components. *Repository* [online]. Brno, 2003 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://repository.lib.ncsu.edu/bitstream/handle/1840.20/27151/F06-4.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
23. CARBOROD 1: Dráty TIG [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://www.welmet.cz/wp-content/uploads/2019>
24. Metalografická laboratoř: Dráty TIG. *Katedra strojírenské technologie* [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/metalograficka-laborator>
25. LM700-Series Microindentation Hardness Testers: Specification Sheet. *Katedra strojírenské technologie* [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <http://www.usbioecuador.com/descargas/leco-metalografica/HardTst-LM700-ht.pdf>
26. VANĚK, Václav. *Bez jádra to nepůjde* [online]. ČEZ, 2008, 144 [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/data/web/vzdelavaci-program-cez/tiskoviny/bez-jadra-to-nepujde.pdf>
27. *Zpráva o výsledcích činnosti Státního úřadu pro jadernou bezpečnost a o monitorování radiační situace na území české republiky za rok 2018: Část I* [online]. SÚJB, 2019, 107 [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: [https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/vyrocní\\_zpravy/ceske/2018/cast\\_I.pdf](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/vyrocní_zpravy/ceske/2018/cast_I.pdf)
28. Kolektiv autorů. *Výroba a provoz komponent primárního okruhu jaderných elektráren typu VVER* [online]. Dům techniky Ostrava, 1982 [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/14/801/14801796.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/14/801/14801796.pdf)
29. HRIVŇÁK, Ivan. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. Bratislava: Slovenskej akadémie ved, 1989. ISBN 80-224-0016-5.
30. ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. 32 s.