

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 3911T016 Materiálové inženýrství a strojírenská  
metalurgie

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Koroze svařovaných konstrukcí z korozivzdorných ocelí

Autor: **Bc. Jan Cvrček**

Vedoucí práce: **prof. Dr. Ing. Antonín Kříž**

Akademický rok 2018/2019

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

## Fakulta strojní

Akademický rok: 2018/2019

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. Jan CVRČEK  
Osobní číslo: S18N0054K  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie  
Téma práce: Koroze svařovaných konstrukcí z korozivzdorných ocelí  
Zadávající katedra: Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

### Zásady pro vypracování

1. Rozdělení korozivzdorných ocelí, princip svařování
2. Korozivzdornost – princip koroze, metody testování
3. Progresivní způsoby svařování korozivzdorných ocelí
4. Návrh experimentu, svaření kontrolních spojů – vyhodnocení kvality svaru
5. Vyhodnocení korozních vlastností svařovaných spojů
6. Diskuze výsledků
7. Závěr

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

Seznam doporučené literatury:

EDITORS, David L. Olson. *Ferrous alloy weldments*. Switzerland: Trans Tech Pub, 1992. ISBN 0-87849-544-4.

BARTÁK, Jiří, Bohumír BEDNÁŘ, Zdeněk HUDEC, et al. *Svařování kovů v praxi: Materiály, výpočty, technologie, požadavky na jakost, bezpečnost práce*. 20. Praha: Verlag Dashöfer, 2013. ISSN 1803-2834.

*ASM handbook: Welding, brazing and soldering. Vol. 6. 10 edition*. USA: ASM International, 1993. ISBN 0-87170-382-3.

ČÍHAL, Vladimír. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. Praha: Academia, 1999. Česká matice technická (ACADEMIA). ISBN 80-200-0671-0

*ASM handbook: Corrosion of Weldments*. ASM International Technical Books Committee, USA, 2006. ISBN-13: 978-0-87170-841-0

Vedoucí diplomové práce: Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce: Ing. Ondřej ChochoLATý, Ph.D.  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Datum zadání diplomové práce: 5. října 2018  
Termín odevzdání diplomové práce: 24. května 2019

V Plzni dne 30. října 2018



---

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



---

Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE  
vedoucí katedry

## Prohlášení o autorství

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

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

**V Plzni dne: .....**

**.....  
podpis autora**

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Cvrček	Jméno Jan			
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	3911T016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“				
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) prof. Dr. Ing. Kříž	Jméno Antonín			
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KMM				
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	<b>Nehodící se škrtněte</b>		
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Koroze svařovaných konstrukcí z korozivzdorných ocelí				
<b>FAKULTA</b>	strojí	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2019

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	96	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	96	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>		<p>Diplomová práce řeší návrh, zhotovení svarových spojů z austeniticko-feritické korozivzdorné oceli X2CrNiMoN 25-7-4. Cílem práce bylo vyhodnocení kvality svařených kontrolních vzorků. Kontrolní vzorky jsou hodnoceny sérií mechanických testů – příčná zkouška tahem, zkouška rázem v ohybu a zkouška ohybem. Dále jsou provedeny měření mikrotvrdosti, analýza makro struktury a mikrostruktury. Dále je hodnocena korozní odolnost svarových spojů testem v korozní komoře a následným vyhodnocením vzorků.</p>			
<b>KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>		<p>1.4410, austeniticko-feritická ocel, svařování, plazmové svařování, příčná zkouška tahem, zkouška rázem v ohybu, korozní zkouška, zkouška tvrdosti, zkouška ohybem, koroze, korozivzdorná ocel</p>			

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>		Surname Cvrček		Name Jan	
<b>FIELD OF STUDY</b>		3911T016 “Materials Engineering and Engineering Metalurgy “			
<b>SUPERVISOR</b>		Surname (Inclusive of Degrees) prof. Dr. Ing. Kříž		Name Antonín	
<b>INSTITUTION</b>		ZČU - FST - KMM			
<b>TYPE OF WORK</b>		<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>	
<b>TITLE OF THE WORK</b>		Corrosion of welded structures made of stainless steel			
<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KMM	<b>SUBMITTED IN</b>	2019

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	96	<b>TEXT PART</b>	96	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The thesis deals with the design, manufacture of welded joints from austenitic-ferritic stainless steel X2CrNiMoN 25-7-4. The aim of the work was to evaluate the quality of welded control samples. Control samples are evaluated by mechanical test sera – transverse tensile test, Charpy impact test and bending test. Furthermore, measurements of microhardness, analysis of macro structure and microstructure are performed. Furthermore, the corrosion resistance of welded joints is evaluated by a corrosion chamber test and subsequent evaluation of the samples.
<b>KEY WORDS</b>	1.4410, austenitic-ferritic steel, welding, plasma welding, transverse tensile test, Charpy impact test, corrosion test, hardness test, bending test, corrosion, stainless steel

## Poděkování

Tímto bych nejprve chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce prof. Dr. Ing. Antonínu Křížovi za jeho odborné vedení, pomoc s experimentální částí a za poskytované konzultace. Dále bych rád poděkoval konzultantům p. Miloši Petřů, Ing. Kamilu Daňkovi, p. Vladimíru Neužilovi za cenné rady a vstřícnost při řešení problematiky v oblasti svařování kontrolních vzorků a jejich vyhodnocení. Poděkování též patří pracovníkům Katedry materiálů a strojírenské metalurgie, jmenovitě Ing. Ondřeji Chocholatému, Ph.D., Ing. Petru Benešovi, Ph.D., za odbornou pomoc při experimentální části testování a vyhodnocení.

Diplomová práce vznikla na základě řešení studentského projektu SGS – 2018-051 „Aplikace nových postupů úpravy a testování povrchu i objemových materiálů za účelem zvýšení uplatnitelnosti konstrukčního celku nebo pracovního nástroje v průmyslové praxi“. K realizaci diplomové práce bylo využito přístrojové vybavení finančně podpořeno Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy – projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována v infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108 a CZ.02.1.01/0.0/0.0/15\_008/0000293.

## Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	Jednotky	Název
Niekv	%	niklový ekvivalent
Crekv	%	ekvivalent chromu
$\alpha$	-	ferit
$\gamma$	-	austenit
$\delta$	-	ferit delta
bcc	-	mřížka kubická prostorově středěná
bct	-	mřížka tetragonálně prostorově středěná
Rp0,2	MPa	mez kluzu v tahu
TOO	-	tepelně ovlivněná oblast
metoda 141, TIG	-	obloukové svařování netavící se elektrodou v inertním plynu
metoda 131, MIG	-	obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu MIG
metoda 136	-	obloukové svařování plněnou elektrodou v aktivním plynu
metoda 135, MAG	-	obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu
metoda 15	-	plazmové svařování
PA	-	poloha svařování vodorovná shora
$\psi$	-	součinitel formy svaru
b	mm	šířka svaru
h	mm	hloubka svaru
WPQR	-	Welding Procedure Qualification Record
Rm	MPa	mez pevnosti v tahu
interpass teplota		mezi-housenkov (mezi-vrstvová) teplota
NDT		nedestruktivní testování materiálu
ZM		základní materiál
SK		svarový kov
PREN		Pitting resistance equivalent number
pWPS		pre-qualified welding procedure specification
WPS		welding procedure specification



## Obsah

1.	Úvod .....	11
2.	Rozdělení korozivzdorných ocelí .....	11
2.1.	Legující prvky v korozivzdorných ocelích .....	11
2.2.	Rozdělení korozivzdorných ocelí dle chemického složení .....	13
2.2.1.	Chromové korozivzdorné oceli .....	13
2.2.2.	Chrom-niklové korozivzdorné oceli .....	14
2.2.3.	Chrom-manganové korozivzdorné oceli .....	14
2.3.	Rozdělení korozivzdorných ocelí dle struktury .....	14
2.3.1.	Martenzitické korozivzdorné oceli .....	15
2.3.2.	Feritické korozivzdorné oceli .....	16
2.3.3.	Austenitické korozivzdorné oceli .....	18
2.3.4.	Austeniticko-feritické korozivzdorné oceli .....	20
3.	Koroze korozivzdorných ocelí .....	22
3.1.	Elektrochemická koroze .....	22
3.2.	Chemická koroze .....	24
3.2.1.	Typy korozního napadení a jejich průběhy .....	24
3.3.	Metody testování korozivzdorných ocelí .....	27
3.3.1.	Testování v provozních podmínkách .....	27
3.3.2.	Testování v laboratorních podmínkách .....	27
4.	Progresivní metody svařování .....	29
4.1.	Svařování TIG s horkým drátem .....	29
4.2.	Svařování plněným trubičkovým drátem bez ochranného plynu .....	30
5.	Návrh experimentu .....	32
5.1.	Výběr materiálu – základní parametry .....	32
5.2.	Návrh svarových spojů .....	33
5.3.	Svařování metodou 15 .....	35
5.4.	Svařování metodou 141 .....	37
5.5.	Svařování kombinací metod 141 a 135 .....	39
5.6.	Svařování metodou 135 .....	42
5.6.1.	Svařování kontrolních vzorků t=6 mm .....	42
5.6.2.	Svařování kontrolních vzorků t=3 mm .....	43
5.7.	Vyhodnocení kvality svařovaných spojů .....	47
5.7.1.	NDT zkoušky – vizuální, kapilární, radiografická zkouška .....	48

5.7.2.	Příčná zkouška tahem.....	50
5.7.2.1.	Příčná zkouška tahem – vzorek č. 1 .....	50
5.7.2.2.	Příčná zkouška tahem – vzorek č. 2 .....	51
5.7.2.3.	Příčná zkouška tahem – vzorek č. 3 .....	52
5.7.2.4.	Příčná zkouška tahem – vzorek č. 6 a 7.....	53
5.7.3.	Zkouška rázem v ohybu .....	55
5.7.4.	Zkouška ohybem .....	61
5.7.5.	Zkoušky tvrdosti.....	62
5.7.6.	Vyhodnocení makrostruktury a mikrostruktury.....	71
6.	Testování kontrolních vzorků a jejich korozních vlastností.....	78
6.1.	Testování korozních vzorků – příčná zkouška tahem .....	83
7.	Diskuze výsledků .....	85
8.	Závěr.....	87

## 1. Úvod

Téma práce bylo zvoleno na základě vzestupného trendu v použití korozivzdorných ocelí pro aplikace v oblasti chemického, jaderného, farmaceutického a potravinářského průmyslu. Kde tento trend je zpravidla způsoben především vhodnými vlastnostmi korozivzdorných ocelí a jejich dobrou dostupností na trhu a akceptovatelnou cenou pro výrobu zařízení, kde v porovnání s použitím jiných materiálů je nutné počítat s náklady na povrchové úpravy formou nátěrů a jejich případnou provozní kontrolu a údržbu. V následujících kapitolách rešeršní části je popsáno základní rozdělení ocelí a jejich svařitelnost s pohledem na struktury ocelí. Dále jsou popsány druhy koroze, které se vyskytují u korozivzdorných ocelí a jejich vybrané metody testování. V neposlední řadě jsou vybrány progresivní metody svařování. V praktické části je popsán návrh a testování svarových spojů několika metodami a korozní testy vzorků v solné komoře. Spoje byly navrhovány s ohledem na zvolený materiál pro výrobu tlakové nebo zásobní nádrže pro vysoce korozní prostředí chloridů.

## 2. Rozdělení korozivzdorných ocelí

Korozivzdorné oceli jsou oceli, které odolávají chemické nebo elektrochemické korozi v agresivních prostředích. Korozivzdorné oceli jsou zařazeny do skupiny vysoce legovaných ocelí, které jsou definovány jako oceli s přísadou legujících prvků o minimálním množství 5%. Hlavním legujícím prvkem korozivzdorných ocelí je chrom, který v minimálním obsahu 12% rozpuštěného v tuhém roztoku  $\alpha$  vytváří oxidační (pasivační) vrstvu oxidu -  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Vytvoření pasivační vrstvy je dáno vlastnostmi legujícího prvku chromu, který má vyšší afinitu k tvorbě oxidu chromitému dochází tak přednostně než k tvorbám oxidů železa. Vlastnosti pasivační vrstvy, a tím i korozní odolnost oceli, vychází z použitého druhu korozního prostředí, celkové době a teplotě, jímž je ocel vystavena v daném prostředí. [1, 2, 3]

Korozivzdorné oceli zpravidla členíme do dvou hlavních skupin. První skupinou členíme dle chemického složení, které zohledňuje nejvíce zastoupené prvky v oceli a má tak zásadní vliv na jejich výsledné vlastnosti a možnosti užití. Druhou skupinou je rozdělení dle struktury oceli.

### 2.1. Legující prvky v korozivzdorných ocelích.

Základním stavebním kamenem korozivzdorných ocelí jsou legující prvky, které finálně určují jakou strukturu a celkové vlastnosti bude ocel mít. Legující prvky dle vlivu na strukturu rozdělujeme do dvou základních skupin – austenitotvorné a feritotvorné.

- **Uhlík**, jež je především zastoupený intersticiálním tuhým roztokem železa, tvoří spolu s železem základní vlastnosti oceli, zvyšuje především pevnost, tvrdost a kalitnost. Uhlík s výjimkou především u martenzitických ocelí je zpravidla u korozivzdorných ocelí nežádoucí, z důvodů snížení odolnosti vůči mezikrystalové korozi vlivem precipitace karbidů po hranicích zrn. Dále stoupající obsah má negativní vliv vlastnosti pro tváření, snížení plasticity, houževnatosti a svařitelnosti. Uhlík je hodnocen jako austenitotvorný prvek.
- Přidáním **manganu** do oceli, zlepšuje vlastnosti při zpracování oceli za tepla a zvyšuje houževnatost, pevnost a kalitnost. Jako austenitotvorný prvek je často používán jako ekonomičtější náhrada za nikl. Pro austenitické oceli je vhodný pro svůj vliv na vyšší rozpustnost dusíku v oceli a celkově snižuje možnost praskání svarů do obsahu 3 %. Po negativní stránce může působit na vznik popouštěcí křehkosti a sklon k hrubnutí zrna při vyšších teplotách.

- **Chrom**, jako další hlavní prvek korozivzdorných ocelí je především pro svoji odolnosti vůči oxidaci, kde se zvyšujícím obsahem dochází zpravidla ke zvyšování korozivzdornosti. Žáruvzdorné oceli jsou skupinou korozivzdorných ocelí, které mají odolnosti proti oxidaci do vyšších teplot, kde na povrchu oceli dochází k tvorbě okují a oxidace nepostupuje do hloubky materiálu. Chrom řadíme do skupiny podporující feritickou strukturu. Jelikož má vysokou afinitu k uhlíku a dusíku proto s vyšším obsahem těchto prvků může docházet k tvorbě precipitátů – karbidů a nitridů.
- Hlavní výhodou **molybdenu** je výrazný vliv na zlepšení korozních vlastností proti bodové a štěrbinové korozi, zejména v prostředích síry a chloridů. Patří do skupiny feritotvorných legujících prvků.
- **Dusík** jako austenitotvorný prvek, zvyšuje výrazně stabilitu u austenitických korozivzdorných ocelí. Vliv tohoto prvku spočívá ve zvýšení meze kluzu oceli a zlepšení korozní odolnosti proti bodové korozi.
- **Nikl** je základní legující austenitotvorný prvek s nejvyšším zastoupením v austenitických korozivzdorných ocelích. Nikl nemá za běžných okolností afinitu k tvorbě karbidů nebo nitridů. U vlastnosti ocelí má výrazný vliv na pevnost a tvárnost. A tento prvek výrazně zvyšuje houževnatost ocelí, a to především pro nízké teploty použití. U martenzitických korozivzdorných ocelí je používán v malém obsahu, kde zlepšuje prokalitelnost oceli.
- **Měď** je v ocelí používána legující prvek do 2%, případně může dojít k výskytu v malém obsahu jako zbytkový prvek. Ve struktuře oceli tvoří precipitáty. Měď zlepšuje prokalitelnost, obrobitelnost, a především korozní odolnost v roztoku kyseliny sírové a v prostředí chloridů.
- **Titan a niob** pro svoji vysokou afinitu k uhlíku používáme u korozivzdorných ocelí s vyšším obsahem uhlíku, kde je nežádoucí vznik karbidů jiných legujících prvků po hranicích zrn (např. karbidy chromu). Niob dále zlepšuje vlastnosti oceli pro použití za vyšších teplot.
- **Křemík** v oceli může být zastoupený dezoxidační prvek z procesu tavení, kde do 0,5% není považován za legující prvek. Jako legující prvek má pak při zastoupení 3-4% vliv na vyšší odolnost proti mezikrystalové korozi. Podporuje transformaci feritické struktury.
- **Hliník** bývá použit pro dezoxidační vlastnosti, jako prvek je často využíván u žáruvzdorných ocelí.
- **Fosfor, síra** patří legující prvky používané pouze v malém množství obvykle do 0,035% obsahu. Při vyšších hodnotách mohou významně negativně ovlivňovat korozivzdornost a svařitelnost pro svoji segregaci prvků po hranicích zrn, s tím spojená vliv na pevnost svarového spoje. Výhodou zastoupení prvků v ocelích je zlepšení obrobitelnosti materiálu. Fosfor zlepšuje u austenitických ocelí pevnost. [2, 3]

## 2.2. Rozdělení korozivzdorných ocelí dle chemického složení

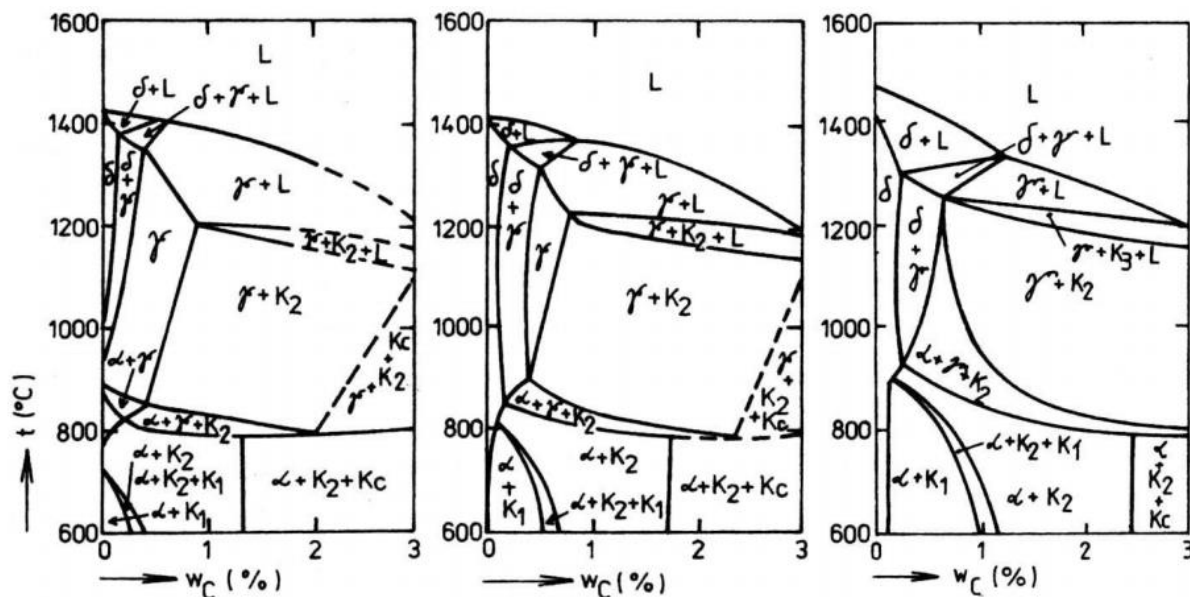
Korozivzdorné oceli zpravidla členíme do dvou velkých skupin pro rozdělení, první skupinou rozčlenění je dle chemického složení, které zohledňuje nejvíce zastoupené prvky v oceli a má tak zásadní vliv na jejich výsledné vlastnosti a možnosti užití. Většina literatur má následující členění:

- Chromové korozivzdorné oceli
- Chrom-niklové korozivzdorné oceli
- Chrom-manganové korozivzdorné oceli

Dle chemického složení lze vidět, že hlavními legujícími prvky je chrom, nikl a mangan. Vedlejšími legujícími prvky jsou dále např. molybden, křemík, měď, titan, niob, dusík.

### 2.2.1. Chromové korozivzdorné oceli

Chromové korozivzdorné oceli, které mají zpravidla zastoupení 13-15% chromu a 0,15-0,25% uhlíku. V závislosti na rychlosti ochlazování oceli a obsahu uhlíku mají buďto martenzitickou strukturu, nebo feritickou strukturu. Feritická struktura je zpravidla do obsahu uhlíku 0,05 %, kde dochází k vylučování karbidu  $(CrFe)_{23}C_6$  ( $K_1$  viz. obrázek č. 1). Se změnou obsahu uhlíku a tím i struktury z feritické na martenzitickou, dochází k vylučování karbidu  $(CrFe)_7C_3$  ( $K_2$  viz. obrázek č. 1). Tato závislost je vidět na obrázku č. 1, kde je řez ternárními rovnovážnými diagramy Fe-C-Cr při různých obsazích chromu.



Obr. 1 – Ternární rovnovážný diagramy Fe-C-Cr pro 12%, 15% a 20% obsahu chromu [6]

Se zvyšujícím obsahem chromu na 18-20% obsahem uhlíku 0,1-0,25% jsou tyto oceli používány jako žáruvzdorné do oblasti teplot až 950 °C. Tyto oceli mají feriticko-martenzitická struktura, nebo pouze martenzitickou. Využití martenzitických chromových (feriticko-martenzitických) je pro energetický průmysl, zařízení v prostředí páry, vody a jiných kapalin s mírně agresivním prostředím.

Při obsahu uhlíku do 0,03 % a 18-29% obsahu chromu se jedná o oceli feritické, resp. super ferity. Pro zlepšení korozivzdorných vlastností těchto ocelí, obsahují titan a niob, které mají lepší afinitu k uhlíku a zabráňují vyloučení karbidů a nitridů po hranicích zrn. Feritické

chromové oceli s vysokým obsahem chromu nacházejí uplatnění v chemickém průmyslu v řadě agresivních prostředí jako  $\text{HNO}_3$  apod. [2, 4, 6]

### 2.2.2. Chrom-niklové korozivzdorné oceli

Korozivzdorné oceli s obsahem legujících prvků chromu a niklu, který v určitém množství stabilizuje austenitickou strukturu i za běžných okolních teplot. Chrom-niklové korozivzdorné oceli lze rozdělit z hlediska obsahu niklu na stabilní a metastabilní. Na stabilitu austenitické struktury mají dále vliv především austenitotvorné prvky jako mangan, uhlík, dusík apod.

U metastabilní korozivzdorné oceli může docházet vlivem tváření za studena nebo vlivem velmi nízkých teplot k částečné transformaci austenitické struktury na martenzitickou, tato přeměna platí pro obsah niklu 7 % a méně. Pro oblast 9-14% obsahu niklu bude tato přeměna při velmi nízkých teplotách závislá na obsahu chromu, uhlíku a dalších legujících prvků. Pro oceli s obsahem niklu nad 14 %, lze považovat austenitickou strukturu za stabilní.

Chrom-niklové oceli jsou paramagnetické, s výjimkou oblastí s výskytem deformačního martenzitu, které mohou být částečně magnetické. Po mechanické stránce tyto oceli mají vysokou tažnost (okolo 650 MPa) a houževnatost, i za velmi nízkých teplot např. pro oceli 1.4301 pro konstrukční použití  $-196\text{ }^\circ\text{C}$ . Nevýhodou po mechanické stránce může být nízká mez kluzu (obvykle cca 250 MPa). Mechanické vlastnosti daných ocelí lze zvýšit tvářením např. válcováním, nebo použitím legujících prvků zpevněním tuhého roztoku prvky boru a dusíku. Oceli se vyznačují velmi dobrou korozivzdorností, která může být dále zvýšena legováním mědi nebo molybdenem. [4, 7]

### 2.2.3. Chrom-manganové korozivzdorné oceli

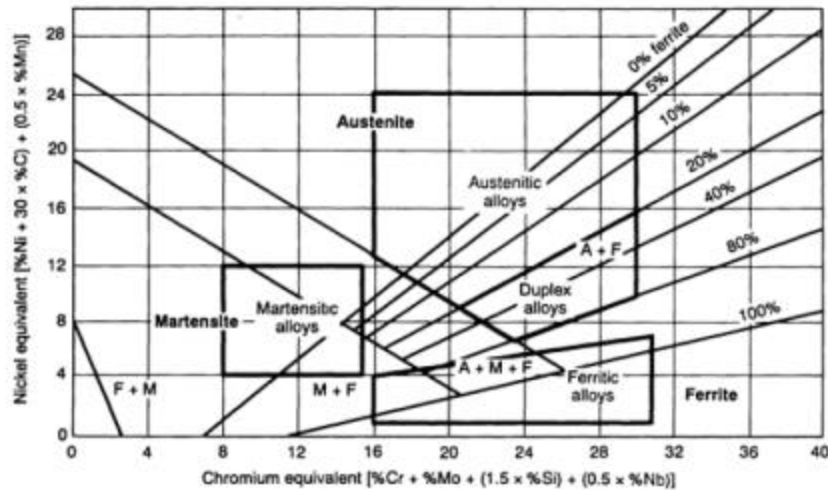
Dalším ze zastoupení skupiny korozivzdorných ocelí jsou oceli chrom-manganové, u nichž není hlavním legujícím prvkem nikl, ale je nahrazen především z pohledu ceny levnějším manganem. Z pohledu zachování austenitické struktury je mangan taktéž austenitotvorný prvek, ale ve většině případů bývá doplněn např. dusíkem nebo molybdenem. Většina manganových ocelí má rozsah uhlíku od 0,02% do 0,08% a současně je legována dusíkem v obsahu 0,1% až 0,3%, což je dostačující nejen pro zachování stability austenitické struktury, ale i pro výrazné zvýšení mechanických vlastností oceli, zejména meze kluzu. Mezi další výhody patří nejen vysoká odolnost vůči opotřebení, ale i to že jsou bezpečně nemagnetické i po tváření za studena, kdy je potlačen vznik deformačního martenzitu. Mají dobrou odolnost proti bodové a šterbinové korozi a celkově dobře odolávají v oxidačních a redukčních prostředích. Použití těchto ocelí nachází uplatnění v potravinářských zařízeních, zařízení pro chemický průmysl včetně použití v prostředích ve styku s mořskou vodou. [2, 4, 7]

## 2.3. Rozdělení korozivzdorných ocelí dle struktury

Pro předběžné stanovení předpokládané výsledné struktury oceli (svarového kovu apod.) a to na základě zastoupení jednotlivých legujících prvků v oceli, byl vytvořen Schaefflerův diagram. Na hlavní dvě osy diagramu jsou vyneseny prvky ekvivalentu chromu a niklu dle rovnic 1.1 a 1.2, které se stanoví pomocí výpočtových rovnic. Z protnutí hlavních os pak lze vyčíst předpokládanou strukturu oceli. [1, 2, 4, 8]

$$Ni_{ekv.} = \%Ni + 30 \cdot \%C + 0,5 \cdot \%Mn \quad (1.1)$$

$$Cr_{ekv.} = \%Cr + \%Mo + 1,5 \cdot \%Si + 0,5 \cdot \%Nb \quad (1.2)$$



Obr. 2 – Schaefflerův diagram [8]

Z výsledného diagramu lze stanovit následující rozdělení ocelí dle struktur:

- Martenzitické korozivzdorné oceli
- Feritické korozivzdorné oceli
- Austenitické korozivzdorné oceli
- Austeniticko-feritické korozivzdorné oceli

### 2.3.1. Martenzitické korozivzdorné oceli

Martenzitická struktura v oceli je krystalograficky nejčastěji uspořádána do krychlově prostorově středěné nebo tetragonálně prostorově středěné mřížky. Nejdůležitějšími legujícími prvky v těchto ocelích je obsah chromu a uhlíku, které mají významný podíl na možnosti tyto oceli tepelně zušlechtit (kalit a popustit), oceli jsou feromagnetické. Pro martenzitické oceli jsou obsahy chromu od 11,5% do 18% a uhlík je zastoupen do obsahu 1,5%. Pro zlepšení mechanických vlastností ocelí může být použit jako legující prvek molybden. Martenzitické oceli jsou typické velmi nízkým obsahem niklu pro zachování požadované krystalografické struktury.

Mechanické vlastnosti martenzitických korozivzdorných ocelí v žíhaném stavu začínají na hodnotě přibližně 275 MPa pro mez kluzu. Vyšší pevnosti lze dále docílit tvářením za studena, kde zvýšení mechanických vlastností není ale tak markantní, jako oceli tepelně zušlechťené, kde nejvyšší hodnoty meze pevnosti mohou dosahovat 1900 MPa. Martenzitické oceli jsou rozděleny dle podílu uhlíku na nízko a vysoko obsahové, hranice podílu je 0,15%. Nízko obsahové oceli lze za určitých podmínek svařovat, vysoko obsahové nelze. S rostoucí pevností a tvrdostí oceli klesá tažnost a houževnatost. Pro tepelné zušlechťení lze dosáhnout tvrdosti až 600 HB. Dalšími výhodami ocelí, které lze uplatnit je odolnost proti creepu a únavě, v kombinaci slabě korozního prostředí a zvýšených provozních teplot do 650°C. Oceli s nízkým až středním zastoupením uhlíku, jsou využívány pro zařízení parních a plynových turbín, komponenty tryskových motorů. Oceli s vysokým obsahem uhlíku se používají pro komponenty v energetice, dále pak na výrobu ozubených kol a hřídelí.

Martenzitické korozivzdorné oceli jsou náchylné při tepelném zpracování v nevhodných atmosférách, např. povrchových úpravách oceli jako je moření nebo elektrolytické pokovení, na difuzi vodíku do krystalografické mřížky, která může vést ke vzniku tzv. vodíkové křehkosti. Žiháním lze vodíkové zkřehnutí minimalizovat, případně zcela eliminovat. Teplota žihání je uváděna v rozsahu od 200 °C až 350 °C, některé oceli lze zpracovat teplotně už při 100°C. Při této teplotě dochází pouze ke zdatnému snížení účinků vodíkové difuze. Další

problematikou tepelného zpracování například v procesu zušlechtnění může nastat u popouštěcích teplot v rozsahu 350 °C až 550 °C. Vznik popouštěcí křehkosti má za následek snížení tažnosti materiálu a korozní odolnosti materiálu, obvykle vzniká segregací prvků (P, As, Sb, Sn, S) po hranicích zrna a zpravidla je podpořen prvky (Ni, Cr, Mn), které lze najít ve složení jako legující prvky. Další podmínkou pro vznik popouštěcí křehkosti se zvyšuje s obsahem uhlíku nad hranicí 0,2 %, kde řešením této problematiky je se zvyšujícím se obsahem uhlíku v oceli, zvyšování rychlosti ochlazování.

Technologie svařitelnosti martenzitických korozivzdorných ocelí není závislá na tepelném zpracování svařovaných materiálů, je pouze závislá na obsahu uhlíku 0,15% až 0,25% v závislosti na obsahu chromu. Při chladnutí teplotního cyklu po svařování dochází v tepelně ovlivněné oblasti následující průběžné transformaci v průběhu klesání teploty materiálů. Z delta feritu probíhá transformace na austenit v oblasti teplot 980 °C, z kterého následně při rychlém ochlazení dochází ke vzniku martenzitické struktury. Svařování martenzitické struktury sebou přináší i vysoké riziko vzniku trhlin za studena vlivem vysokého vnitřního pnutí. Svařování ocelí s vyšším obsahem než 0,15% uhlíku, dochází v oblasti svarového kovu k prokalitelnosti a materiál má v této oblasti vyšší tvrdost než základní materiál, toto může opět vést k tvorbě trhlin za studena. Toto riziko může snížit použití ocelí s příměsí niklu (1-6%) nebo přidavných materiálů s austenitickou strukturou, TOO a svarový kov si tak zachová část obsahu austenitické struktury, která může pojmout část vnitřního napětí z martenzitické struktury. Těchto úprav je použito tam, kde to okolnosti a použití austenitické struktury umožňují.

Martenzitické oceli jsou svařeny zpravidla všemi běžnými metodami svařování elektrickým obloukem, jmenovitě metodami 141, 13x, 111. Dále jsou svařitelné odporovým svařováním a svařování elektronovým a laserovým paprskem. Materiál je zpravidla při svařování středních a větších tlouštěk spojovaných částí nutné předehřívát. Předehřev je na teploty 200 °C pro oceli s obsahem do 0,1 % uhlíku, pro oceli s vyšším obsahem jsou pak teploty až do 250 °C, přičemž doba předehřevu je obvykle od 15 do 20 minut. Vnesené teplo do svaru by mělo být v rozmezí 0,5-1,5 kJ/mm a volba druhu přidavných materiálů s nízkým obsahem uhlíku, pro příznivý vliv svarového spoje na studeného trhliny. Pro skladbu svarových housenek v profilu svaru je vhodné volit přidavné materiály menších průměrů, aby následující svarová housenka částečně vyžihala skladbu předchozích svarových vrstev. Mezi housenkovou teplota, jinak nazývaná teplota interpass, je stanovena do oblasti  $M_s$  přeměny austenitické struktury na martenzitickou dle ARA diagramu až teploty předehřevu. Po svaření finální svarové housenky je důležité aplikovat dohřev s pozvolným pomalým ochlazením na teploty okolo 100 °C. U velmi členitých a složitých svařenců je nevhodné ochlazovat na teplotu okolí, ba naopak je nutné okamžitě zahájit tepelné zpracování, případně dlouhodobý dohřev až do doby tepelného zpracování. Oceli je nutné po svařování vždy tepelně zpracovat, bez tohoto kroku by během provozu došlo vlivem velkých vnitřních pnutí a vnějšího namáhání k lomu. Z tohoto důvodu je na svařencích je prováděno tepelné zpracování žihání ke snížení napětí, kde dochází k částečnému popuštění martenzitické struktury, což má za následek snížení vnitřních napětí a zlepšení tažnosti a houževnatosti. Ohřevy pro tepelné zpracování musí být pozvolné, aby nedošlo k rozvoji žihacích trhlin vlivem rozdílných teplot na povrchu a uvnitř jádra svařence při ohřevu v oblasti teplot 150-300 °C. Při zpracování je nutné se vyvarovat difuze vodíku do materiálové struktury ať už vlivem svařování, tepelného zpracování nebo povrchových úprav. [1, 2, 3, 8]

### 2.3.2. Feritické korozivzdorné oceli

Feritická struktura je typická pro oceli s obsahem chromu od 13% až 26%, kde se ferit vyskytuje při ochlazování až do pokojové teploty. Ferit je charakterizován jako intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe  $\alpha$ . S vyšším obsahem uhlíku se současně posunuje i oblast austenitické struktury směrem k vyššímu obsahu chromu, přičemž stabilita feritu je obvykle do oblasti



teplot 750-900°C pro tepelné zpracování. Při tepelném zpracování zakončené rychlým ochlazením, může u některých typů těchto ocelí zanechat částečnou austenitickou strukturu. Austenitická struktura může dále obsahovat karbidy. To je způsobeno ochlazením, kde nemohlo dojít k transformaci na ferit. Tyto oceli bývají nazývány „poloferitické“. Průběh přeměny austenitu s dále se snižující teplotou je shodný s rozpadem austenitu u kalitelných ocelí, kde v obou případech dochází ke vzniku martenzitu, zatímco k přeměně feritické části s klesající teplotou nedochází. Vznik martenzitické struktury je doprovázeno zvýšením tvrdosti.

Zpravidla pro 100% obsah feritické struktury v oceli, mají oceli obsah uhlíku do 0,08-0,1% a obsah chromu vyšší než 17%. Hlavní výhodou této struktury je především strukturní stálost se zvyšující se teplotou, z tohoto důvodu tyto oceli nacházejí uplatnění především jako žáruvzdorná. Strukturní stálost je především důležitá z pohledu, že se v průběhu změn teplot nedochází k objemovým změnám materiálů, a tudíž nedochází tak k deformacím nebo porušení na aplikovaných zařízeních a komponentách. Vyloučení karbidů u feritické struktury nelze zaměřit z důvodu nízké rozpustnosti v této struktuře s klesající teplotou. Z tohoto důvodu je pro oceli výhodnější dosáhnout rovnoměrného rozptýlení karbidů uvnitř feritické struktury. Pokud by došlo k vyloučení karbidů po hranicích zrn, které bude mít značný vliv na korozní odolnost a mechanické vlastnosti oceli, především na vrubovou houževnatost. V průběhu ohřevu na teploty 200-800 °C mohou být ve struktuře vyloučeny různé druhy karbidů následujícího rozdělení:

- karbid typu  $M_2C$  do oblasti teplot 200 °C
- karbidy typu  $M_3C$  a  $M_7C_3$  pro teploty 200 °C až 450 °C
- karbidy typu  $M_7C_3$  a  $M_{23}C_6$  pro teploty 450 °C až 625 °C
- karbid typu  $M_{23}C_6$  pro teploty nad 625 °C

S rozvojem metalurgických procesů bylo možné vytvořit ocel s čistě feritickou strukturou, s velmi nízkým obsahem uhlíku a dusíku, kde zpravidla suma těchto prvků dosahuje maximálně 0,015 až 0,025 % a obsah základní legujících prvku chromu je obvykle v rozmezí 18-29 %. Dalšími legujícími prvky mohou být pro stabilizaci struktury titan a niob, případně pro zlepšení korozních vlastností molybden v zastoupení 0,5-4 %. Některé superferity mohou být ještě legovány niklem, na základě jehož přítomnosti (reps. nepřítomnosti) jsou oceli děleny do dvou podskupin. Superferity jsou dobře svařitelné, mají dobrou tvářitelnost, tažnost a vrubovou houževnatost. Z pohledu korozivzdornosti mají zvýšenou odolnost proti mezikrystalové korozi a velmi dobré vlastnosti v oblasti odolnosti proti koroznímu praskání pod napětím. Ocel může být metalurgicky zpracována pro použití až do teplot -40 °C a to tím že dojde k posunu přechodové teploty pro křehký lom.

Feritické korozivzdorné oceli mají dobrou svařitelnost a téměř všechny jsou svařitelné z důvodu nízkého obsahu uhlíku (obsah do 0,08 %). Svařovat je nutné s maximálním vneseným teplem do 1 kJ/mm a je nutné použít předehřev s teplotami do 300 °C. Mezi housenková teplota je stanovena maximálně na 320 °C. Během svařování je nutné omezit materiál vystavením teplotám mezi 450 °C až 800 °C pouze na nezbytně nutnou dobu, aby nedocházelo ve struktuře ke zhrubnutí zrna a tím ke zhoršení mechanických vlastností (vrubové houževnatosti, tvárnosti, zkřehnutí) a korozní odolnosti. V této oblasti teplot mohou nastat dva typy rozvojových mechanismů. Prvním je tzv. „zkřehnutí 475 °C“ to nastává v oblasti teplot 450 °C až 525 °C, v oceli za těchto teplot probíhají nežádoucí precipitační procesy, zkřehnutí může být u ocelí odstraněno nebo sníženo ohřevem na teploty 540 °C (2 hodiny) a následným zrychleným ochlazením. Druhým nežádoucím mechanismem je vznik křehké intermetalické sigma fáze, tato fáze vzniká při teplotách 500 °C až 800 °C. Nedoporučuje se svařovat silnostěnné svařence, kde by docházelo ke kumulaci vneseného tepla, které může iniciovat vznik výše popsaných mechanismů. Případně je vhodné tepelné zpracování svařence žíháním při teplotách 750-800 °C.

Oceli jsou svařitelné běžnými metodami svařování elektrickým obloukem – metody 141, 131, 135. Při svařování metodou 141 (TIG) je jako ochranný a formovací plyn použit argon nebo helium, případně směs v kombinaci těchto plynů. Zpravidla je nutné se vyvarovat použití plynů s obsahem dusíku nebo vodíku a pro svařování metodou elektrickým obloukem s tavící se elektrodou (metody 131, 135) je nutné použití ochranného plynu bez příměsí CO<sub>2</sub>. Pro svařování je dále vhodné zvolit svařování v pulzním režimu, čímž dojde ke snížení vneseného tepla. Pro svařování tavící se elektrodou se zpravidla využívají svařování v režimech zkratového přenosu, impulsní sprchový přenos a přechodový oblouk s kapkovým přenosem, kde první jmenovaný vykazuje nejméně vneseného tepla a je vhodný i při svařování v náročných polohách. Impulsní sprchový přenos je zpravidla využíván pro lepší vlastnosti, než je základní sprchový přenos, který by měl za následek velké vnesené teplo. Přechodový kapkový přenos je používán pro svařování pouze minimálně, z důvodu vysokého rozstříku kovu, který lze mírně snížit správnou volbou ochranného plynu s vysokou čistotou. Oceli je též možné svařovat metodami laserového svařování, plazmové svařování, odporové svařování nebo svařování obalenou elektrodou.

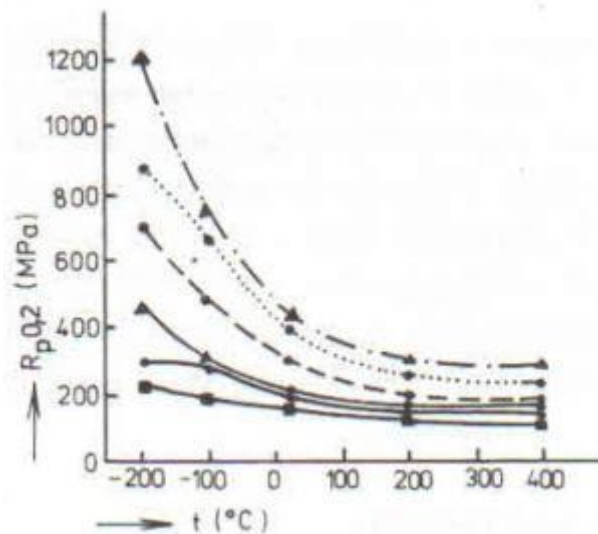
Volba přídavných materiálů pro svarový spoj je závislá na provozních parametrech svařence, pro použití svařence do teplot 400 °C, bývají voleny přídavné materiály stejného chemického složení jako základní materiál, které mohou mít ovšem spolu s vneseným teplem vliv na nižší vrubovou houževnatost svarového spoje. Z toho pohledu je vhodnější použít přídavné materiály pro austenitické nebo austeniticko-feritické korozivzdorné oceli, tím to lze dosáhnout i snížení náchylnosti spoje na vodíkovou křehkost. V případě požadavku na zachování plně feritické struktury je nutné svařovat přídavnými materiály s minimálním množstvím uhlíku a nízkým obsahem dusíku, zpravidla je nutné dosáhnout požadavku -  $\sum C+N \leq 0,04\%$ . Pro svarové spoje namáhané při teplotách nad 400 °C je nutné použít přídavné materiály vysoce legované niklem, který zabraňuje difuzi uhlíku. [1, 2, 3, 8, 9]

### 2.3.3. Austenitické korozivzdorné oceli

Tyto oceli jsou charakterizovány kubickou plošně centrovanou mřížkou, přičemž výskyt austenitu ve struktuře není dán pouze oblastí nad křivkou teploty A<sub>C1</sub>, ale působením vybraných legujících prvků dokáže stabilizovat austenit až do velmi nízkých (tzv. kryogenních) teplot, kde teplota dosahuje -196 °C. Austenitická struktura má vysokou tažnost, kde pro běžné jakosti ocelí jsou hodnoty - 25-45%, a dále oceli mají i velmi dobrou vrubovou houževnatost. Oceli mají dobrou odolnost proti oxidaci, lze je použít do teplot až 600 °C, ovšem dále se vzrůstající teplotou jsou citlivé na zhrubnutí zrna, které nemá vliv na zkřehnutí jako v případně feritických korozivzdorných ocelí, ale může vést ke zhoršení mechanických vlastností a výraznému snížení korozivzdornosti. Oceli jsou paramagnetické, ovšem ve struktuře se může vyskytovat malý obsah feritu δ – 3-10%, který má za následek slabý feromagnetismus. Při zpracování některých ocelí v oblasti tváření nebo svařování může dojít k výskytu deformačního martenzitu. Výskytu martenzitu lze zamezit dostatečným legováním austenitotvornými prvky. Na základě tohoto poznatku lze austenitické korozivzdorné oceli rozdělit do dvou základních podskupin – se stabilní a metastabilní austenitickou strukturou. Tyto oceli nacházejí celkově nejširší uplatnění pro celkovou škálu průmyslových odvětví – potravinářský, farmaceutický, chemický a jaderný průmysl.

Za základního představitele austenitických ocelí lze považovat ocel 1.4301. Tato ocel má obsah chromu 18%, niklu 9% a uhlíku 0,03%. Pro odlišné jakosti pak může být ocel legována manganem až do obsahu 19% a případně v kombinaci s dusíkem, který může mít zastoupení až 0,5%. Použitím těchto dvou prvků může být využito jako náhrady za cenově dražší legující prvek nikl. Dále tyto prvky mají významný vliv na korozivzdornost pro aplikace do prostředí na bázi chloridů a síry. Dalším legujícím prvkem používaných pro zlepšení

korozivzdornosti pro aplikaci solných roztoků a redukčních kyselin je molybden. Působení molybdenu jako feritotvorného prvku je nutné vyvážit prvkem podporujícím austenit. Spolu s dalšími feritotvornými prvky jako např. nejvíce zastoupený chrom může mít za následek vyšší riziko vzniku křehké intermediální sloučeniny sigma fáze. Použití dusíku jako legujícího prvku může mít ještě další využití z pohledu navýšení meze pevnosti, další mechanické vlastnosti jako tažnost, kontrakce a vrubová houževnatost, která se nemění s legováním dusíku. Obvyklý obsah legování je do 0,2 % dusíku. Normální rozpustnost dusíku v austenitické struktuře je velmi malá. Rozpustnost lze však zvýšit legováním chromu do obsahu 25 %, kde platí rozpustnost pro dusík do 0,4 % a tím navýšení meze kluzu na 400-550 MPa. Pro další zvýšení rozpustnosti na hodnotu 0,6 % dusíku je nutné legovat ocel manganem na obsah až 20 %. Vliv dusíku a manganu na ocel 02Cr18Ni10 je patrný na obrázku č. 3 a pro následující zastoupení prvků v oceli – plná čára - 0,03% dusíku; tečkovaná čára - 0,2% dusíku; čárkovaná čára – 0,4% dusíku; čerchovaně – 0,6 % dusíku pro 10-20% manganu.



Obr. 3 – Vliv legování oceli dusíkem na mez kluzu [2]

Svařitelnost těchto ocelí je nejvýhodnější ze všech korozivzdorných ocelí. Při svařování je nutné vzít v úvahu fyzikální veličinu jako je tepelná vodivost, která je výrazně nižší než např. u feritických ocelí, během ohřevu materiálu při svařování má vliv na vyšší napětí uvnitř struktury a vyšší tepelnou roztažnost – 30-40 %, z těchto poznatků vyplývá, nesprávnou volbou výrobního postupu mohou vznikat i větší deformace na svařencích. Základní materiál svařenců je dodáván po tepelném zpracování rozpouštěcím nebo stabilizačním žíhání. Svarové spoje svařujeme zásadně bez předehřevu a je nutné se vyvarovat vzniku trhlin za horka v tepelně ovlivněné oblasti nebo svarovém kovu. Vznik trhlin za horka je iniciován tahovými napětími při transformaci nízko tavitelných eutektických směsí fází v dendritických rozhraních svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti. Základním předpokladem snížení náchylnosti svarového spoje na vznik trhlin je nízký obsah feritu delta, pro svarový kov jde o obsah do 6 % a pro základní materiál 3 %. Vyšší obsahy feritu delta vede ke snížení korozních vlastností a iniciace vzniku fáze sigma. Pro zhodnocení iniciace základního nebo přídatného materiálu na trhliny za horka jsou využívány následující vztahy – viz. vzorce 1.3 a 1.4.  $L$  a  $\Delta H$ , a kde pokud hodnoty pro dané veličiny  $L > 0$  a  $\Delta H < 100$ , pak jakost oceli vykazuje náchylnost na tvorbu trhlin za horka.

$$L = 299 \cdot hm. \%C + 8 \cdot hm. \%Ni + 142 \cdot hm. \%Nb - 5,5 \cdot hm. \% \delta^2 - 105 \quad (1.3)$$

$$\Delta H = -700 \cdot hm. \%C + 17 \cdot hm. \%Cr - 37 \cdot hm. \%Ni - 117 \cdot hm. \%Nb + 29 \cdot hm. \%Mo + 188 \quad (1.4)$$

Austenitické korozivzdorné oceli jsou svařitelné všemi běžnými metodami svařování elektrickým obloukem jako jsou metody 141, 131, 135, 136, 111, a dále pak odporové svařování, svařování elektronovým paprskem, laserové a plazmové svařování. Je doporučeno svařovat s maximálním vneseným teplem do 1,5 kJ/mm a dodržení mezi housenkové teploty na hodnotě 150 °C. Jako ochranné plyny jsou nejčastěji využívány směsi prvku argonu, vodíku a hélia. Pro ochranu kořene lze využít plyn argon, případně levnější alternativa směsi vodíku a dusíku (tzv. formovací plyn). U metod svařování tavící se elektrodou je pro lepší stabilizaci elektrického oblouku uvnitř svarové lázně vhodnější používat směs argonu a CO<sub>2</sub> obvykle do obsahu 2,5 %, pro metodu 136 je v praxi používáno obsahu 18 %. Pro některé jakosti metastabilním austenitických ocelí existuje riziko snížení korozivzdornosti v intervalu teplot 440 až 860 °C, kde dochází po hranicích zrna k precipitaci karbidu Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> a tím vyššího rizika vzniku mezikrystalové koroze při působení korozního prostředí. Pro oceli s obsahem uhlíku cca 0,03 % a vyšším mohou být ve struktuře oceli použity prvky titanu, niobu a tantalu pro stabilizaci struktury. Tyto prvky mají vyšší afinitu k uhlíku než chrom, proto přednostně tvoří karbidy s uhlíkem a nedochází tak ke snížení obsahu chromu rozpuštěného v oceli a snížení korozivzdornosti. Jako přídatné materiály je vhodné volit oceli s nízkým obsahem uhlíku do 0,03 %. Austenitické oceli náchylné na difuzi vodíku uvnitř svarového spoje a vzniku studených trhlin s tím spojených.

Svařence austenitických korozivzdorných ocelí obvykle tepelně nezpracováváme, výjimkou mohou být složité svařence případně zvláštní požadavky. Pokud je to nutné lze využít žíhání ke snížení pnutí v intervalu teplot 400-500 °C a 850-950 °C. Pro druhý interval teplot je ovšem nutné zvážit možnost precipitace velkého množství karbidů a tím snížení korozní odolnosti. Z tohoto důvodu je vhodné dále aplikovat rozpouštěcí pro teploty 950-1150 °C nebo stabilizační žíhání pro teploty 850-950 °C v závislosti na druhu jakosti oceli. U obou typů žíhání musí následovat rychlé ochlazení, aby nedošlo k precipitaci karbidů. [1, 2, 3, 4, 8]

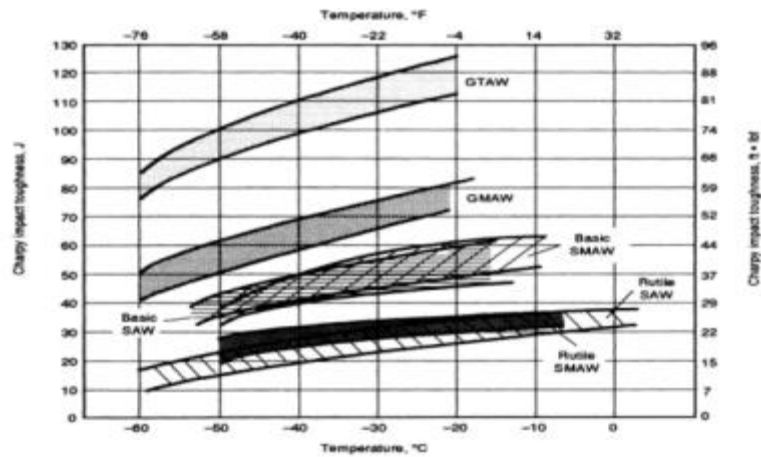
#### 2.3.4. Austeniticko-feritické korozivzdorné oceli

Jak už název napovídá, jedná se o dvou fázovou (duplexní) ocel, která má ve struktuře poměrné zastoupení feritu a austenitu, z čehož vyplývá že obsah austenitotvorných a feritotvorných legujících prvků je v přibližně v rovnováze, kde obsah feritu je dán přibližně v 40-70% struktury a na zbytek připadá austenit. Dále pak zastoupení feritu ve struktuře je dáno podmínkami tepelného zpracování. Ocel se zpracovává nad teplotou 1000 °C, kde se vzrůstající teplotou je podpořena transformace feritu na vrub austenitu a dále ve struktuře bude docházet k precipitaci karbidů a intermediálních fází. Zpravidla většinový výskyt feritotvorných prvků bude ve struktuře feritu a totéž platí pro austenitickou část. Ve feritické struktuře bude daleko více docházet k tvorbě nových intermediálních fází a karbidů vlivem vyšší difuze než v austenitické, kde struktura zůstane fakticky nedotčena. Pod teplotou 1000 °C dochází k precipitaci karbidu M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> především po hranicích feritických bohatších na chrom ale i austenitických zrn, ale tento krok nemá ovšem vliv na riziko vzniku mezikrystalové koroze především z důvodu vysokého legování obsahem chromem v celé struktuře oceli, jako tomu bylo u austenitických ocelí. Rizikem u duplexních ocelí je především rozsah teplot 700 °C až 1000 °C, kde vzniká intermediální fáze, která je označována jako sigma fáze. Sigma fáze je nemagnetická a má tetragonální krystalografické uspořádání, z pohledu vlastností je tvrdá a křehká. Tato fáze se vyskytuje i u austenitických ocelí, kde ovšem pro vznik fáze je nutné setrvat v desítkách minut nebo v řádu hodin, Naproti tomu u duplexních ocelí dochází ke vzniku v řádu minut. Jistou výhodou je, že zpravidla k rychlejšímu vyloučení fáze dochází při ohřevu na teploty než při ochlazování. Precipitace sigma fáze v oceli má velmi negativní vliv na mechanické vlastnosti, kde přítomnost

fáze nemusí být viditelná okamžitě, ale může se projevit během provozu součásti pod určitým kritickým zatížením a může vést až k lomu, ke kterému by za normálních okolností bez výskytu fáze nedošlo.

Mechanické vlastnosti duplexních ocelí jsou přibližně 1,5-2x vyšší, než v porovnání s austenitickými oceli, což v případě užití je možné snížit rozměry pro použité součásti, čímž dojde i k výrazné úspoře hmotnosti použitého materiálu. Využití austeniticko-feritických ocelí hlavně ve velmi agresivních prostředích anorganických kyselin, kyseliny sírové a fosforečné, prostředích s velkým výskytem koncentrace chloridů – např. prostředí mořské vody. Pro tyto případy je od materiálu vyžadována vysoká odolnost proti bodové, šterbinové a mezikrystalické korozi a proti koroznímu praskání pod napětím, kde duplexní oceli všechny tyto vyjmenované body splňuje.

Svařitelnost ocelí je dobrá všemi metodami obloukového svařování, obdobně jako tomu bylo u austenitických ocelí. Pro svarový spoj je nutné použít přídavné materiály specifické vždy pro konkrétní jakost oceli, přídavný materiál je stejně jako základní materiál obsahuje do max. 0,03 % uhlíku, a dále nízká hodnota obsahu síry a fosforu do max. 0,03 %, přičemž tyto dva prvky jsou nežádoucí z důvodu rizika vzniku trhlin za horka při ochlazování feritické části struktury. V některých případech lze použít přídavný materiál více legovaný niklem, který může podpořit výrazněji transformaci austenitické struktury. Svarový spoj není vlivem částečné austenitické struktury náchylný na difúzi vodíku, včetně použití např. plynů pro ochranu kořene na bázi vodíku. V současnosti není prokázán negativní vliv u duplexních ocelí na vlastnosti svarového spoje. Oceli jsou svařovány bez předehřevu, v některých případech je předehřev aplikován na vysoce legované oceli, teplota předehřevu je rozsahu 100-150 °C. Po svařování v běžných případech není vyžadováno tepelné zpracování, ale pro svařování svarů např. trubek je vhodné svařence tepelně zpracovat a obnovit původní strukturu oceli rozpuštěním precipitátů v TOO a svarovém kovu. Pro svařování vícevrstvých svarů je volena teplota interpass do 150 °C. Jako ochranné plyny svarové lázně pro svařování metodou TIG jsou nejčastěji používány směsi argonu, dusíku – obvyklé zastoupení 2-3 % a případně helia – zastoupení do 30 %. Jako formovací plyn pod kořen svaru je využíván zpravidla čistý dusík, ovšem použít lze i argon nebo směsi těchto dvou plynů. Použití dusíku především ve formovacím plynu má pozitivní vliv na transformaci austenitické struktury. Pro svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou jsou jako ochranné plyny stejné jako u austenitických ocelí (viz. popsáno výš), použití formovacích plynů jako u metody TIG. Pro svařování austeniticko-feritických ocelí je vhodné vnést do svarového spoje maximálně 1,5 kJ/mm, Vyšší vnesené teplo může mít vliv na vznik hrubozrnné struktury ve feritické struktuře, která může mít negativní vliv na vrubovou houževnatost. Při svařování je nutné omezit přístup kyslíku ke svarové lázni, která má též negativní vliv na vrubovou houževnatost spoje. Na obr. 4 je viditelný vliv jednotlivých metod svařovacích procesů na vrubovou houževnatost při proměnlivé teplotě pro ocel jakosti 1.4501. [1, 2, 3, 4, 8, 9]



Obr. 4 – Hodnoty vrubové houževnatost v závislost na teplotě a druhu svařovacího procesu pro austeniticko-feritickou ocel [8]

### 3. Koroze korozivzdorných ocelí

Koroze je nežádoucí znehodnocení a porušování materiálu chemickou nebo elektrochemickou reakcí, které převážně probíhá reakcí kovů nebo slitin přes rozhraní s kapalnou nebo plynou látkou, při níž dochází v reakci kovu známé jako oxidace. Tento stav je způsobem směřováním soustavy do termodynamicky stabilnějšího stavu s nižší volnou entalpií, přičemž za stabilní stavy můžeme považovat oxidy a sulfidy. Postup koroze s výjimkou některých kovů je samovolný pozvolný pochod, který nelze zastavit, ale lze však omezit. Koroze zpravidla postupuje od vnějšího povrchu do vnitřku materiálu. Zvýšení životnosti součástí a zařízení závisí na zabrání, zpomalení postupu koroze na volbě správného materiálu nebo případně volbě ochranného povlaku, v neposlední řadě případně na úpravě korozního prostředí. [2, 3, 12]

#### 3.1. Elektrochemická koroze

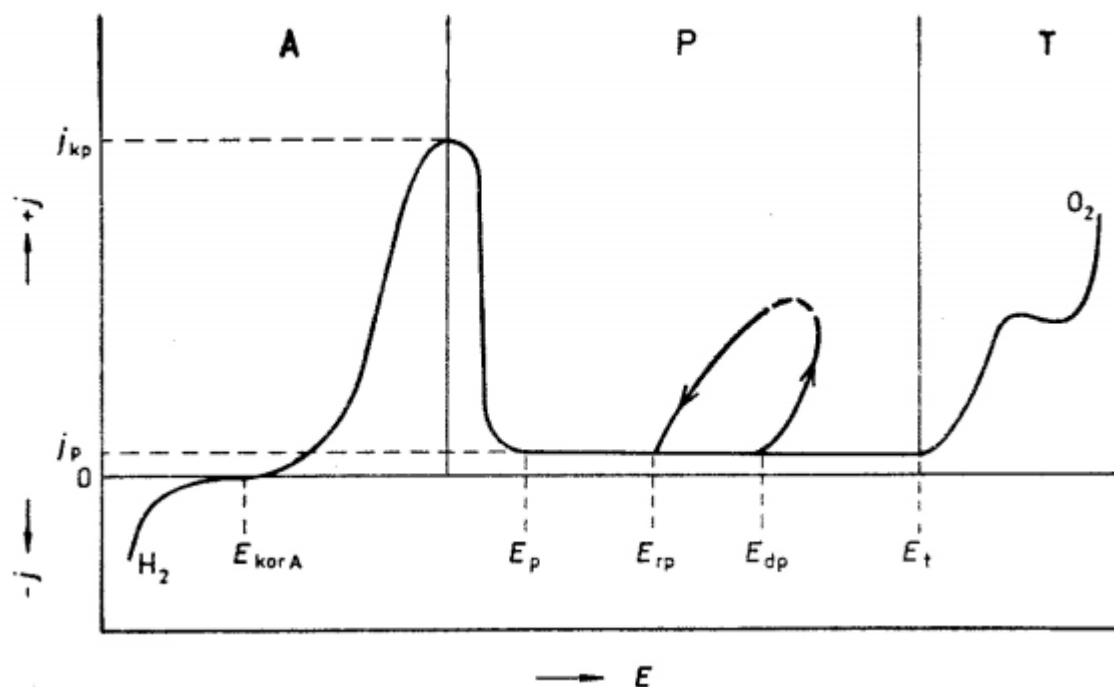
Elektrochemická koroze je možná působením iontů při disociaci korozního prostředí a vznikem galvanického makročlánku nebo mikročlánku. Ta vzniká zpravidla použitím materiálu v elektricky vodivém prostředí (elektrolytu), kde dojde při působení elektrického náboje. Při samotné korozi lze pozorovat dva děje – anodickou a katodickou reakci. Anodická reakce má za následek oxidaci (korozi) a u katodické reakce probíhá redukce elektronů z korozního prostředí. Obě reakce probíhají souběžně, z toho vyplývá že elektrony uvolněné při anodické reakci jsou redukovány při katodické reakci. Průběh korozního děje může probíhat na konkrétním místě povrchu kovu nebo odděleně. Lokálního korozního napadení je podmíněno homogenním složením kovu a roztoku v ploše dotyku. Z pohledu velikosti lze korozi rozdělit na makročlánek, kde spojením dvou kovů různé ušlechtilosti vznikne makročlánek a anodová reakce přednostně působí na méně ušlechtilý kov. Označení pro mikročlánek je použití pro korozní článek v měřítku mikrostruktury, který může vzniknout v místech vměstků, kde v těchto místech vznikají katodická místa a anodická místa.

Polohy anodické a katodické reakce se mohou v průběhu procesu koroze měnit, vytváření těchto poloh a jejich kvantitativního měření lze charakterizovat pomocí elektrochemických potenciálů, tedy potenciál dvou míst např. rozhraní kov-elektrolyt. Základním představitelem pro zařazení elektrochemické ušlechtilosti je potenciál vodíkové elektrody s nejčastějším označením jako  $E_0$ , kde tato hodnota je považována pro rozdělení kovů na ušlechtilé, které mají kladný potenciál a kovy neušlechtilé se záporným potenciálem. Z elektrochemické ušlechtilosti a standardních potenciálů jednotlivých prvků nelze úplně v praxi předpovědět korozní odolnost, kde

např. standartní potenciály kovů platí pouze pro počátek korozní reakce, a ne pro celý její průběh. Dalšími důležitými vlivy na korozní reakci jsou stav povrch, na němž koroze působí, druh koroze a neposlední řadě druh a koncentrace korozního činidla a jeho teplota. Pro lepší srovnání korozní odolnosti je v praxi spíše vhodné použít tzv. korozní potenciál, který odráží přibližnou korozní odolnost pro daný typ kovů v daném přibližném prostředí. Tím prostředím může být např. provzdušněný roztok chloridu sodného - 0,5N-NaCl.

V průběhu velmi krátké doby korozní reakce zpomaluje a dochází k procesu polarizace elektrod. Při tomto procesu dojde ke změně potenciálů na elektrodách a tím že dojde k jejich přiblížení a zmenšení celkového rozdílu napětí. Na polarizované katodě dochází k nahromadění iontů, zejména vodíkových a ty brání dalším iontům v přístupu. Polarizací anody dochází ke vzniku korozních produktů na povrchu anody. Opačný proces, který korozní reakci obnovuje nebo zrychluje, se nazývá depolarizace. Tento proces může vznikat pohybem elektrolytu nebo oxidací vodíku na katodě.

Kov může být za určitých podmínek jako stav, koncentrace prostředí, teplota a tlak velkou chemickou stabilitu, pro tento stav používáme označení pasivace (pasivní stav). Jev je často popisován jako vznik oxidické vrstvy na povrchu kovu, kde tato vrstva je na povrchu stabilní nebo metastabilní, kdy průběh korozní reakce zpomaluje nebo úplně zastavuje. Základní průběh stavu pasivity lze znázornit pomocí polarizační křivky, která je znázorněna na obr. 5. Jedná se o závislost proudu na změně potenciálu.



Obr. 5 – Schéma polarizační křivky pro korozivzdornou ocel Cr18Ni9 [10]

Na obrázku lze pozorovat tři základní oblasti označené – A, P, T. Pro oblast označenou „A“ platí, že na povrchu kovu dochází aktivní korozní reakci, kde je kov rozpouštěn v závislosti na proudové hustotě, jedná se tedy o oblast aktivního rozpouštění, pro oblast. Přechem parametřů korozní reakce do oblasti „P“ dochází k rychlému zpomalení rychlosti koroze na povrchu kovu a současně v bodě  $E_p$  vzrůstá pasivační potenciál a vzniká stabilní nebo metastabilní oxidační vrstva v oblasti pasivity. Se vzrůstajícím potenciálem rychlost koroze nemá do určitých hodnot žádný vliv. Pro hodny potenciálu  $E_{rp}$  (repassivační) a  $E_{dp}$  (depassivační) v této oblasti může dojít za určitých okolností k poškození pasivační vrstvy kovu např. působením

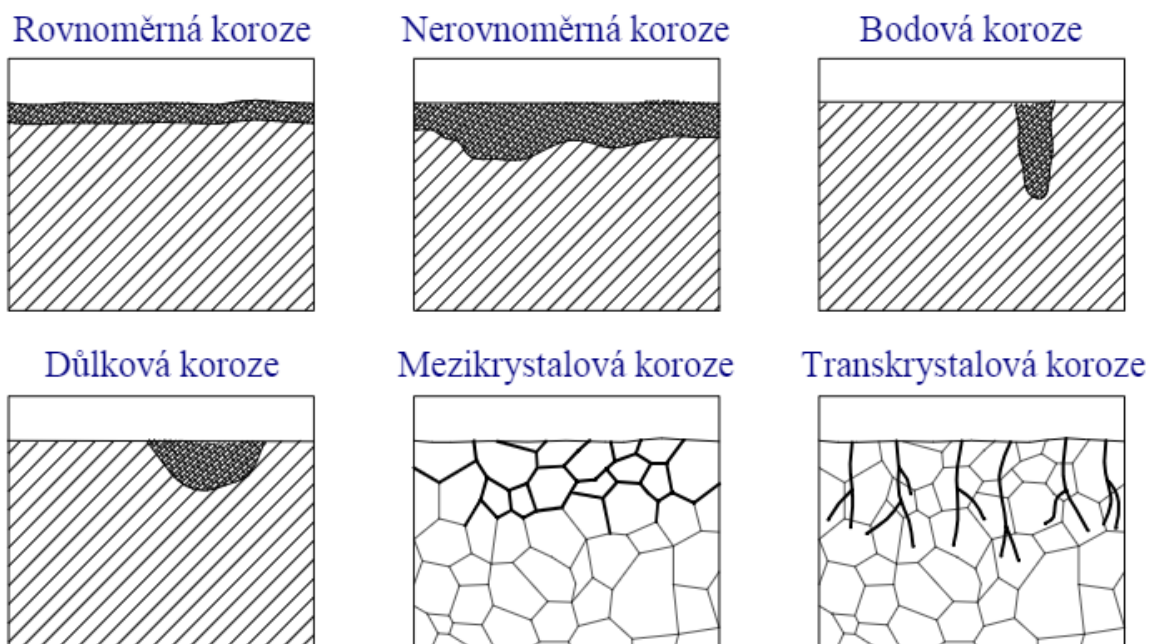
chloridových iontů na některé druhy korozivzdorných ocelí. Toto porušení nastane při hodnotě  $E_{dp}$ , tzv. průrazový potenciál, tento druh napadení zpravidla specifický pro bodovou korozi. Obnovení pasivační vrstvy je možné s poklesem potenciálu na hodnotu  $E_{rp}$ . Pro transpasivační oblast označenou „T“, dochází při překročení  $E_t$  k destabilizaci oxidů v pasivační vrstvě, oxidy přechází na vyšší oxidační stupeň. Takto dochází ke korozi prvků chromu a molybdenu v korozivzdorných ocelí v transpasivační oblasti při působení silných oxidačních činidel. [2, 3, 10, 11, 12]

### 3.2. Chemická koroze

Tento druh koroze je založen na chemickém nebo fyzikálně-chemickém vlivu na poškozování materiálu. Principem korozní reakce ve vztahu prostředí-materiál je snaha dostat se do uspořádanější soustavy s menší volnou entalpií. Fyzikálně-chemický vliv na korozní odolnost je spojen s především s mechanickým namáháním – korozní praskání a únava. Vedle působení elektrického proudu, může být koroze ovlivněna radiačním zářením nebo bakteriemi. Podle druhu napadení materiálu lze korozi rozdělit dle druhu napadení materiálu na rovnoměrnou a nerovnoměrnou. Tyto napadení lze pozorovat na povrchu a vyhodnocovat je tak v průběhu životnosti zařízení.

#### 3.2.1. Typy korozního napadení a jejich průběhy

Prvním druhem korozního napadení lze považovat **korozí rovnoměrnou**. Pro korozivzdorné oceli se s tímto druhem napadení setkáme především u ocelí žáruvzdorných a žárupevných, oceli legované chromem vytvoří na povrchu kovu vrstvu oxidů chromu, které lze považovat za korozi rovnoměrnou, vytvořením této vrstvy zpravidla dochází ke zpomalení nebo zastavení korozní reakce. Tato reakce je z pohledu vlivu bezpečnosti na provoz zařízení jako nejpříjemnější a nejlépe předvídatelná. Zpravidla z experimentálních měření lze objektivně stanovit korozní rychlost a úbytky na dané časové období. Pro korozní rychlost platí vyjádření jednotek [ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ ] nebo [ $\text{mm}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ ]. Na obrázku č. 6 je vidět rovnoměrná koroze a další typy koroze popsané dále.



Obr. 6 – Typy základních korozních napadení [3]

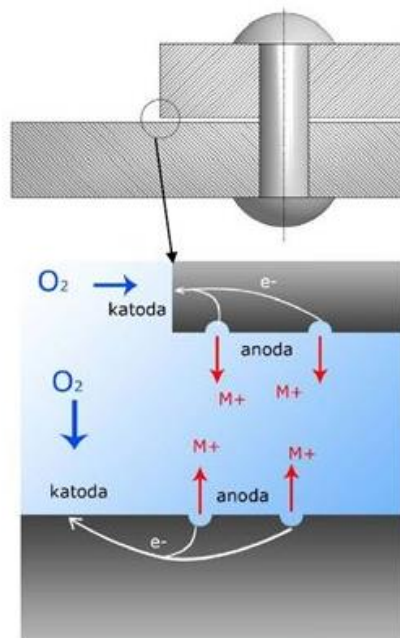


Dalším druhem korozního napadení patří do nerovnoměrné napadení a je jím **důlková a bodová koroze**. Rozdíl mezi dvěma jmenovanými je odvozen od velikosti napadení-poměr šířky nebo průměru k hloubce. Tento druh napadení je charakteristický pro korozivzdorné austenitické oceli použité v prostředí s vysokým obsahem chloridových iontů. Tato koroze vznikne v místě porušení pasivační vrstvy oceli a rozhraní s vnějším prostředím, kdy nedojde k dostatečně rychlé obnově této vrstvy. Chloridové ionty pronikají povrchovou vrstvou, póry a poruchami, kde přednostně dochází k jejich absorpci před kyslíkem a jinými sloučeninami a tím dochází k dalšímu rozrušení materiálu. Toto poškození může průběžně vést až do úplného poškození materiálu skrze celou tloušťku materiálu. Odolnost proti důlkové korozi závisí především na použití legujících prvků chromu, molybdenu a dusíku. Na základě těchto prvků lze pro korozivzdorné oceli stanovit tzv. ekvivalent PREN (Pitting resistance equivalent number), který udává přibližný empirický odhad korozní odolnosti vůči bodové korozi. Ekvivalent lze vypočítat dle vzorců 1.5 a 1.6, kde druhý jmenovaný zohledňuje legující prvek wolframu. [10, 11, 12]

$$PREN = \%Cr + 3,3 \cdot \%Mo + 16 \cdot \%N \quad (1.5)$$

$$PREN = \%Cr + 3,3 \cdot [\%Mo + 0,5 \cdot \%W] + 16 \cdot \%N \quad (1.6)$$

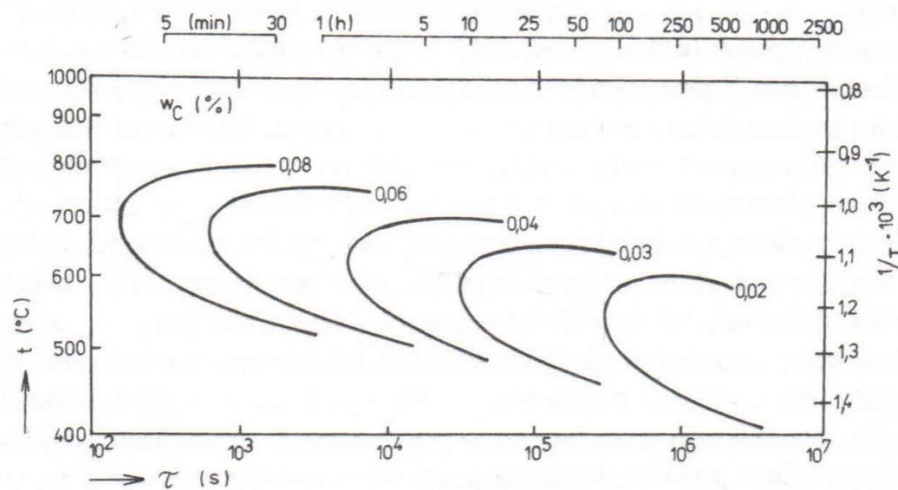
Typ koroze, který funguje na podobné mechanice jako bodová koroze je **koróze štěrbinová**. K jejím nejčastějším výskytům dochází v jemných kapilárách nebo štěrbinách zpravidla se špatným přístupem průtoku a výměny vodného elektrolytu. Tyto specifikace pro vznik koroze jsou dány především konstrukčním řešením, jako jsou spojení nýtováním mezi dvěma plechy, přerušované stehové svary, šroubový spoje. Kyslík obsažený v elektrolytu je spotřebován počátkem korozní reakce katodou a další kyslík již není možné dodat pro špatnou cirkulaci elektrolytu v kapiláře. V tento okamžik dochází ke změně vnitřního povrchu kovu kapiláry na anodu, na níž se nacházejí oxidy složky kovu, elektrony uvolněné reakcí směřují na rozhraní kovu a elektrolytu, kde není omezen přístup kyslíku. Tato reakce zpravidla probíhá v okolí počátku štěrbin, kde tato oblast se stává katodou. Na obrázku č. 7 je vidět průběh štěrbinové koroze a místo iniciace u nýtovaného spoje. [10, 11, 12]



Obr. 7 – Princip štěrbinové koroze [13]

Nesprávné tepelné zpracování feritických nebo austenitických korozivzdorných ocelí způsobuje, že hranice zrn které oddělují jednotlivé krystaly, se stávají obzvláště citlivé na

**mezikrystalickou korozi.** Koroze tohoto druhu vede k mechanickým vlastností a houževnatosti. Vystavení oceli v oblasti specifické teploty a doby, které vyvolávají náchylnost k mezikrystalové korozi, se nazývá senzibilizace a tento proces je typický především pro feritické a austenitické nerezové oceli. Proces napadení korozi není typický jen pro celý povrch materiálu, ale především v tepelně ovlivněných oblastech např. při svařování. Koroze napadá pouze úzkou oblast hranic zrn a postupuje po hranici zrn až do hloubky materiálu nebo skrze celý průřez materiálu. Pro pravděpodobnost výskytu mezikrystalové koroze u svarových spojů je vhodné volit jakosti s ocelí s přísadou tzv. stabilizačních prvků, které jsou silně karbidotvorné a přednostně tvoří karbidy s uhlíkem. Dále je nutné zajistit co nejnižší obsah uhlíku v oceli, to platí především pro austenitické, austeniticko-feritické a feritické struktury. Hranicí nízkého uhlíku bývá obsah do 0,03 %, kterého je možné dnešními metalurgickými procesy dosáhnout. Dalším krokem může být použití výše jmenované austeniticko-feritické oceli, která má výrazný vliv na vznik mezikrystalické koroze. Tento mechanismu spočívá ve zvětšení hranice zrn jednotlivých fází, zvýšeném obsah chromu ve feritické fázi a rychlost difúze chromu ve feritu je až 100x větší než v austenitu. Tímto lze omezit ochuzení chromu po hranicích austenitických zrn. Na obrázku č. 8 je vidět vliv uhlíku v rozsahu 0,02 až 0,08 % na vznik citlivosti k mezikrystalické korozi v oblasti teplot 400-800 °C.



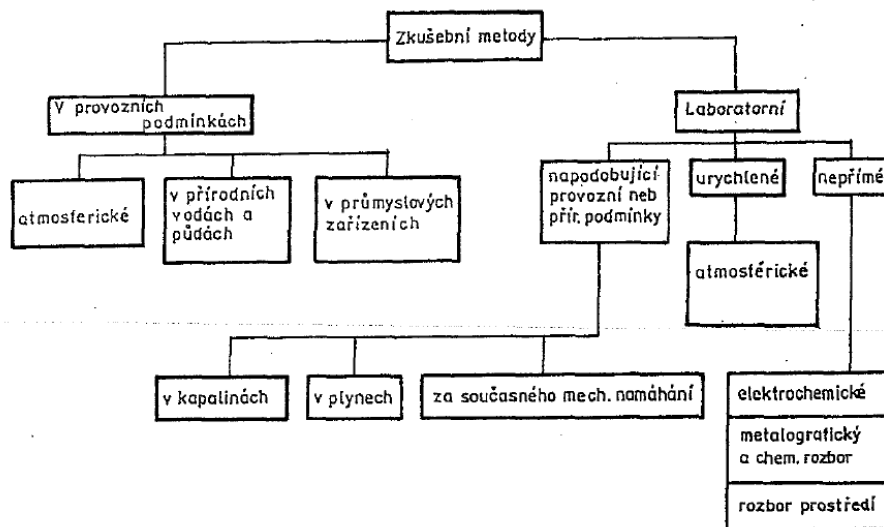
Obr. 8 – Vliv obsahu uhlíku v oceli Cr18Ni9 na citlivost mezikrystalické koroze [2]

Vedle mezikrystalické koroze u austenitických ocelí, vzniká tato koroze i u ocelí ferických. Pásmo teplot pro zcitlivění a vznik MKK je obvykle při teplotách od 950 °C až do teplot solidu, kde následně rychlé zchlazení v oblasti svarového spoje vyvolává zcitlivění a riziko vzniku MKK. Naopak pomalé ochlazení nebo krátkodobý ohřev do teplot 650-750 °C může regenerovat zcitlivěnou oblast. Primárně je doporučeno pro konstrukce v korozních prostředích používat feritické oceli stabilizované titanem a niobem, kde podíl prvků je ovšem vyšší než u ocelí austenitických. Též snížením obsahu uhlíku dochází ke snížení citlivosti na vznik MKK, obsah uhlíku bývá na hodnotách pod 0,003 %, kde pochopitelně např. svařovaný spoj nesmí být nahličen v průběhu svařování. I přes nízký obsah uhlíku je MKK odolnost proti mezikrystalické korozi v porovnání s austenitickými oceli 10x nižší. [10, 11, 12]

Dalším druhem korozního napadení je i **transkrystalická koroze.** Ta má podobný mechanismus jako koroze mezikrystalická, kde ovšem šíření koroze přechází z hranic zrn přímo do zrna fáze a šíří se napříč zrnem. Jedná se o velmi nebezpečnou variantu koroze, kterou nelze pozorováním povrchu materiálu prakticky odhalit. U korozivzdorných ocelí se tento druh korozního napadení ovšem vyskytuje pouze výjimečně, výjimkou může být korozní napadení chromniklových ocelí v prostředí chloridů. [10, 11, 12]

### 3.3. Metody testování korozivzdorných ocelí

Testování korozivzdorných ocelí se provádí za účelem odolnosti materiálu v daném prostředí při předem definovaných podmínkách korozní reakce. Testování lze zpravidla rozdělit do dvou základních skupin např. dle obrázku č. 9. Na obrázku je patrné rozdělení korozních testů na metody při provozních a laboratorních podmínkách.



Obr. 9 – Rozdělení zkušebních metod korozních zkoušek [3]

#### 3.3.1. Testování v provozních podmínkách

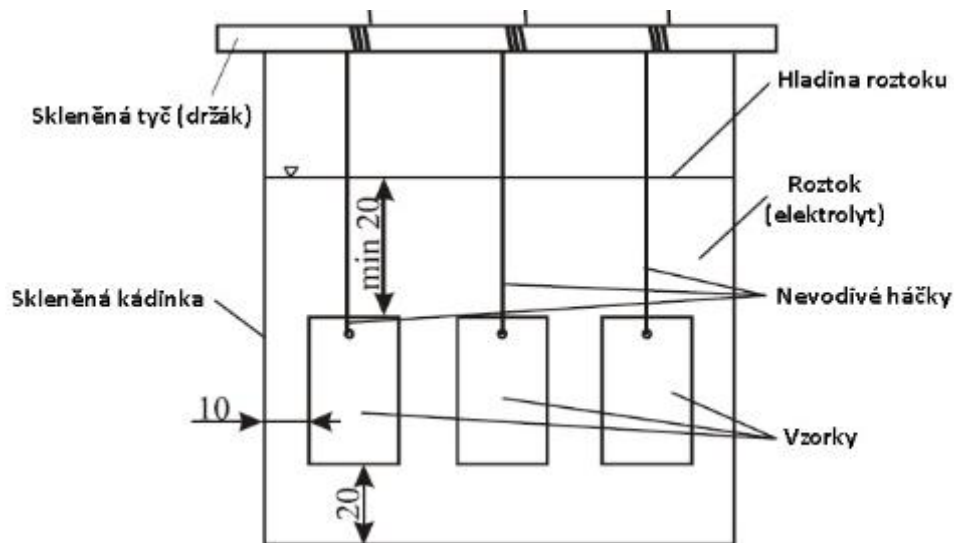
Pro testování v provozních podmínkách se zpravidla jedná o testování dlouhodobé tzn. 6 měsíců a více. Tyto testy slouží k ověření laboratorních výsledků nebo slouží k simulaci korozní reakce, které nelze zpravidla v laboratorních podmínkách dosáhnout. Vzorky testované v podmínkách atmosféry jsou zpravidla umístěny do testovacích stanic, které jsou především definované atmosférickými podmínkami (průběhy teploty, vlhkosti, srážek, sluneční záření) a prostředím umístění stanic (průmyslové oblasti, mořská nebo přímořská prostředí apod.). Při testování vzorků ve vodních prostředích sledujeme dále vliv a rychlost proudění a vliv mikroorganismů na korozní odolnost, ořez mechanickými částicemi. Zkoušky v půdách jsou prováděny za sledování agresivity prostředí na vybrané jakosti oceli, při závislosti umístění vzorků do různé hloubky půdy za podmínky zachování původní struktury půdy. Posledním testováním prostředím jsou zpravidla prostředí v průmyslových zařízeních, kde dochází k ověřování vhodných materiálů a případných vhodných povrchových úprav pro dané průmyslové podmínky. Z těchto testů je důležité umístění a tvar zkušebních vzorků. [2, 3, 12, 14, 15]

#### 3.3.2. Testování v laboratorních podmínkách

Testováním vzorků v laboratorních podmínkách je zpravidla myšleno testování v kapalných a plynných prostředích, zpravidla v kombinaci s aerosolovým rozprašováním.

Pro testování v kapalných prostředích využíváme úplného nebo částečného ponoru vzorku do baňky nebo nádrže s korozním činidlem. Tak jako je znázorněno na obrázku č. 10, kde vzorky jsou zavěšeny nevodivě do lázně s korozním činidlem. Volbou vhodných podmínek a prostředí lze korozní reakci urychlit. Urychlená korozní zkouška v kapalném prostředí pro korozivzdorné oceli je např. zkouška v 65 % kyselině dusičné za varu. Zkoušení probíhá v 5 cyklech po 48 hodinách. Tímto způsobem lze tak testovat například vzorky svarových spojů k náchylnosti ke strukturní korozi (mezikrystalickou, transkrystalickou). Pro testování bodové

korozí lze korozivzdorné oceli testovat v kyselých roztocích chloridových solí (chlorid železitý, chlorid stříbrný). [2, 3, 12, 14, 15]



Obr. 10 – Princip korozní zkoušky s úplným ponorem [15]

Pro testování vzorků v plynném prostředí jsou používány elektrické pece s automatickou regulací. Je však nutné dodržet rychlost proudění plynu pod maximální hodnotou - 1 cm/s. Dále je nutné přesně specifikovat složení plynného prostředí. Teploty testování jsou přes 900 °C, kde v oblasti těchto teplot je možné testovat korozivzdorné oceli na žáruvzdornost. Jedná se především o korozivzdorné oceli feritické struktury, které jsou vhodné pro zařízení do těchto teplot.

Dalším z řady laboratorních testů je testování v kondenzační komoře, která napodobuje testování odolnosti atmosférických podmínek, kde při teplotě 35 °C jsou vzorky při 100% relativní vlhkosti vystaveny prostředí napodobující např. průmyslová znečištění.

Zkušební metoda v solné mlze je prováděna v zařízení, kde dochází k rozprašování aerosolu chloridu sodného při teplotě též 35 °C, jako u testování v kondenzační komoře. Tento druh testování je vhodný pro korozivzdorné oceli, které mají být například aplikovány v přímořských oblastech. Tento test korozní odolnosti byl použit v následující praktické části pro testování svařených vzorků z pohledu korozní odolnosti.

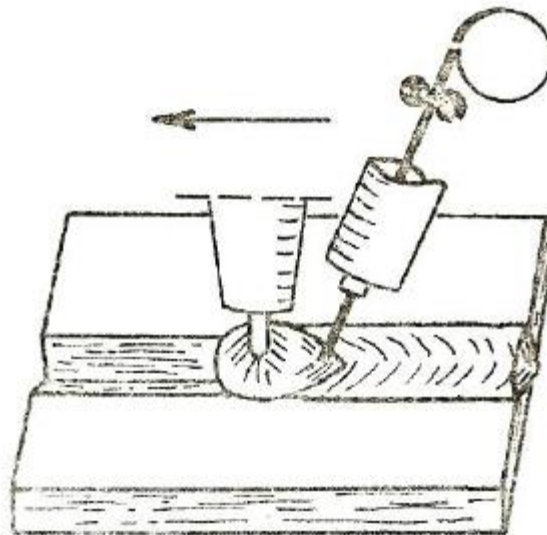
Zvláštním druhem testování je zkoušení vzorků při mechanickém namáhání v korozních podmínkách, kdy především ověřujeme správnost zvolené konstrukce a správnou volbu materiálu. Při těchto testech lze zjistit náchylnost zvolených materiálů ke koroznímu praskání a ke korozní únavě za konstantního zatížení a konstantní deformace. [2, 3, 12, 14, 15]

## 4. Progresivní metody svařování

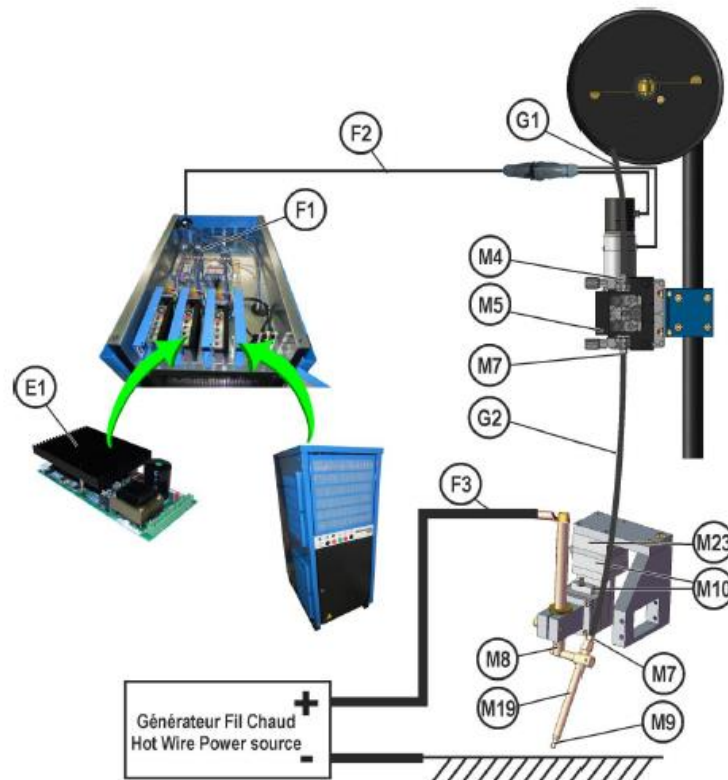
Mezi progresivní metody lze zařadit metody svařování, které zvyšují produktivitu výroby a tím jsou ekonomicky příznivější. Dalším důvodem může být zajištění lepší kvality svaru než dosud běžnými metodami, ať už je myšleno z pohledu kvality svarového spoje nebo snížení objemu vneseného tepla a dosažení tím menší tepelně ovlivněné oblasti a lepší korozivzdornosti. V následující kapitole budou probírány vybrané specifické metody nebo jejich okrajová část, kterou lze považovat za progresivní metodu v oblasti svařování.

### 4.1. Svařování TIG s horkým drátem

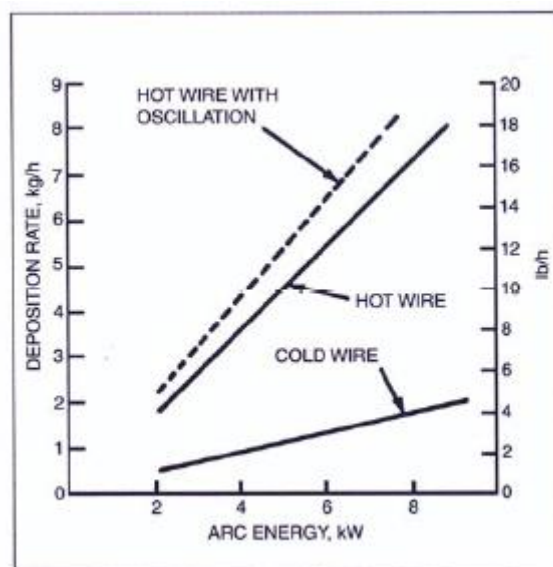
Tato metoda svařování TIG s horkým drátem byla vyvinuta přibližně v roce 1966. Princip této metody je odlišný od klasického svařování TIG, kde přídavný materiál podávaný do svarové lázně má teplotu pokojovou teplotu těsně před tím, než dojde k ohřevu a natavení od oblouku v místě tvorby svarového spoje. Odlišnost metody spočívá v ohřevu drátu přiváděným do lázně, kde těsně před natavením drátu je do pomocného zařízení přiveden proud z odlišného zdroje, než je pro samotný svařovací proces. Tento proud prochází drátem přídavného materiálu a dochází k jeho ohřevu. Při dalším posunu drátu směrem k lázni, dochází k jeho odtavení do lázně. Není nutný tak skokový ohřev a odtavování drátu je v tomto případě i plynulejší. Teplota drátu při ohřevu je do oblasti teplot tavení přídavného materiálu. Tyto metody jsou v praxi používány zásadně pro mechanizované svařování s počítačově řízeným pohybem svařovací hlavy. Takto osazené svařovací hlavy lze nalézt například na svařovacích sloupcových automatech. Na obrázku č. 11 je schéma principu svařování TIG s horkým drátem s podáváním drátu za svařovacím hořákem. Na obrázku č. 12 je více přiblíženo zapojení a usazení zařízení pro ohřev drátu vzhledem k podavači drátu. Na obrázku č. 13 je blíže vidět porovnání metody horkého drátu s klasickou metodou bez ohřevu. Výhody této metody jsou především ve vyšším objemu odtavovaného přídavného materiálu, toho lze využít výhodnější skladbou při svařování vícevrstvých svarů a snížit tak celkový počet housenek a celkové vnesené teplo. [16, 17]



Obr. 11 – Princip svařování TIG s horkým drátem [17]



Obr. 12 – Schéma zařízení pro podávání drátu z cívky se zařízením pro ohřev drátu [16]

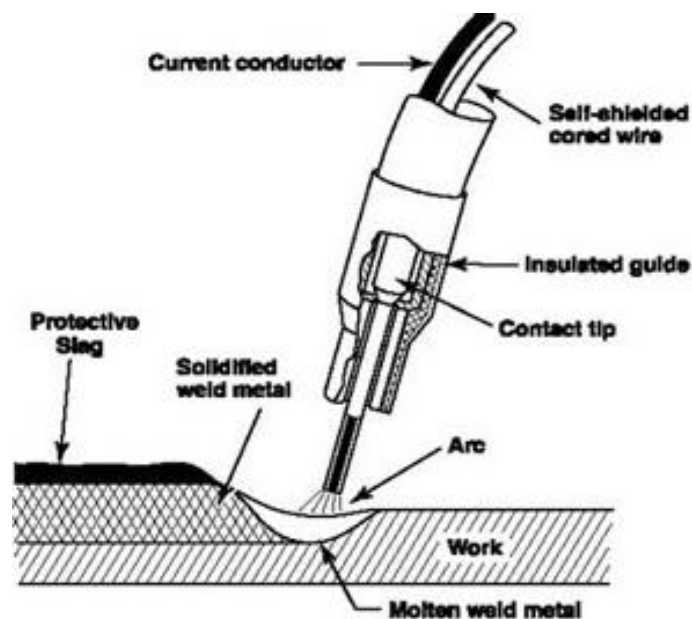


Obr. 13 – Porovnání odtavování přídavného materiálu – TIG s horkým drátem; TIG s studeným drátem; TIG s horkým drátem + oscilace [17]

## 4.2. Svařování plněným trubičkovým drátem bez ochranného plynu

Tato metoda pro svařování je kombinací ručního svařování obalenou elektrodou a metodou MIG/MAG. S touto metodou se lze někdy setkat i pod názvem „Innershield“, která je specifická především pro svařování uhlíkové oceli. Pro korozivzdorné oceli lze zpravidla nejčastěji v literaturách pojem „svařování plněným drátem bez ochranného plynu“. Ochrana svařové lázně před chemickými reakcemi s okolím probíhá stejně jako u svařování obalenou

elektrodou, kde vytvořená struska na povrchu svarové housenky vzniklá chemickou reakcí v oblouku chrání svarovou a plní řadu dalších funkcí jako dezoxidace a denitrifikace svarové lázně, leguje svarový kov o prvky, u kterých by mohlo dojít k propalu. A dále napomáhá stabilizovat svarovou lázeň při svařování v polohách. Svařování touto metodou je možné ve všech polohách. Odtavování přídavného materiálu do svarové lázně bývá kapkovém režimu, přičemž svařování probíhá při stejnosměrném napětí. Pro svařování korozivzdorných ocelí jsou na trhu přídavné materiály dostupné od výrobců jako Esab nebo Lincoln Electric, kde nabídka přídavných materiálů je dostupná pro jakosti ocelí dle značení americké normy AISI 304 a AISI 316, a přechodový drát pro svařování AISI 309 pro uhlíkové oceli vybraných jakostí. Hlavní výhodou této metody je svařování v montážních a stavebních podmínkách do rychlosti větru až 50 km/hod, kde jiné metody svařování není možné použít. Tato metoda je dále vhodná pro zajištění vysokého průvaru svaru a vysokého odtavovacího výkonu přídavného materiálu, kde v porovnání s obalenou elektrodou je výsledek až 4násobně vyšší. Metodu je doporučeno používat od tloušťky 5 mm základního materiálu pro tupé a koutové svary. [5, 18, 19]



Obr. 14 – Princip metody svařování plněným trubičkovým drátem bez ochranného plynu – FCAW-S [19]

## 5. Návrh experimentu

### 5.1. Výběr materiálu – základní parametry

Pro experimentální část byl vybrán materiál austeniticko-feritické korozivzdorné oceli s označením – X2CrNiMoN 25-7-4 (1.4410; SAF 2507). Tento materiál je vhodný pro aplikace do vysoce korozních prostředí, které se vyskytují především v chemickém a petrochemickém průmyslu. Tento materiál může být použit například pro tepelné výměníky chlazené mořskou vodou. Jedná se tedy o prostředí, kde se především vyskytuje vysoké množství chloridových iontů, kde jiné obvyklé jakosti korozivzdorných ocelí selhávají.

Pro svařování vzorků byly použity polotovary plechu v jmenovitých tloušťkách 3 a 6 mm, s požadavky na polotovary pro tlakové účely dle ČSN EN 10028-7. V tabulce č. 1 je viditelné porovnání požadavků normy na chemické složení oceli se složeními, které byly dodány v atestu.

Tab. 1 Porovnání chemických složení dodaných plechů pro experiment [20]

Chemické složení [hm. %]									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
Dle normy	max. 0,03	max. 1	max. ≤ 2	max. 0,035	max. 0,015	24- 26	6-8	3-4,5	0,24- 0,35
Plech – t=6 mm	0,016	0,38	0,75	0,023	0,001	25,1	6,89	3,80	0,26
Plech – t=3 mm	0,015	0,38	0,79	0,030	0,001	24,99	6,84	3,78	0,278

Vedle lepší korozní odolnosti materiálu mají austeniticko-feritické oceli lepší mechanické vlastnosti především v oblasti meze kluzu a meze pevnosti. Srovnatelné mechanické vlastnosti mají v oblasti nárazové práce s austenitickými oceli, kde s klesající teplotou dochází k větším rozdílům, které mají negativní výsledky pro austeniticko-feritické oceli. Z tohoto poznatku lze říci, že oceli duplexní mají chování tranzitní křivky, kde vlivem velkého podílu austenitu ve struktuře oceli je křivka posunuta k nižším teplotám. Podíl austenitu ve struktuře oceli po tepelném zpracování bývá dle dostupných zdrojů udáván v rozsahu 40-60 %, kde zbytek struktury zpravidla připadá na zastoupení feritu. Při svařování těchto ocelí je nutné volit správné parametry, aby rozložení chemického složení po svařování bylo opět optimálně obnoveno. Porovnání mechanických vlastností oceli 1.4410 – mez kluzu, mez pevnosti, tažnosti a tvrdosti je vidět v tabulce č. 2. Do tabulky byli zaneseny data z ČSN EN 10028-7, atestů plechů a materiálového listu.



Tab. 2 Porovnání mechanických vlastností oceli 1.4410 [20]

Označení vzorků	Mechanické vlastnosti oceli 1.4410						
	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	Tažnost A [%]	Nárazová práce KV [J]			Tvrдость [HV]
ČSN EN 10028-7; $t \leq 8$ mm	535 ÷ 550	750 ÷ 1000	20	min. 150 (podélně při 20 °C)	min. 90 (příčně při 20 °C)	min. 40 (příčně při -40 °C)	neuveďeno
Materiálový list	540	min. 780	min. 25	min. 100 (při 20 °C)			max. 310
Atest plechu $t=6$ mm	696	873	33	99 (při 20 °C)			272
Atest plechu $t=3$ mm	708	907	32	neuveďeno			278

## 5.2. Návrh svarových spojů

Návrh svarových spojů byl navržen s ohledem možné aplikace na výrobky tlakových nádob, výměníků a skladovacích nádrží. Svarové spoje byly především navrženy pro metody ručního svařování TIG (dále jako metoda 141), metodou MAG (dále jako metoda 135) a v neposlední řadě pro svařování hlavních obvodových a podélných svarů nádob mechanizovanou metodou svařování – plazmou (dále jako metoda 15). Z pohledu geometrie svaru byl vybrán svar tupý s plným průvarem. Jednotlivé úpravy svarových hran budou probrány samostatně dále.

Příprava zkušebních plechů byla zvolena stříháním na tabulových nůžkách. Následná úprava svarové hrany byla zvolena hoblováním. Tyto metody byly zvoleny s ohledem na minimální tepelné ovlivnění struktury základního materiálu.

Přídavný materiál byl vybrán s ohledem na jakost základního materiálu a ekonomičnost pro případnou výrobu. Přídavný materiál byl ve formě drátu navinutého na cívku pro metody 15 a 135, pro ruční svařování metodou 141 měl přídavný materiál formu tyče. Dodané přídavné materiály a jejich složení jsou vidět v následující tabulce č. 3. Zdrojem chemického složení byl atest přídavného materiálu.

Tab. 3 Chemické složení dodaných přídavných materiálů

Chemické složení [hm. %]														
	Metoda svařování	Klasifikace přídavného materiálu	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Cu	Al	W
Drát LNT 2507 (d=2 mm)	141	W 25 9 4 NL	0,015	0,047	0,59	0,018	0,001	25,1	9,2	3,97	0,26	0,15	0,007	0,01
Drát LNT 2507 (d=2,4 mm)	141	W 25 9 4 NL	0,016	0,039	0,59	0,014	0,001	25,3	9,3	4,05	0,26	0,11	0,007	0,03
Cívka Zeron 100X (d=1 mm)	15; 135	G 26 9 4 N L	0,012	0,24	0,67	0,025	0,001	25,2	9,2	3,55	0,23	0,57	-	0,63

Jedním ze základních svařovacích parametrů pro svařování kontrolních vzorků byl parametr vneseného tepla, kde hodnota vneseného tepla by neměla překročit 1,5 kJ/mm. Výpočet vneseného tepla byl proveden dle následující vzorce 1.7:

$$Q_{EN} = \frac{I \cdot U \cdot \eta}{v} \text{ [J.mm}^{-1}\text{]} \quad (1.7)$$

kde: I [A] – svařovací proud oblouku

U [V] – napětí svařovacího oblouku

v [mm.s<sup>-1</sup>] – rychlost svařování

η [-] – tepelná účinnost svařovacího procesu

Pro následující výpočet je nutná volba tepelné účinnosti pro metody svařování. Tyto hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce č. 4. Jednotlivé výpočty pro svarové spoje a případně pro jednotlivé svarové housenky jsou uvedeny dále u jednotlivých záznamů svařování kontrolních vzorků. [21, 22]

Tab. 4 Základní parametry tepelné účinnosti vybraných metod svařování [21, 22]

Metoda svařování	Tepelná účinnost svařovací metody – $\eta$ [-]
TIG - 141	0,6
MIG/MAG -131, 135, 136	0,8
plazmové svařování - 15	0,6
svařování pod tavidlem - 121	1,0
svařování obalenou elektrodou - 111	0,8

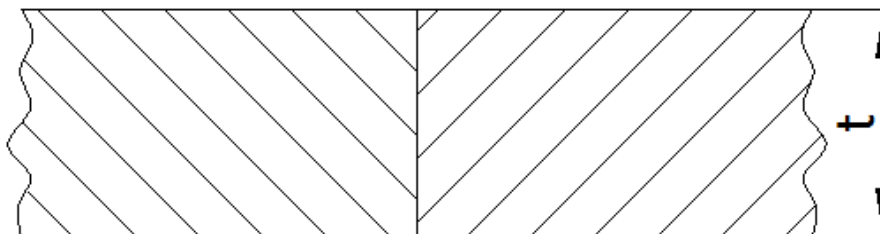
Svařování kontrolních vzorků předcházelo několik zkušebních plechů, na kterých byly odzkoušeny základní navržené parametry autorem práce. Tyto parametry byly případně odlaďeny, aby během svařovacího procesu bylo možné udržet stabilní oblouk uvnitř svařovací lázně. Svářečí práce prováděl svářečí personál s mnohaletou praxí ve svařování austenitických ocelí.

U vícevrstvých svarů bylo nutné dodržet teplotu interpass pod hodnotou 100 °C, v průběhu svařování bylo nutné v průběžně čistit vždy předchozí svarové housenky od oxidovaného povrchu nerezovým kartáčem. V případě přerušení svarové housenky v průběhu svařování bylo preventivně vybroušeno pro následné napojení a pokračování následující svarové housenky. Bez tohoto kroku by mohlo vzniknout vysoké riziko vady. Před svařováním byly plechy očištěny a odmaštěny v oblasti svarových hran a přilehlých ploch, stehování a svařování plechů probíhalo na přípravku, který měl za účel ochránit svar a stehy před oxidací. Svařování probíhalo v poloze PA – vodorovná shora. Ochranný plyn přiváděný pod kořen svaru byl pro všechny metody svařování shodný, kde volba byla pro 100 % N, který dle dostupných zdrojů podporuje reformaci strukturní složky austenitu a podporuje této fáze na úkor fáze feritu. Tímto krokem nadále dochází i zlepšení korozivzdornosti oceli proti bodové korozi. [1, 8, 23]

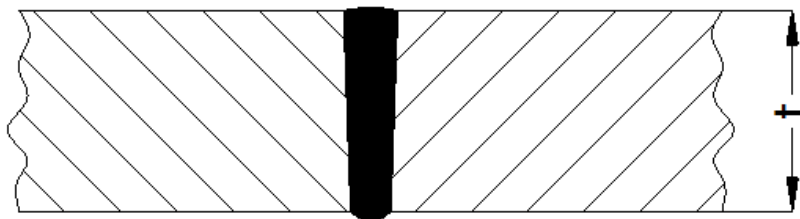
Svařené kontrolní vzorky byly přednostně zkoušeny v rozsahu pro získání certifikátu WPQR, kde o rozsahu zkoušek pojednává norma ČSN EN ISO 15 614-1 a jimi dále citované normy. [24]

### 5.3.Svařování metodou 15

Geometrie svarové hrany a provedení svaru na jednu svarovou housenku jsou vidět na obrázcích č. 15 a 16. Stehované plechy byly sesazeny bez mezery a bez přesazení. Svařování probíhalo na pomocné liště s přívodem ochranného plynu. Přídavný materiál byl použit Zeron 100X.



Obr. 15 – Geometrie hran svarového spoje metody 15



Obr. 16 – Geometrie svarové housenky po svařování metodou 15

Svaření kontrolního vzorku bylo provedeno celkově na třech zkušebních vzorcích a jednom konečném kontrolním vzorku, který byl podroben zkoušení. Svařovací parametry jednotlivých vzorků jsou v tabulce č. 5, barevně je odlišen kontrolní vzorek. Dle parametrů je vidět, že hlavním proměnným parametrem bylo napětí na oblouku, který má hlavní podíl na zhotovení vyhovujícího svaru z pohledu průvaru, vyhovujícího převýšení svarové housenky a kořene. V případě špatných hodnot napětí dochází k nenatavení svarových hran plechů. Vzorky byly svařeny na sloupovém svařovacím portále C&B Matic 42-43 Air Liquide.

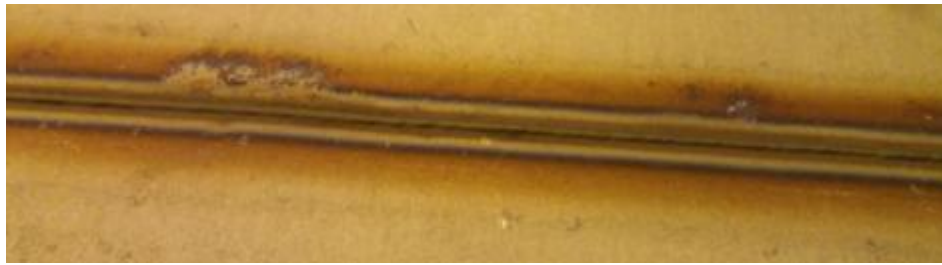
Tab. 5 Svařovací parametry vzorků pro metodu 15

Pokus č.	Proud [A]	Napětí [V]	Svařovací rychlost [mm/s]	Vnesené teplo [kJ/mm]	Průtoky plynu [l/min]			Průměr trysky [mm]
					plazmový	ochranný	ochranný pod kořen	
1	164	31,7	3,7	0,84	6,5	26	75	2,5
2	166	30,7	3,9	0,78	6	26	76	2,5
3	168	30,5	3,9	0,78	6	24	76	3
4	168	30,1	3,9	0,78	6	25	76	3

Po svaření proběhlo prvně hodnocení svaru vizuální kontrolou s hodnocením vad dle ČSN EN ISO 5817 v stupni B a dále následovaly kapilární a rentgenové zkoušky. Kontrolní vzorek je zdokumentován na obrázku č. 16 a 17. [25]



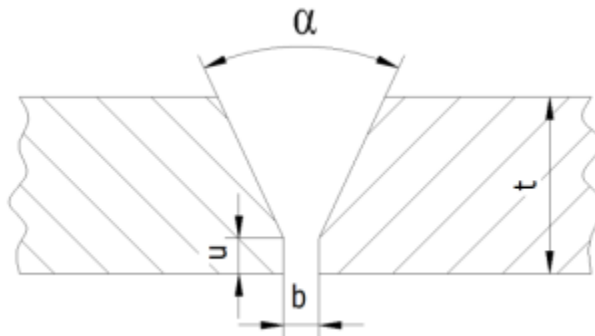
Obr. 17 – Kontrolní vzorek z lící strany svaru pro metodu 15



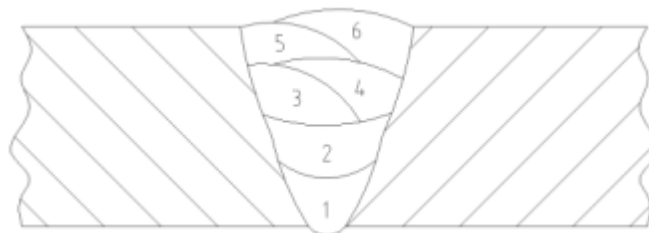
Obr. 18 – Kontrolní vzorek ze strany kořene pro metodu 15

#### 5.4.Svařování metodou 141

Geometrie svaru pro svařování metodou 141 je ukázána na obrázku č. 19, kde úhel úkosu hrany plechu je  $30^\circ$  s celkovým úhlem  $\alpha=60^\circ$ , otupení hrany plechu  $u=1,5$  mm, svarová mezera byla zvolena  $b=4$  mm pro stehování. Tato geometrie svarové hrany byla shodná i pro metodu 135. Skladba housenek je zobrazena na obrázku č. 20, svařování bylo provedeno přímočarou housenkou – bez rozkyvu. Svářecí práce proběhly na svařovacím zdroji KEMPPi MasterTig MLS 4000, při použití stejnosměrného proudu. Tento typ proudu byl použit na všech svařovacích zdrojích pro svaření kontrolních vzorků, v tomto případě svaření vzorku nebyla použita pulzace. Průměr wolframové elektrody byl 2,4 mm.



Obr. 19 – Geometrie hran svarového spoje metody 141 a 135



Obr. 20 – Geometrie svarové housenky po svařování metodou 141

Přídavný materiál pro tuto metodu byl použit LNT 2507 průměru dle tabulky č. 6, ochranný plyn proudící okolo wolframové elektrody byl použit ve složení - 98% Ar + 2 % N<sub>2</sub>. Tento plyn je doporučen jako výhodný z mnoha zdrojů výrobců přídavného materiálu a základního materiálu - [3, 8, 26, 27]. Ochrana kořenové vrstvy byla zajištěna použitím - 100 % N<sub>2</sub>, kde dusík aktivně podporuje růst austenitické zárodků při ochlazování a tuhnutí materiálu v oblasti 1150 až 950 °C. Průtoky ochranných plynů pro ochranu kořene svaru 25 l/min pro ochranu svarové lázně pak hodnota činila 12 l/min.

Z tabulky je dále patrné rozdělení první housenky na tři úseky, kde bylo nutné jednotlivé stehy průběžně nabrousit před svařením, aby nedošlo ke vzniku vad. Svařené kontrolní vzorky lze vidět na obrázcích č. 21 až 23.

Tab. 6 Svařovací parametry vzorku pro metody 141

Č. svařované vrstvy (obr. 20)	Proud [A]	Napětí [V]	Svařovací rychlost [mm/s]	Vnesené teplo [kJ/mm]	Průtoky plynu [l/min]		Průměr přídavného materiálu [mm]
					ochranný	ochranný plyn pod ko- řen	
1-a	90	12,1	0,75	0,88	12	25	2
1-b	90	12,2	0,88	0,75	12	25	2
1-c	90	12,1	0,77	0,85	12	25	2
2	115	12,5	1,75	0,49	12	-	2,4
3	125	12,7	2,25	0,42	12	-	2,4
4	125	12,6	2,34	0,4	12	-	2,4
5	125	12,6	2,6	0,36	12	-	2,4
6	125	12,5	2,78	0,34	12	-	2,4



Obr. 21 – Kontrolní vzorek z lící strany svaru pro metodu 141



Obr. 22 – Kontrolní vzorek ze strany kořene pro metodu 141

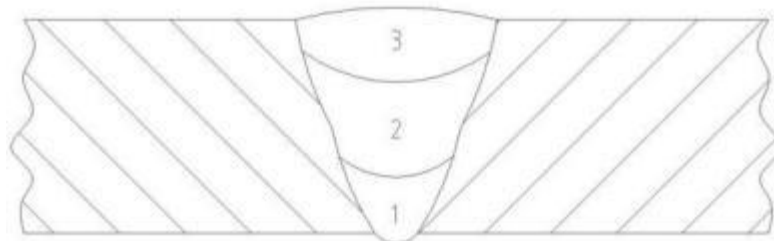


Obr. 23 – Detail na líc svaru pro metodu 141

Po provedení vizuální kontroly vzorky byly zjištěny ve dvou případech lokální vady ve formě částečně nenatavené hrany v délce cca. 5-8 mm. Tyto vady byly opraveny nabroušením a překryty následnou svarovou housenkou.

### 5.5. Svařování kombinací metod 141 a 135

Pro svaření kontrolního vzorku těchto dvou svařovacích metod, kde jako první metoda 141 byla určena pro svaření kořenové vrstvy na dvě svarové housenky, geometrické parametry nastehovaných plechů a úkosových hran jsou shodné jako u kontrolního vzorku metody 141 popsané v přechozí kapitole. Celkový počet svarových housenek byl tři pro tuto kombinaci metod, skladba těchto vrstev je patrná na obrázku č. 24. Svařování též probíhalo na stejném svařovacím zdroji. Svařovací parametry metody 141 zaznamenané při svařování jsou v tabulce č. 7. A pohled na zhotovené kořenové vrstvy je na obrázcích č. 25 a 26.



Obr. 24 – Geometrie svarové housenky po svařování metodou 141+135

Tab. 7 Svařovací parametry vzorku pro metody 141+135 – svařování metodou 141

Č. svařované vrstvy (obr. 24)	Metoda svařování	Proud [A]	Napětí [V]	Svařovací rychlost [mm/s]	Vložená energie [kJ/mm]	Průtoky plynu [l/min]		Průměr přídavného materiálu [mm]
						ochranný	formovací	
1-a	141	96	12,1	0,67	1,05	12	25	2
1-b	141	96	12,3	0,91	0,78	12	25	2
1-c	141	96	12,4	0,86	0,83	12	25	2
1-d	141	96	12,3	0,89	0,8	12	25	2
2	141	116	14	1,64	0,6	12	-	2,4



Obr. 25 – Drážka svaru připravena pro metodu 135



Obr. 26 – Plech připravený pro svařování metodou 135 - pohled do úkosu

Pro svařování metodou 135 byl zvolen ochranný plyn - 97,5% Ar + 2,5 % CO<sub>2</sub> dle doporučených zdrojů [4, 26], s průtokem 13-17 l/min pro jednotlivé zkušební svarové spoje uvedené v tabulce č. 7. Přídavným materiálem byla cívka Zeron 100X pro metodu 135 stejně jako pro metodu 15. Pro svařování byl použit svařovací zdroj EWM Phoenix 500 pro metodu 135. V průběhu zkoušení parametrů bylo svařeno několik vzorků dle tabulky č. 8 a vždy s negativním výsledkem po rentgenové zkoušce, kde na snímcích bylo vždy velké množství pórů v rozsahu, které jsou z hlediska hodnocení nepřijatelné. Po vizuální a kapilární kontrole byly tyto vzorky s vyhovujícím výsledkem.



Snahou u při úpravě parametrů bylo dodat svarové lázni více vneseného tepla, které bylo stále pod požadovaným limitem, touto změnou parametrů docházelo i ke změně typu přenosu kovu. Svařování za těchto parametrů probíhalo beze změny ochranných plynů. Dále níže v tabulce je označen vzorek, který i přes nevyhovující výsledek RTG zkoušky byl podroben dalšímu testování, jedná se o vzorek s nejvyšším zastoupením pórů.

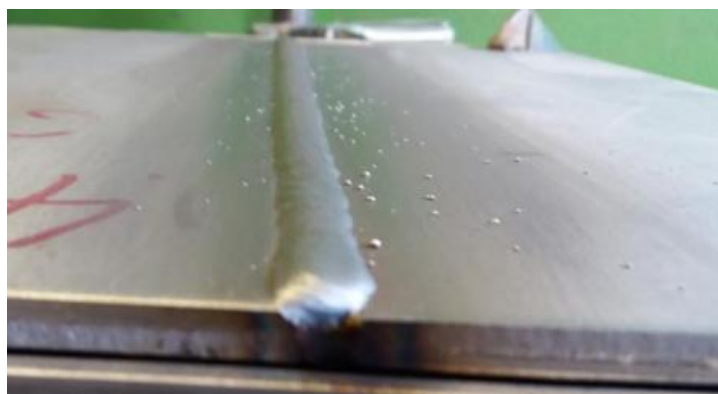
Tab. 8 Svařovací parametry vzorku pro metody 141+135 – svařování metodou 135

Pořadí vzorků	Metoda svařování	Proud [A]	Napětí [V]	Svařovací rychlost [mm/s]	Rychlost podávání drátu [m/min]	Vložená energie [kJ/mm]	Průtoky ochranného plynu [l/min]	Typ přenosu kovu v oblouku
1	135	169	23,6	3,88	9,2	0,82	13	Impulsní přenos
2	135	200	27,3	7,14	10,1	0,61	13	Přechodový přenos
3	135	226	30,7	5,88	10,8	0,94	15	Přechodový přenos
4	135	248	32,6	6,9	10,9	0,94	15	Sprchový přenos

Na obrázcích č. 27 a 28 je pohled na vzorky s krycí vrstvou metody 135, první vzorek značí pohled na neopracovaný svar ihned po svaření, níže je vidět již mechanicky očištěný svar.



Obr. 27 – Kontrolní vzorek č. 1 dle tabulky č. 9



Obr. 28 – Kontrolní vzorek č. 1 dle tabulky č. 9 - očištěný

## 5.6. Svařování metodou 135

Touto metodou byly svařeny kontrolní vzorky plechů tloušťky 3 a 6 mm. Svářecí práce na kontrolním vzorek síly 6 mm byly provedeny v Pačovských strojírnách, kontrolní vzorek tloušťky 3 mm byl svařen na Fakultně strojí na ZČU v Plzni.

### 5.6.1. Svařování kontrolních vzorků t=6 mm

Geometrie hrany svaru plechu byla shodná jako u předchozí metody svařování 141 – obr. 19, těmito parametry je myšleno otupení hrany plechu a úhel úkosu. Svarová mezera mezi plechy pro nastehování byla zvolena 3 mm v místě počátku svaru a 4 mm na konci svaru, kde v průběhu svařování kořenové vrstvy vlivem ohřevu materiálu dochází deformacím a stažení. Tyto vzorky byly svařovány až po svaření kontrolního vzorku kombinací metod 141+135, kde bylo zjištěno po radiografické zkoušce velké množství pórů ve svarovém spoji. Pro tyto metody bylo zvoleno svařování v přímočaré housence bez rozkyvu svařovacího hořáku (tzv. skládáním svarových housenek) pro svařování krycích vrstev. Pro druhý kontrolní vzorek byla volbou změna ochranného plynu, kde byla snaha přidáním hélia do směsi plynů dosáhnout vyšší teploty svarové lázně a technika svařování byla zvolena svařování s rozkyvem. Tyto parametry můžeme vidět v tabulkách č. 9 a 10 pro jednotlivé kontrolní vzorky v počtu svarových housenek. Pro první kontrolní vzorek byl tedy použit plyn ve složení - 97,5% Ar + 2,5 % CO<sub>2</sub>, a pro druhý kontrolní vzorek - 78% Ar + 20 % He + 2 % CO<sub>2</sub>. Svařovací zdroj byl použit EWM Phoenix 500, kde byly použity předvolené programy – ArCo<sub>2</sub> + 2-3 % CO<sub>2</sub> a ArHeCo<sub>2</sub> – 15-30 % He dostupné v paměti zdroje, v závislosti na použitém ochranném plynu. Přídavný materiál byl opětovně svařovací drát průměru 1 mm s označením – Zeron 100x průměru 1 mm.

Tab. 9 Svařovací parametry vzorku pro metody 135 s použitím plynu - 97,5% Ar + 2,5 % CO<sub>2</sub>

Pořadí svarové housenky	Proud [A]	Napětí [V]	Svařovací rychlost [mm/s]	Rychlost podávání drátu [m/min]	Vložená energie [kJ/mm]	Ochranný plyn [l/min]	Formovací plyn [l/min]	Typ přenosu kovu v oblouku
1	125	20,8	4	6	0,52	18	7	Impulsní přenos
2	132	22,8	6,06	5,8	0,4	15	-	Impulsní přenos
3	132	22,5	5,97	10,8	0,4	15	-	Impulsní přenos

Tab. 10 Svařovací parametry vzorku pro metody 135 s použitím plynu - 78% Ar + 20% He + 2% CO<sub>2</sub>

Pořadí svarové hou- senky	Proud [A]	Napětí [V]	Svařovací rychlost [mm/s]	Rychlost podávání drátu [m/min]	Vložená energie [kJ/mm]	Ochranný plyn [l/min]	Formovací plyn [l/min]	Typ přenosu kovu v ob- louku
1	126	20,8	3,24	6	0,65	14	8	Impulsní přenos
2	157	27,3	3,74	9	0,92	14	-	Impulsní přenos

Kontrola svarů vizuální kontrolou, neprokázala defekty. Defekty ovšem byly nalezeny při radiografické zkoušce na obou vzorcích, kde došlo výskytu porů stejně jako u svařování kombinace metod 141+135.

### 5.6.2. Svařování kontrolních vzorků t=3 mm

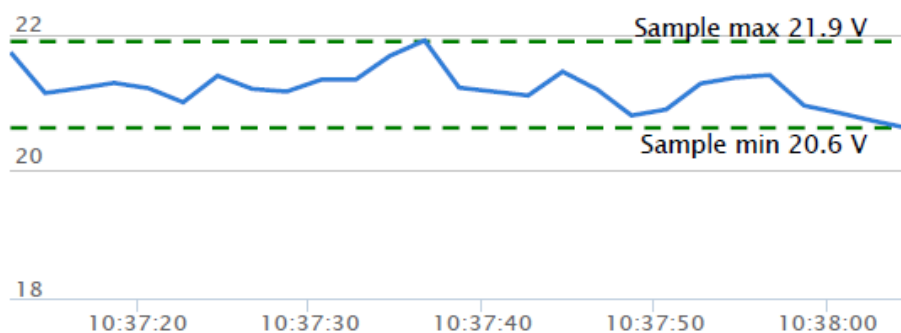
Svařování vzorků bylo realizováno na plechu tloušťky 3 mm, svařování bylo provedeno na úpravě svarové hrany bez úkosu shodně jako u plazmové svařování, jak je vidět výše na obrázku č. 15, ovšem svarová mezera bylo zvolena 1 mm. Svařovací zdroj byl použit od výrobce Kemppi, s označením FastMig X Power Source 450 A. Tento svařovací zdroj je vybaven rozhraním k připojení k počítači, který umožňuje správu svařovacího procesu a případně výstup jednotlivých svařování. Tyto výstupní parametry jsou zobrazeny na obrázcích č. 29 až 32, kde jsou zachyceny průběhy proudů a napětí v průběhu svařování svaru. Z průběhu křivky jsou patrné značné rozpětí na křivce proudu než na křivce napětí, což je patrně způsobeno zdrojem s plochou charakteristikou, kdy při změně odporu oblouku dochází ke korekci zvýšením nebo snížením proudové charakteristiky a napětí zůstává konstantní. Ochrana svarové lázně byla realizována použitím ochranného plynu - 78% Ar + 20% He + 2% CO<sub>2</sub> pro oba kontrolní vzorky. Pro ochranu svarové lázně ze strany kořene byl použit u jednoho vzorku plyn stejný jako ochranný, druhého kontrolního vzorku byl použit plyn - 100% N<sub>2</sub>. Přídavný materiál byl použit stejného chemického složení jako byla značka Zeron 100x od výrobce Lincoln Electric u předchozích svarových spojů, ovšem tento přídavný materiál byl od výrobce Esab s označením OK Autrod ER2209 s průměrem drátu 1 mm. Svařovací parametry jsou uvedeny v tabulkách č. 11 a 12.

Tab. 11 Svařovací parametry vzorku pro metody 135 s použitím plynů – ochranný plyn -78% Ar + 20 % He + 2 % CO<sub>2</sub>/ formovací plyn 78% Ar + 20 % He + 2 % CO<sub>2</sub>

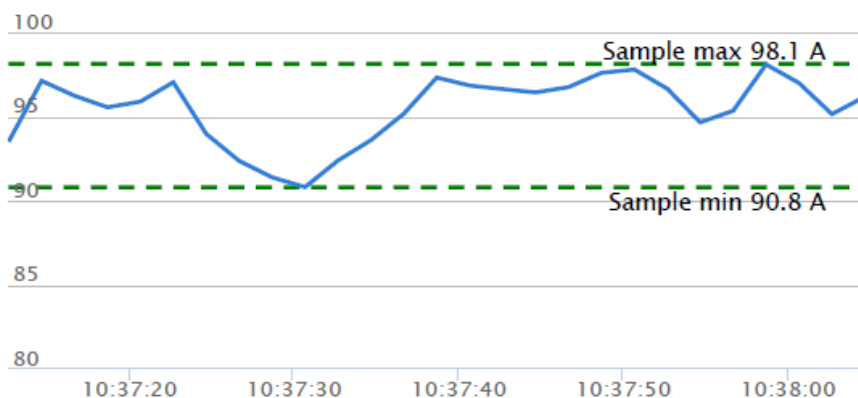
Pořadí svarové housenky	Proud [A]	Napětí [V]	Svařovací rychlost [mm/s]	Rychlost podávání drátu [m/min]	Vložená energie [kJ/mm]	Ochranný plyn [l/min]	Formovací plyn [l/min]	Typ přenosu kovu v oblouku
1	94	21,9	5,79	4,7	0,28	13	12	Impulsní přenos

Tab. 12 Svařovací parametry vzorku pro metody 135 s použitím plynů – ochranný plyn -78% Ar + 20 % He + 2 % CO<sub>2</sub>/ formovací plyn 100 % N<sub>2</sub>

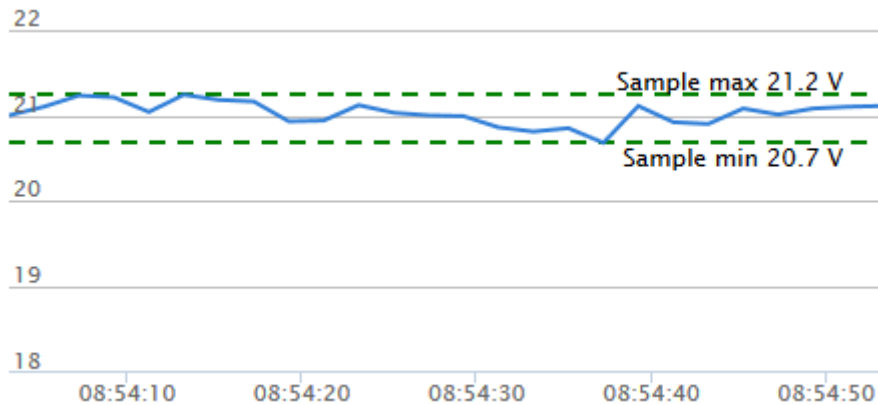
Pořadí svarové housenky	Proud [A]	Napětí [V]	Svařovací rychlost [mm/s]	Rychlost podávání drátu [m/min]	Vložená energie [kJ/mm]	Ochranný plyn [l/min]	Formovací plyn [l/min]	Typ přenosu kovu v oblouku
1	93	21	5,09	4,5	0,31	14	12	Impulsní přenos



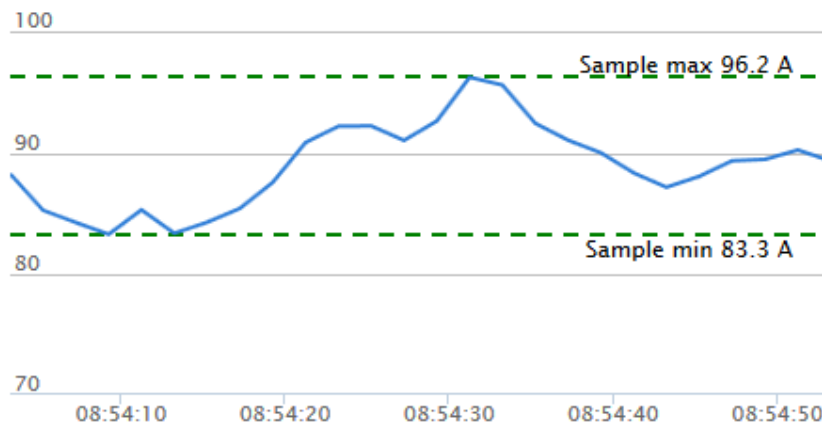
Obr. 29 – Průběh napětí pro kontrolní vzorek s použitím směsi plynů – ochranný plyn -78% Ar + 20 % He + 2 % CO<sub>2</sub>/ formovací plyn 78% Ar + 20 % He + 2 % CO<sub>2</sub>



Obr. 30 – Průběh proudu pro kontrolní vzorek s použitím směsi plynů – ochranný plyn -78% Ar + 20 % He + 2 % CO<sub>2</sub>/ formovací plyn 78% Ar + 20 % He + 2 % CO<sub>2</sub>



Obr. 31 – Průběh napětí pro kontrolní vzorek s použitím směsi plynů – ochranný plyn -78% Ar + 20 % He + 2 % CO<sub>2</sub>/ formovací plyn 100 % N<sub>2</sub>



Obr. 32 – Průběh proudu pro kontrolní vzorek s použitím směsi plynů – ochranný plyn -78% Ar + 20 % He + 2 % CO<sub>2</sub>/ formovací plyn 100 % N<sub>2</sub>

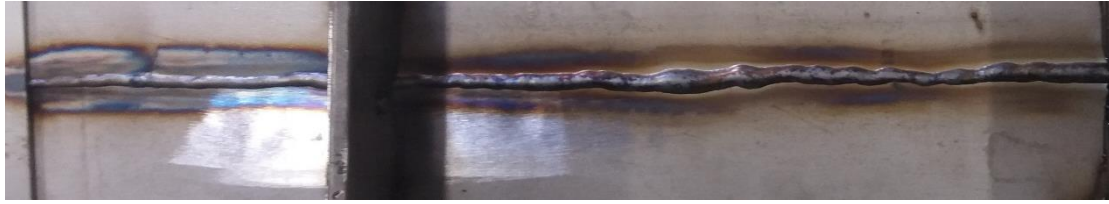
Na obrázcích č. 33 až 36 jsou zobrazeny pohledy na svar z lící a kořenové strany pro oba kontrolní vzorky. Vizuální kontrola byla shledána jako vyhovující.



Obr. 33 – Pohled na kořen svaru pro kontrolní vzorek s použitím směsi plynů – ochranný plyn -78% Ar + 20 % He + 2 % CO<sub>2</sub>/ formovací plyn 78% Ar + 20 % He + 2 % CO<sub>2</sub>



Obr. 34 – Pohled na líc svaru pro kontrolní vzorek s použitím směsi plynů – ochranný plyn -  
78% Ar + 20 % He + 2 % CO<sub>2</sub>/ formovací plyn 78% Ar + 20 % He + 2 % CO<sub>2</sub>



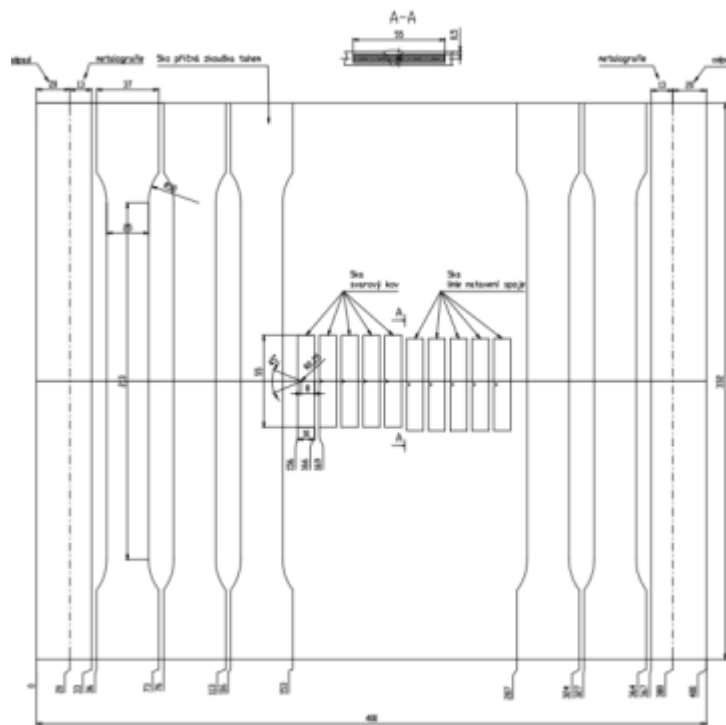
Obr. 35 – Pohled na kořen svaru pro kontrolní vzorek s použitím směsi plynů – ochranný plyn -  
78% Ar + 20 % He + 2 % CO<sub>2</sub>/ formovací plyn 100 % N<sub>2</sub>



Obr. 36 – Pohled na líc svaru pro kontrolní vzorek s použitím směsi plynů – ochranný plyn -  
78% Ar + 20 % He + 2 % CO<sub>2</sub>/ formovací plyn 100 % N<sub>2</sub>

## 5.7. Vyhodnocení kvality svařovaných spojů

Po svaření kontrolních vzorků byly tyto vzorky nejdříve testovány metodami NDT – vizuální, kapilární, radiografická. Po těchto testech bylo přistoupeno k testování destruktivnímu, druhy a rozsahy těchto testů byly zvoleny vzhledem k normě ČSN EN ISO 15 614-1 a jí souvisejících. Případné rozsahy testů byly dále upraveny možnosti dostupného materiálu. Na obrázku č. 37 je vidět plán odběru vzorků pro jednotlivé metody. Pro zkoušky ohybem a korozní test bylo nutné svaření druhé sady kontrolních vzorků. Toto svaření proběhlo za stejných podmínek jako kontrolní vzorky první sady. [24]



Obr. 37 – Plán odběru vzorků

Pro detailnější rozlišení jednotlivých testovaných vzorků a metod testování byla vyhotovena tabulka č. 13, kde jsou tyto informace uvedeny.

Tab. 13 Přehled zkoušených vzorků a rozsah metoda zkoušení

Označení vzorku č.	Metoda svařování (+ pozn.)	NDT zkoušky	Příčná zkouška tahem	Zkouška rázem v ohybu	Zkouška ohybem	Makro a mikrostruktura	Zkouška tvrdosti	Korozní zkouška
1	15	VT, PT, RT	X	X	X	X	X	X
2	141	VT, PT, RT	X	X	X	X	X	X
3	141+135	VT, PT, RT	X	X	-	X	X	-
4	135 (Ar+CO <sub>2</sub> ; t=6 mm)	VT, PT, RT	-	-	X	X	X	X
5	135 (Ar+He+CO <sub>2</sub> ; t=6 mm)	VT, PT, RT	-	-	X	X	X	X
6	135 (formovací plyn - Ar+He+CO <sub>2</sub> ; t=3 mm)	VT, RT	X	X	X	X	X	X
7	135 (formovací plyn - N <sub>2</sub> ; t=3 mm)	VT, RT	X	X	X	X	X	X

X – provedeno; - - neprovedeno

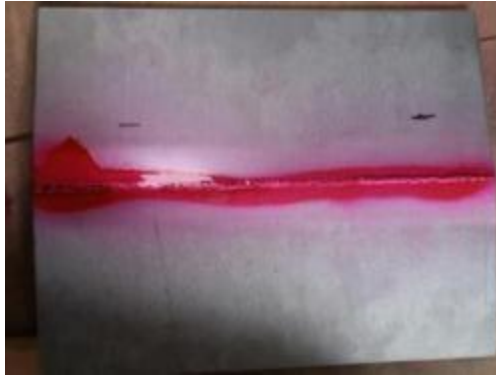
### 5.7.1. NDT zkoušky – vizuální, kapilární, radiografická zkouška

Hodnocení rozsahu a přípustnosti vad svarů na kontrolních vzorcích proběhlo dle normy ČSN EN ISO 5817 ve stupni B. [25]

Vizuální hodnocení svarů bylo vyhovující u většiny vzorků. Opravy svarové housenky byly nutné pouze u metody 141 pro vzorek 2 dle tabulky č 13.

Kapilární testování kontrolních vzorků bylo u všech spojů vyhovující a nebyly zjištěny žádné povrchové trhliny. Test byl proveden pomocí sady přípravků Ardrex – čistit, penetrant, vývojka. Na obrázku č. 38 je možné vidět jeden z testovaných kontrolních vzorků s naneseným penetrantem pro kapilární testování.

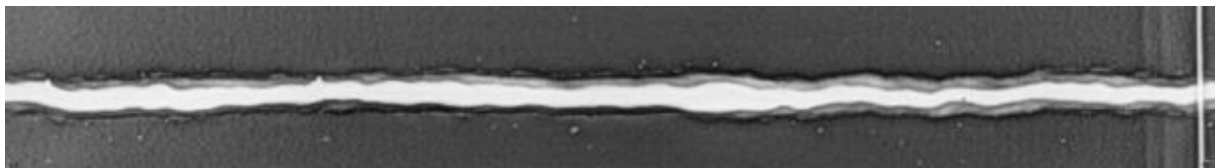




Obr. 38 – Kapilární test vzorku č. 2 s naneseným penetrantem

Posledním provedeným druhem nedestruktivního testu byla radiografická zkouška. Vzorky 1-5 byly svařeny v Pacovských strojírnách, a zde byly provedeny radiografické testy. Testované vzorky č. 1, 2 byly hodnoceny jako vyhovující. Vzorek č. 3 byl testován dvakrát z důvodu pórovitosti svarového kovu. Tento test byl před svařením krycí vrstvy metodou 135, aby došlo k objasnění, při kterém kroku svařování dochází ke vzniku pórů. Tyto dva radiografické testy odhalily, že póry vznikaly až po svaření krycí vrstvy metodou 135. A kde stejné a nepřijatelné vady pórů byly i na snímcích vzorků č. 4, 5.

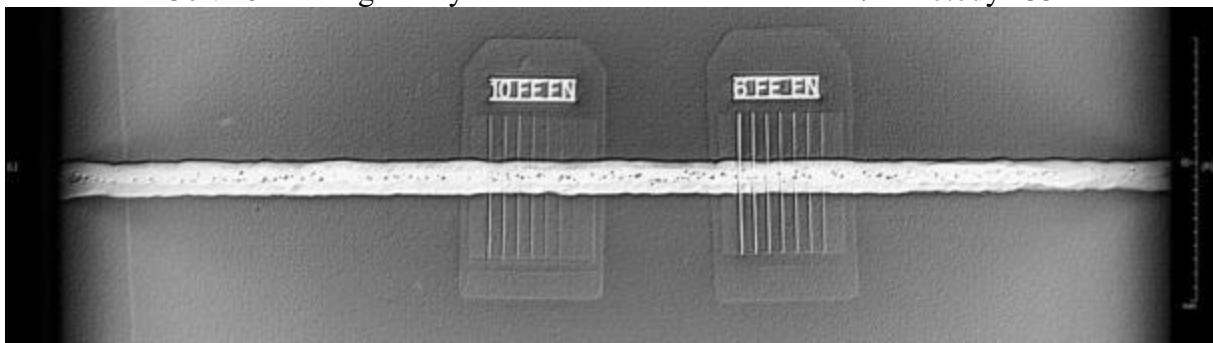
Radiografické testy proběhly i u vzorků č. 6, 7 na KMM ZČU v Plzni, kde bylo možné získat digitální podobu těchto snímků, které jsou patrné na obrázcích č. 39 a 40. Na snímku č. 40 je dále patrný a neočištěný rozstřík kovu po svařování. Dále při této možnosti byl znovu zdokumentován i výše popsany vzorek č. 3, kde na snímku č. 41 jsou patrné shluky pórů ve svarovém kovu. Velikost pórů byla odečtena 1-2 mm. [24, 25]



Obr. 39 – radiografický snímek kontrolního vzorku č. 6 – metody 135



Obr. 40 – radiografický snímek kontrolního vzorku č. 7 – metody 135



Obr. 41 – radiografický snímek kontrolního vzorku č. 3 – metody 141+135

### 5.7.2. Příčná zkouška tahem

Příčná zkouška tahem byla prováděna dle normy ČSN EN ISO 4136. Trhací testy proběhly na strojích ZWICK/ROELL Z050 pro vzorky č. 1, 2 a DENISON MAYES pro vzorky č. 3, 6, 7. Testy probíhali při pokojové teplotě. Hlavním parametrem pro vyhovující výsledek bylo dosažení minimální meze pevnosti -  $750 \pm 1000$  MPa jako hodnot základního materiálu. Tyto hodnoty jsou dány pro polotovary plechu v normě ČSN EN 10028-7. Dalšími hodnocenými parametry byla oblast lomu a tažnost. [20, 24, 28]

#### 5.7.2.1. Příčná zkouška tahem – vzorek č. 1

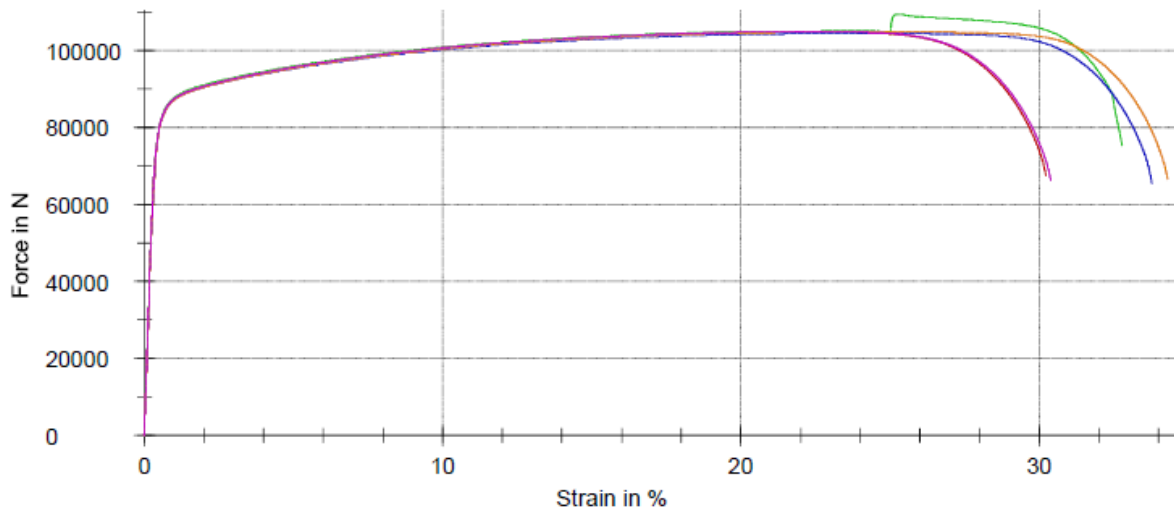
Minimální hodnota dosažené pevnosti v průběhu testu byla 831 MPa, tato hodnota a všechny ostatní jsou obsaženy v tabulce č. 14, dále na obrázku č. 42 jsou zdokumentovány přetržené zkušební tělesa, kde jedno z těles mělo místo lomu v TOO. Na obrázku č. 43 jsou zaneseny v grafu průběhy jednotlivých těles. Dosáhnuté hodnoty zkoušky jsou pro tento svařový spoj hodnoceny jako vyhovující.

Tab. 14 Mechanické hodnoty příčné zkoušky tahem vzorku č. 1

Číslo vzorku	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_t$ [%]	Místo lomu
1	653	840	30,2	Lom v TOO
2	651	877	32,8	Lom mimo svar
3	646	831	33,8	Lom mimo svar
4	649	841	34,3	Lom mimo svar
$\bar{x}$	<b>650</b>	<b>847</b>	<b>32,3</b>	
s	<b>2,99</b>	<b>20,34</b>	<b>1,83</b>	



Obr. 42 – Přetržené vzorky kontrolního spoje č. 1



Obr. 43 – Tahové diagramy těles kontrolního vzorku č. 1

### 5.7.2.2. Příčná zkouška tahem – vzorek č. 2

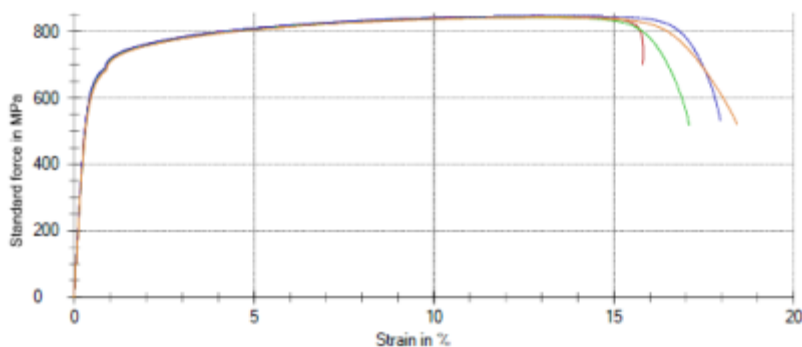
Zkouška pro vzorek č. 2 byla dle dosažených hodnot v tabulce č. 15 hodnocena jako vyhovující. Přetržené vzorky jsou zdokumentovány na obrázku č. 44, průběh síly na prodloužení je vynesena v grafu na obrázku č. 45.

Tab. 15 Mechanické hodnoty příčné zkoušky tahem vzorku č. 2

Číslo vzorku	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_t$ [%]	Místo lomu
1	639	846	15,8	Lom mimo svar
2	640	843	17,1	Lom mimo svar
3	641	848	18,0	Lom mimo svar
4	630	842	18,4	Lom mimo svar
$\bar{x}$	<b>637</b>	<b>845</b>	<b>17,3</b>	
s	<b>5,07</b>	<b>2,75</b>	<b>1,15</b>	



Obr. 44 – Přetržené vzorky kontrolního spoje č. 2



Obr. 45 – Tahové diagramy vzorků kontrolního vzorku č. 2

### 5.7.2.3. Příčná zkouška tahem – vzorek č. 3

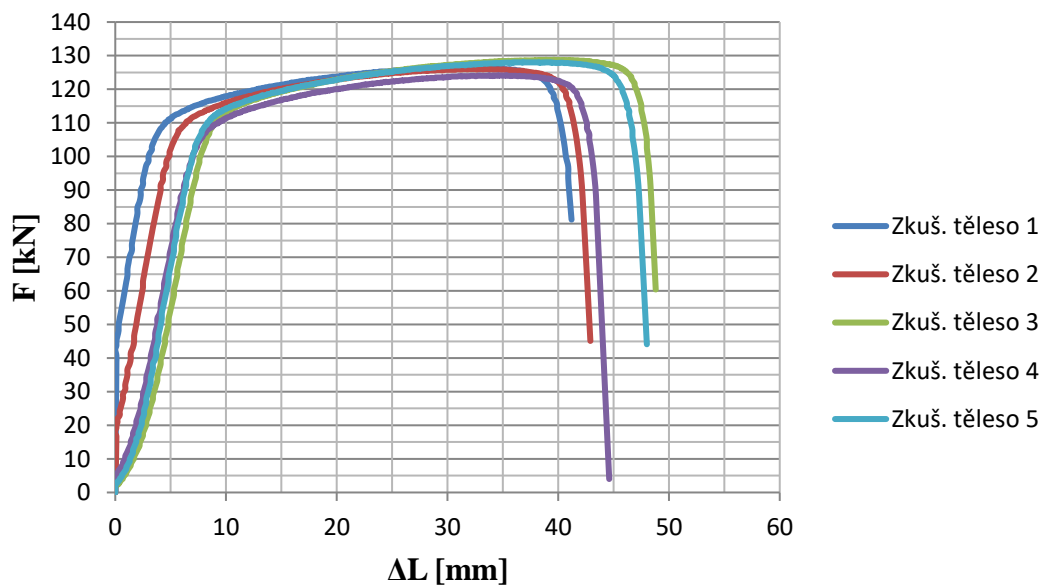
Pro tento vzorek bylo rozhodnuto o testování i přes přítomnosti pórů ve svaru, kde byl předpoklad dopadu těchto defektů na výsledky zkoušky. Tyto předpoklady se ovšem z výsledků v tabulce č. 16 nepotvrdily. Kde z pevnostního hlediska byly výsledky vyhovující a zdokumentované vzorky na č. 46 vykazují přetržení mimo oblast svaru, na obrázku č. 47 jsou patrné průběhy síly a prodloužení v grafu.

Tab. 16 Mechanické hodnoty příčné zkoušky tahem vzorku č. 3

Číslo vzorku	$R_m$ [MPa]	Místo lomu
1	803	Lom mimo svar
2	800	Lom mimo svar
3	809	Lom mimo svar
4	785	Lom mimo svar
5	807	
$\bar{x}$	<b>809</b>	
s	<b>9,5</b>	



Obr. 46 – Přetržené vzorky kontrolního spoje č. 3



Obr. 47 – Tahové diagramy vzorků kontrolního vzorku č. 3

#### 5.7.2.4. Příčná zkouška tahem – vzorek č. 6 a 7

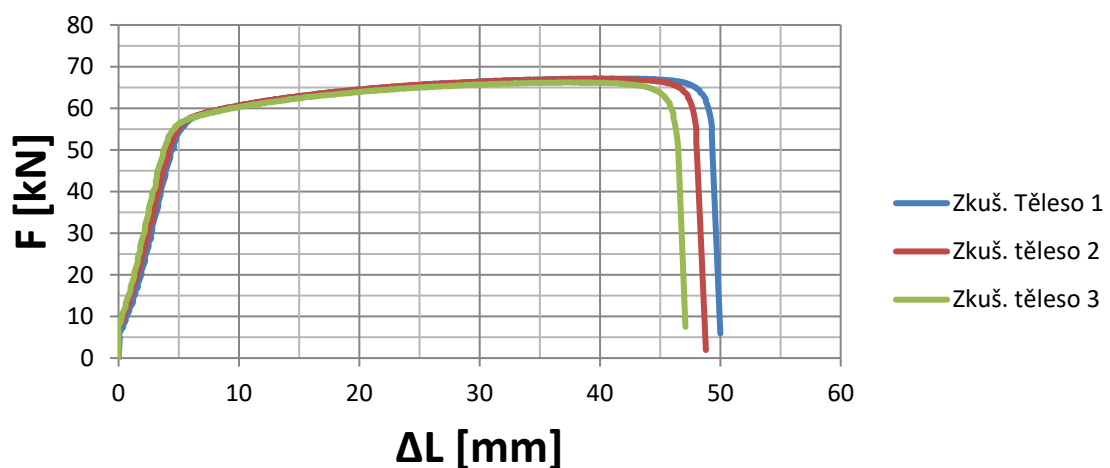
Pro kontrolní vzorky č. 6 a 7 byly hodnoty dosažený mezi pevností zanesené do tabulky č. 17, tyto dosažené hodnoty byly nejvyšší ze všech testovaných vzorků. Na obrázku č. 48 jsou viditelné přetržené vzorky s jednotlivými lomy, na digramech č. 49 a 50 jsou vidět průběhy naměřených hodnot.

Tab. 17 Mechanické hodnoty příčné zkoušky tahem vzorků č. 6 a 7

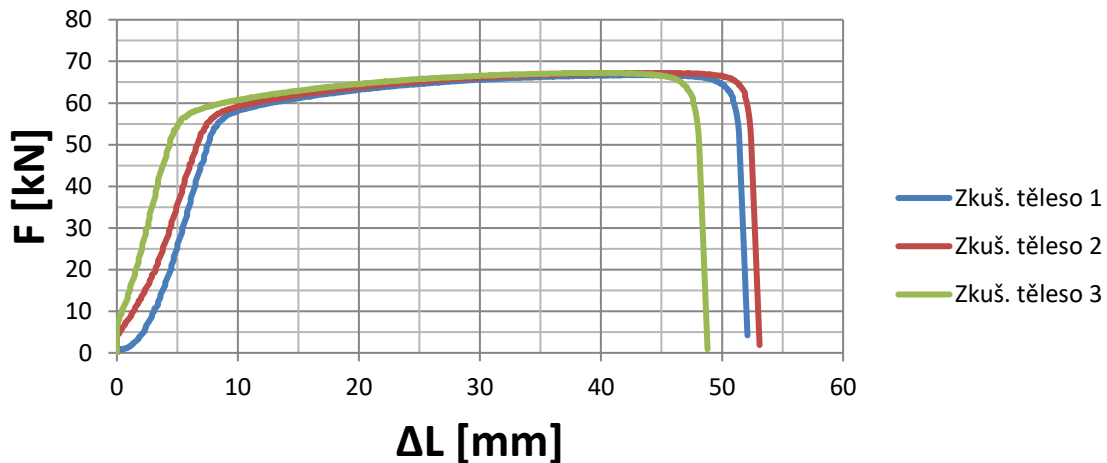
Číslo vzorku	Vzorek č. 6		Vzorek č. 7	
	$R_m$ [MPa]	Místo lomu	$R_m$ [MPa]	Místo lomu
1	892	Lom mimo svar	891	Lom mimo svar
2	891	Lom mimo svar	892	Lom mimo svar
3	886	Lom mimo svar	892	Lom mimo svar
$\bar{x}$	<b>890</b>		<b>892</b>	
s	<b>3,2</b>		<b>0,6</b>	



Obr. 48 – Přetržené vzorky kontrolního spoju č. 6 a 7



Obr. 49 – Tahové diagramy vzorků kontrolního vzorku č. 6



Obr. 50 – Tahové diagramy vzorků kontrolního vzorku č. 7

### 5.7.3. Zkouška rázem v ohybu

Kontrolní vzorky pro zkoušku rázem byly testovány dle požadavků normy ČSN ISO 148-1. Kontrolní vzorky pro tloušťky plechů 6 mm byly zhotoveny na redukovaný rozměr  $t_1=5$  mm s V-vrubem. Pro vzorky z tloušťky plechů 3 mm nebyly zhotoveny redukované rozměry, tloušťka byla ponechána, bylo provedeno mechanické zbroušení převýšení kořene a líců svaru. Umístění bylo zvoleno dle normy – do osy svaru (svarového kovu) - VWT 0/0,5 a na hranici svarového kovu a TOO – VHT 0/0,5. Kladivo bylo osazeno břitem o poloměru 2 mm – KV2. Těleso bylo temperováno na teplotu  $-40$  °C s výdrží na teplotě 5 minut. Následně bylo zkušební těleso přeraženo a vyhodnoceny lomové plochy tělesa na podíl houževnatého a křehkého lomu. Následující hodnoty pro jednotlivé vzorky č. 1, 2, 3, 6, 7 jsou uvedeny v tabulkách č. 18 až 22. Přeražené vzorky jsou zdokumentovány na obrázcích č. 51 až 55, kde na obrázku č. 53 je příklad lomové plochy. [24, 29]

Tab. 18 Hodnoty zkoušky rázem v ohybu pro vzorek č. 1

Označení vzorku	Rozměry zkušební tyče				Vzdálenost podpor [mm]	Zkušební teplota [°C]	Nárazová práce – KV2 [J]	Průměrná hodnota nárazové práce [J]	Podíl houževnatého lomu [%]	Poloha vrubů
	Výška [mm]	Šířka [mm]	Výška pod vrubem [mm]	Plocha průřezu [mm <sup>2</sup> ]						
11	10	5	8	40	40	-40	99	100	77	VWT 0/0,5
12	10	5	8	40	40	-40	110		57	
13	10	5	8	40	40	-40	95		68	
14	10	5	8	40	40	-40	105		84	
15	10	5	8	40	40	-40	93		69	
16	10	5	8	40	40	-40	124	132	59	VHT 0/0,5
17	10	5	8	40	40	-40	139		88	
18	10	5	8	40	40	-40	132		46	
19	10	5	8	40	40	-40	127		68	
10	10	5	8	40	40	-40	138		72	

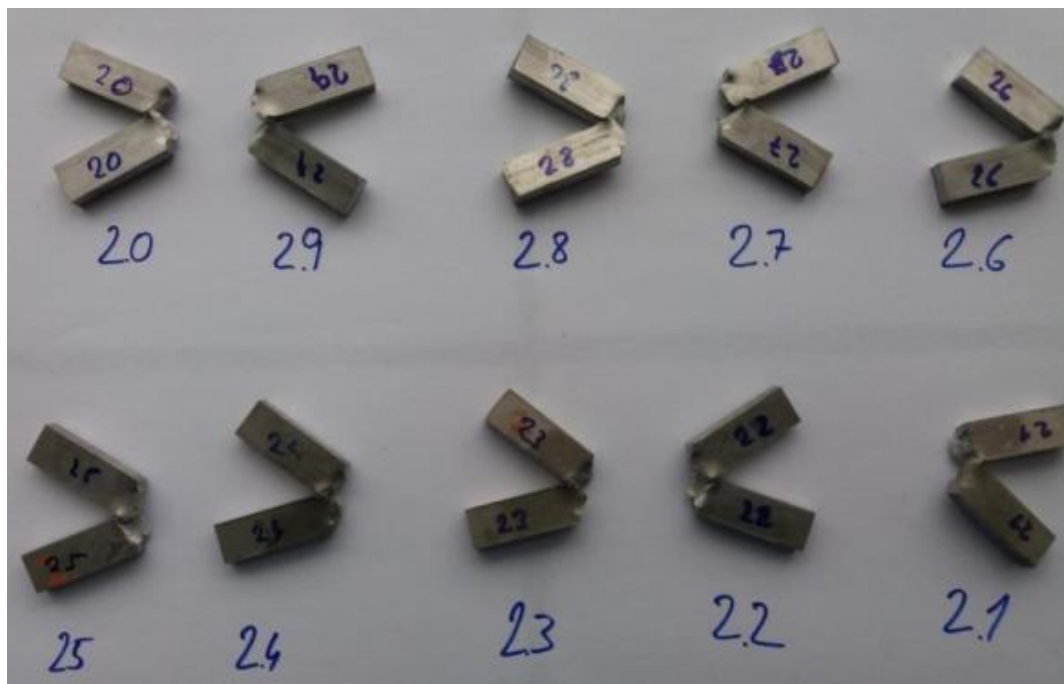


Obr. 51 – Přeražené vzorky kontrolního spoje č. 1



Tab. 19 Hodnoty zkoušky rázem v ohybu pro vzorek č. 2

Označení vzorku	Rozměry zkušební tyče				Vzdálenost podpor [mm]	Zkušební teplota [°C]	Nárazová práce – KV2 [J]	Průměrná hodnota nárazové práce [J]	Podíl houževnatého lomu [%]	Poloha vrubu
	Výška [mm]	Šířka [mm]	Výška pod vrubem [mm]	Plocha průřezu [mm <sup>2</sup> ]						
21	10	5	8	40	40	-40	102	114	59	VWT 0/0,5
22	10	5	8	40	40	-40	116		72	
23	10	5	8	40	40	-40	123		76	
24	10	5	8	40	40	-40	119		79	
25	10	5	8	40	40	-40	111		67	
26	10	5	8	40	40	-40	114	106	62	VHT 0/0,5
27	10	5	8	40	40	-40	118		57	
28	10	5	8	40	40	-40	96		72	
29	10	5	8	40	40	-40	101		68	
20	10	5	8	40	40	-40	102		54	



Obr. 52 – Přeražené vzorky kontrolního spoje č. 2

Tab. 20 Hodnoty zkoušky rázem v ohybu pro vzorek č. 3

Označení vzorku	Rozměry zkušební tyče				Vzdálenost podpor [mm]	Zkušební teplota [°C]	Nárazová práce – KV2 [J]	Průměrná hodnota nárazové práce [J]	Podíl houževnatého lomu [%]	Poloha vrubu
	Výška [mm]	Šířka [mm]	Výška pod vrubem [mm]	Plocha průřezu [mm <sup>2</sup> ]						
31	10	5	8	40	40	-40	78	102	72	VHT 0/0,5
32	10	5	8	40	40	-40	83		64	
33	10	5	8	40	40	-40	105		61	
34	10	5	8	40	40	-40	106		68	
35	10	5	8	40	40	-40	138		59	
36	10	5	8	40	40	-40	54	60	71	VWT 0/0,5
37	10	5	8	40	40	-40	65		60	
38	10	5	8	40	40	-40	63		73	
39	10	5	8	40	40	-40	66		69	
30	10	5	8	40	40	-40	52		75	



Obr. 53 – Přeražené vzorky kontrolního spoje č. 3



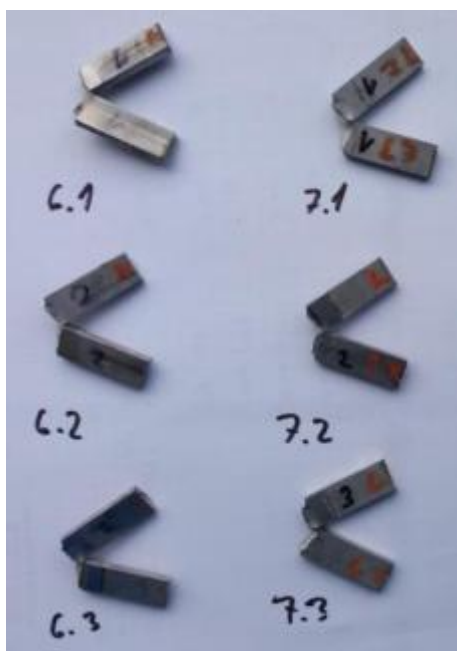
Obr. 54 – Přeražený vzorek kontrolního spoje č. 3 – vzorek 31

Tab. 21 Hodnoty zkoušky rázem v ohybu pro vzorek č. 6

Označení vzorku	Rozměry zkušební tyče				Vzdálenost podpor [mm]	Zkušební teplota [°C]	Nárazová práce – KKV2 [J]	Průměrná hodnota nárazové práce [J]	Podíl houževnatého lomu [%]	Poloha vrubu
	Výška [mm]	Šířka [mm]	Výška pod vrubem [mm]	Plocha průřezu [mm <sup>2</sup> ]						
61	10	3	8	24	40	-40	34	33,6	48	VHT 0/0,5
62	10	3	8	24	40	-40	33		51	
63	10	3	8	24	40	-40	34		44	

Tab. 22 Hodnoty zkoušky rázem v ohybu pro vzorek č. 7

Označení vzorku	Rozměry zkušební tyče				Vzdálenost podpor [mm]	Zkušební teplota [°C]	Nárazová práce – KV2 [J]	Průměrná hodnota nárazové práce [J]	Podíl houževnatého lomu [%]	Poloha vrubu
	Výška [mm]	Šířka [mm]	Výška pod vrubem [mm]	Plocha průřezu [mm <sup>2</sup> ]						
71	10	3	8	24	40	-40	33	34,3	67	VHT 0/0,5
72	10	3	8	24	40	-40	31		69	
73	10	3	8	24	40	-40	39		70	



Obr. 55 – Přeražené vzorky kontrolních spojů č. 6 a 7

Pro vyhovující hodnotu nárazové práce bylo nutné dosáhnout minimální hodnoty nárazové práce 27 J, kde tato hodnota byla dána výrobkovou normou pro zařízení „Netopených tlakových nádob“, podle které by bylo případné zařízení pravděpodobně konstruováno. Hodnoty nárazové 27 J byly splněny u všech zkoušených vzorků. [24]

#### 5.7.4. Zkouška ohybem

Dalším metodou byla zkouška ohybem, postup zkoušky byl realizován dle normy ČSN EN ISO 517, kde byly testovány celkově 4 ks vzorků z každého kontrolního svarového spoje, šířka testovaného vzorku byla 25 mm pro tloušťku základního materiálu 6 mm (vzorky č. 1, 2, 4, 5) a šířka vzorku 12 mm pro tloušťku materiálu 3 mm (vzorky č. 6, 7). Zkoušení vzorků probíhalo ohybem ze strany kořene (TRBB – značení dle normy) pro 2 ks vzorků a ze strany líce svaru (TFBB – značení dle normy) též pro 2 ks vzorků. Oboustranné převýšení svarů na vzorcích bylo zabroušeno do roviny. Průměr ohýbacího trnu byl stanoven na 12 mm. Ohnutí zkušebních vzorků bylo provedeno na úhel 150°, normou je požadovaná hodnota 180°. Toho nebylo z důvodu špatné konstrukce ohýbacího přípravku při zkoušení dosáhnout. Z pohledu vyhodnocení trhlin na vzorcích při úhlu 150°, bylo hodnocení jako nevyhovující z důvodu pravděpodobného dalšího rozvoje této trhliny při ohnutí na 180°. [24, 30]



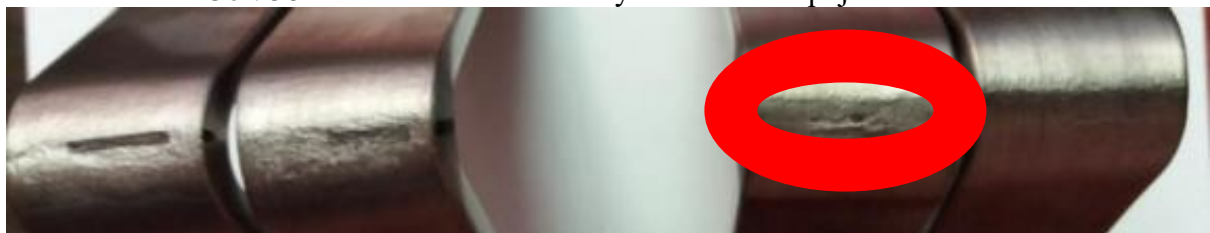
Obr. 56 – Ohnuté zkušeni vzorky kontrolního spoje vzorku č. 1



Obr. 57 – Ohnuté zkušeni vzorky kontrolního spoje vzorku č. 2



Obr. 58 – Ohnuté zkušeni vzorky kontrolního spoje vzorku č. 4



Obr. 59 – Ohnuté zkušeni vzorky kontrolního spoje vzorku č. 5



Obr. 60 – Ohnuté zkušební vzorky kontrolního spoje vzorku č. 6



Obr. 61 – Ohnuté zkušební vzorky kontrolního spoje vzorku č. 7

Na obrázcích č. 56 až 61 jsou zdokumentovány jednotlivé ohnuté vzorky č. 1, 2, 4, 5, 6, 7. Vlevo na obrázcích jsou vždy umístěny ohyby ze strany líce svaru, vpravo ohyby ze strany kořene svaru. Vzorky č. 1, 2, 7 nevykazovaly žádné trhliny, proto byly hodnoceny jako vyhovující. Vzorky č. 4, 5, 6 vykazovaly vznik trhlín (viz. zvýrazněno na obrázcích), kde maximální přípustná délka trhliny byla 3 mm. Jediný vzorek č. 5 měl naměřenou hodnotu trhliny 2,5 mm, ovšem s dalším ohybem do 180° by tato trhlina dále iniciovala a překročila přípustnou délku. Z tohoto důvodu byl vzorek č. 5 hodnocen též jako nevyhovující.

### 5.7.5. Zkoušky tvrdosti

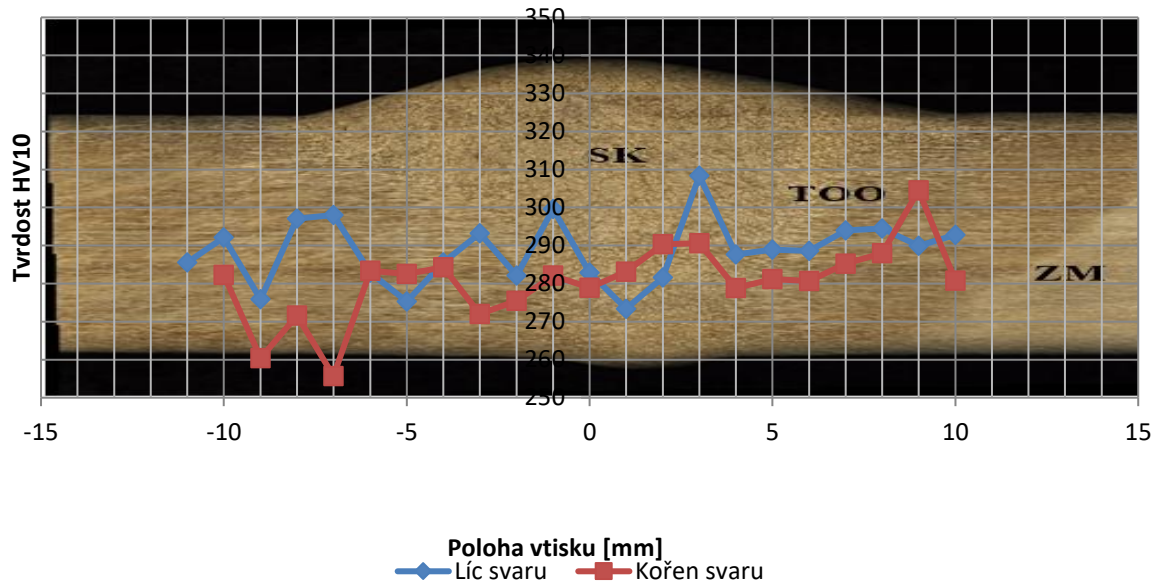
Testování mikrotvrdosti bylo dáno požadavky normou ČSN EN ISO 15 614-1, kde přípustnost hodnocení získané tvrdosti nebylo přesně specificky dáno, proto nebylo možné rozhodnout, zda získané hodnoty tvrdosti jsou vyhovující nebo nevyhovující. Proto z naměřených hodnot bylo provedeno pouze porovnání získaných hodnot s hodnotami, daných v materiálovém atestu dodaného plechu, kde byla zjištěna hodnota max. 280 HV. V dalším zdroji materiálové listu [33] byla nalezena maximální hodnota tvrdosti pro polotovary plechů 310 HV. Tyto nalezené hodnoty byly zvažovány pro následné porovnání s naměřenými hodnotami svarových spojů v oblasti základního materiálu, tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu. Měření mikrotvrdosti bylo realizováno dle normy ČSN EN ISO 9015-1, indentorem byl Vickersův jehlan se zatížením 10 kg (10HV). Tvrdost byla měřena ve dvou liniích pro tloušťku plechu 6 mm a maximálně 2 mm od horní a spodní hrany plechu. Pro tloušťku 3 mm bylo měření provedeno do vzdálenosti 1,5 mm od horní hrany plechu. Testování bylo realizováno na tvrdoměru Struers Emco-Test DuraScan 70. [24, 31, 33]

Tab. 23 Změřené hodnoty zkoušky mikrotvrlosti kontrolního vzorku č. 1

Vzdálenost od středu svaru [mm]	HV10 – líc svaru	pozn.	HV10 – kořen svaru	pozn.
-11	286	ZM	-	
-10	292	ZM	282	ZM
-9	276	ZM	260	ZM
-8	297	ZM	272	ZM
-7	298	TOO	256	ZM
-6	283	TOO	283	TOO
-5	275	SK	283	TOO
-4	286	SK	284	TOO
-3	293	SK	272	TOO
-2	282	SK	276	SK
-1	300	SK	282	SK
0	283	SK	279	SK
1	273	SK	283	SK
2	282	SK	290	SK
3	309	SK	291	TOO
4	288	SK	279	TOO
5	289	TOO	281	TOO
6	289	TOO	281	ZM
7	294	ZM	285	ZM
8	295	ZM	288	ZM
9	290	ZM	305	ZM
10	293	ZM	281	ZM

\* SK-svarový kov; TOO-tepelně ovlivněná oblast; ZM-základní materiál

### Zkouška tvrdosti kontrolní vzorek č. 1



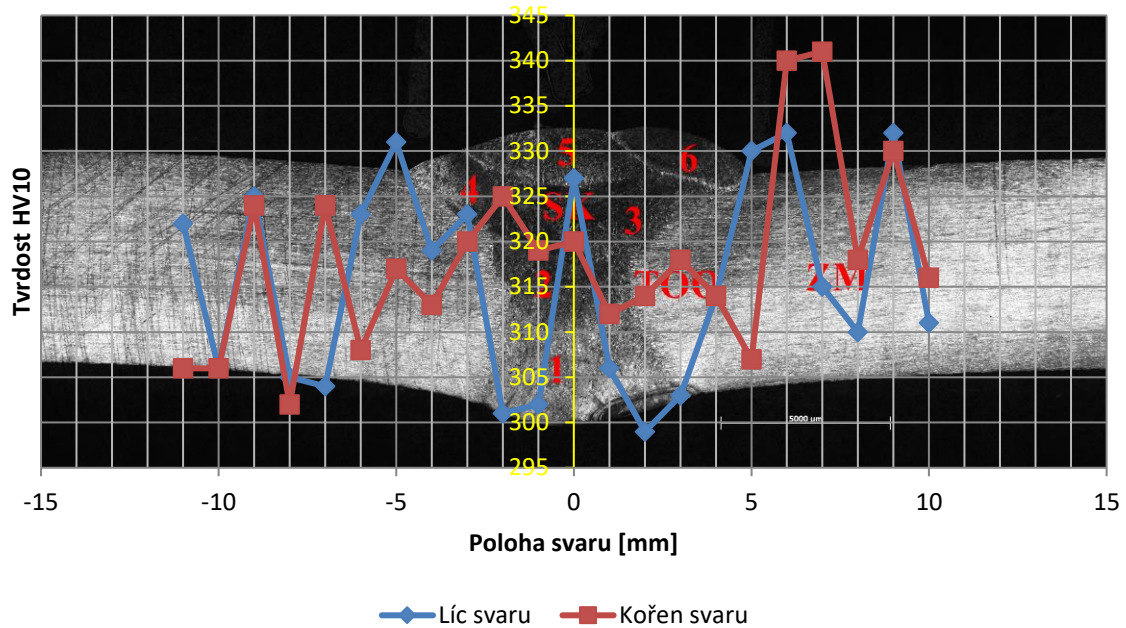
Obr. 62 – Průběh hodnot tvrdostí pro kontrolní vzorek č. 1



Tab. 24 Změřené hodnoty zkoušky mikrotvrdosti kontrolního vzorku č. 2

Vzdálenost od středu svaru [mm]	HV10 – líc svaru	pozn.	HV10 – kořen svaru	pozn.
-11	322	ZM	306	ZM
-10	306	ZM	306	ZM
-9	325	ZM	324	ZM
-8	305	ZM	302	ZM
-7	304	ZM	324	ZM
-6	323	ZM	308	ZM
-5	331	ZM	317	ZM
-4	319	TOO	313	TOO
-3	323	TOO	320	TOO
-2	301	SK	325	TOO
-1	302	SK	319	SK
0	327	SK	320	SK
1	306	SK	312	SK
2	299	SK	314	TOO
3	303	TOO	318	TOO
4	314	TOO	314	ZM
5	330	ZM	307	ZM
6	332	ZM	340	ZM
7	315	ZM	341	ZM
8	310	ZM	318	ZM
9	332	ZM	330	ZM
10	311	ZM	316	ZM

## Zkouška tvrdosti kontrolní vzorek č. 2

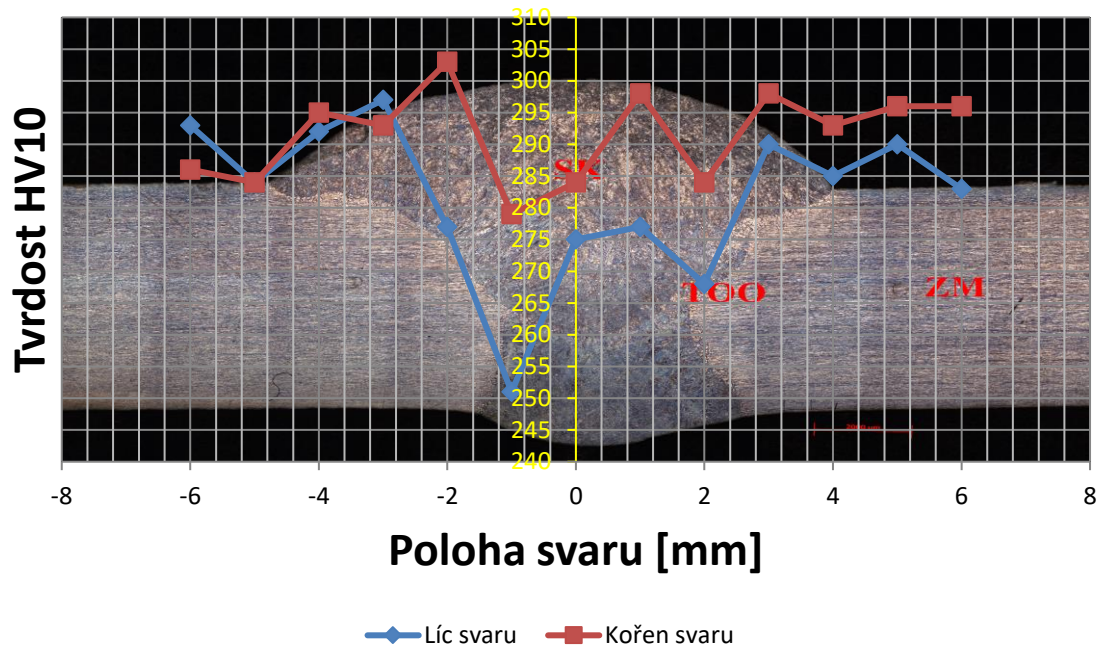


Obr. 63 – Průběh hodnot tvrdostí pro kontrolní vzorek č. 2

Tab. 25 Změřené hodnoty zkoušky mikrotvrdosti kontrolního vzorku č. 3

Vzdálenost od středu svaru [mm]	HV10 – líc svaru	pozn.	HV10 – kořen svaru	pozn.
-6	293	ZM	286	ZM
-5	284	ZM	284	ZM
-4	292	TOO	295	ZM
-3	297	TOO	293	TOO
-2	277	SK	303	TOO
-1	251	SK	279	SK
0	275	SK	284	SK
1	277	SK	298	SK
2	268	SK	284	TOO
3	290	TOO	298	TOO
4	285	TOO	293	ZM
5	290	ZM	296	ZM
6	283	ZM	296	ZM

### Zkouška tvrdosti kontrolní vzorek č. 3

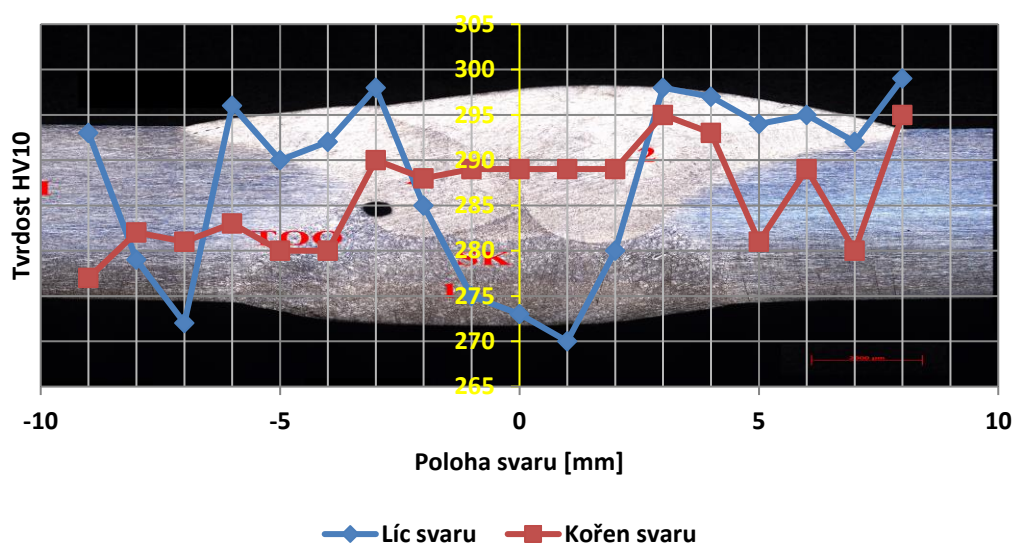


Obr. 64 – Průběh hodnot tvrdostí pro kontrolní vzorek č. 3

Tab. 26 Změřené hodnoty zkoušky mikrotvrdomosti kontrolního vzorku č. 4

Vzdálenost od středu svaru [mm]	HV10 – líc svaru	pozn.	HV10 – kořen svaru	pozn.
-9	293	ZM	277	ZM
-8	279	ZM	282	ZM
-7	272	ZM	281	ZM
-6	296	ZM	283	ZM
-5	290	TOO	280	TOO
-4	292	TOO	280	TOO
-3	298	SK	290	SK
-2	285	SK	288	SK
-1	275	SK	289	SK
0	273	SK	289	SK
1	270	SK	289	SK
2	280	SK	289	SK
3	298	SK	295	SK
4	297	Sk	293	TOO
5	294	TOO	281	ZM
6	295	TOO	289	ZM
7	292	ZM	280	ZM
8	299	ZM	295	ZM

### Zkouška tvrdosti kontrolní vzorek č. 4

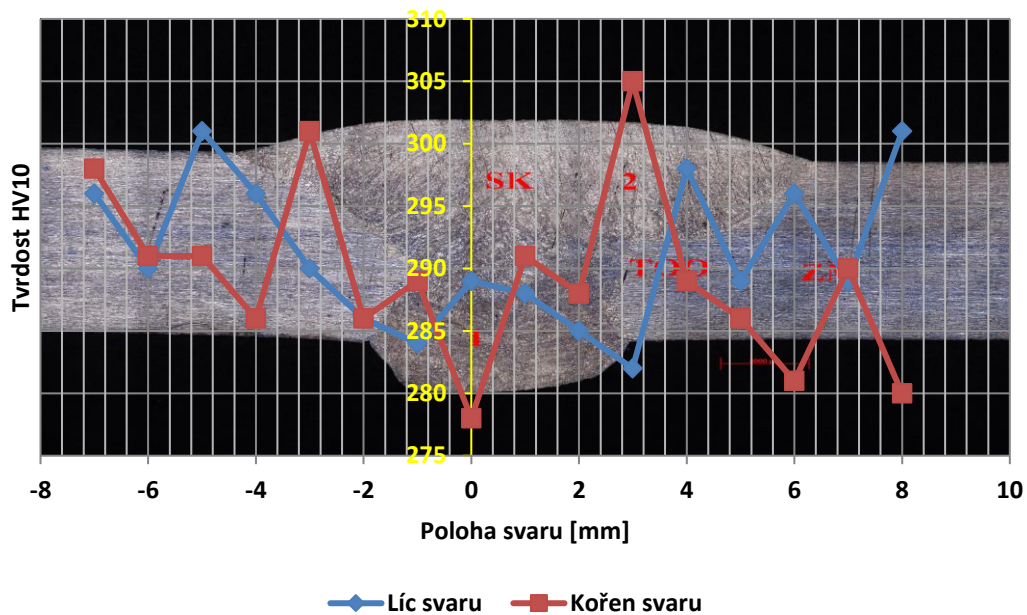


Obr. 65 – Průběh hodnot tvrdostí pro kontrolní vzorek č. 4

Tab. 27 Změřené hodnoty zkoušky mikrotvrdomosti kontrolního vzorku č. 5

Vzdálenost od středu svaru [mm]	HV10 – líc svaru	pozn.	HV10 – kořen svaru	pozn.
-7	296	ZM	298	ZM
-6	290	ZM	291	ZM
-5	301	TOO	291	ZM
-4	296	TOO	286	ZM
-3	290	SK	301	TOO
-2	286	SK	286	TOO
-1	284	SK	289	SK
0	289	SK	278	SK
1	288	SK	291	SK
2	285	SK	288	TOO
3	282	SK	305	TOO
4	298	SK	289	ZM
5	289	TOO	286	ZM
6	296	TOO	281	ZM
7	289	ZM	290	ZM
8	301	ZM	280	ZM

### Zkouška tvrdosti kontrolní vzorek č. 5

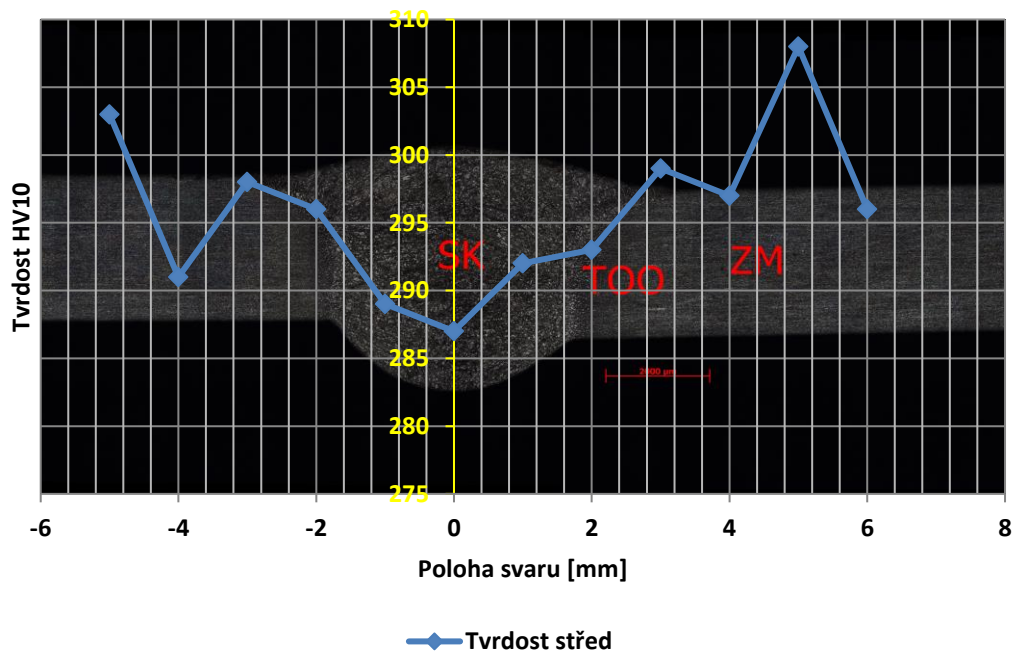


Obr. 66 – Průběh hodnot tvrdostí pro kontrolní vzorek č. 5

Tab. 28 Změřené hodnoty zkoušky mikrotvrdomosti kontrolních vzorků č. 6 a 7

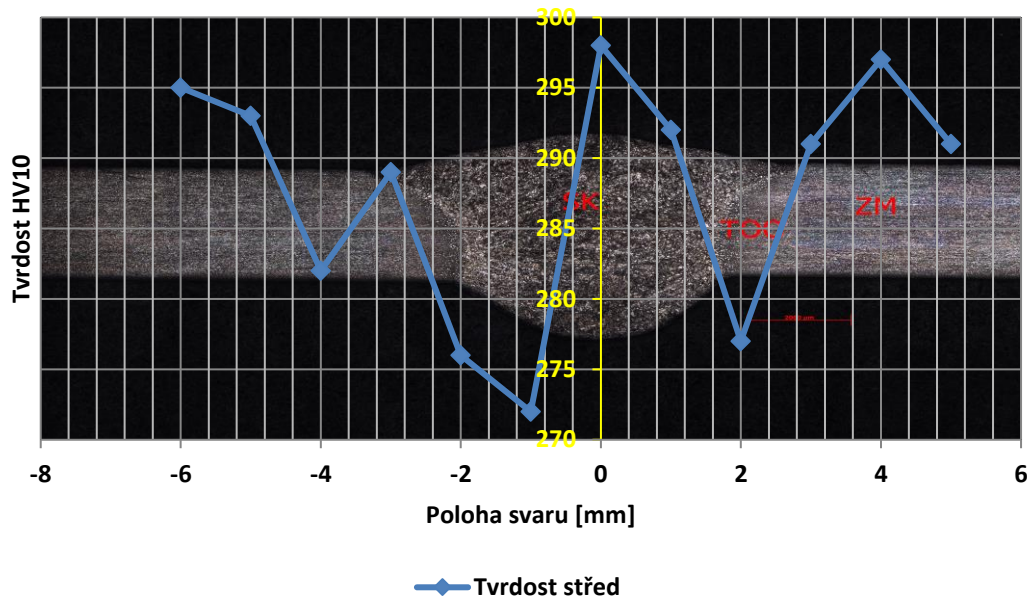
Vzdálenost od středu svaru [mm]	Vzorek č. 6		Vzorek č. 7	
	HV10 – líc svaru	pozn.	HV10 – kořen svaru	pozn.
-6	-		295	ZM
-5	303	ZM	293	ZM
-4	291	ZM	282	ZM
-3	298	ZM	289	ZM
-2	296	TOO	276	TOO
-1	289	SK	272	SK
0	287	SK	298	SK
1	292	SK	292	SK
2	293	TOO	277	TOO
3	299	ZM	291	ZM
4	297	ZM	297	ZM
5	308	ZM	291	ZM
6	296	ZM	-	

### Zkouška tvrdosti kontrolní vzorek č. 6



Obr. 67 – Průběh hodnot tvrdostí pro kontrolní vzorek č. 6

## Zkouška tvrdosti kontrolní vzorek č. 7



Obr. 68 – Průběh hodnot tvrdostí pro kontrolní vzorek č. 7

Jednotlivé naměřené hodnoty tvrdostí naměřených při průřezu vzorky, jsou uvedeny v tabulkách č. 23 až 28 a jsou i graficky znázorněny v grafech na obrázcích č. 62 až 68. Z pozorování grafů a jednotlivých křivek lze pozorovat nahodilé a nepravidelné průběhy tvrdostí. Hodnoty naměřených tvrdostí byly pro vzorek č. 2 v rozsahu 299 a 341 HV, zbylých kontrolních vzorků byly pozorovány většinové naměřené hodnoty do 300 HV, pouze malá část vzorků přesahovala 300 HV, tyto hodnoty jsou shrnuty následovně:

- testovaný vzorek č. 1: 309 HV – 1x; 305 VH – 1x
- testovaný vzorek č. 3: 303 HV – 1x
- testovaný vzorek č. 5: 305 VH – 1x; 301 HV – 3x
- testovaný vzorek č. 6: 308 HV – 1x

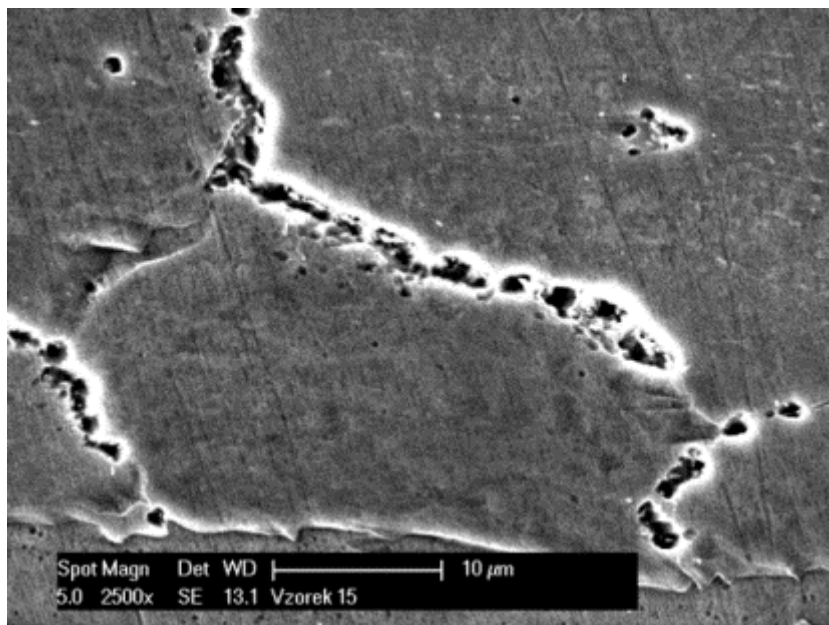
### 5.7.6. Vyhodnocení makrostruktury a mikrostruktury

Posledním druhem testu bylo provedeno pozorování mikro a makro struktury, testovány byly průběžně všechny vzorky č. 1-7 i přes nevyhovující NDT. Vzorky byly broušeny a leštěny v diamantové pastě - 3  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$ . Pro vyvolání struktury byly použity leptadla Beraha 2 a Vilella Bain, které ovšem měli nevyhovující naleptanou strukturu. Lepší výsledek přinesla kombinace směsi v následující poměru - 100 ml kyselina chlorovodíková; 100 ml demineralizovaná voda; 10 ml kyselina dusičná; 0,3 ml leptadlo Vogel. Leptání následně probíhalo v této směsi při teplotě 70 °C po dobu 90-120 s. Následné pozorování po světelným mikroskopem bylo při zvětšení 25x pro makro strukturu a pro mikrostruktura při zvětšení 100x, 200x a 500x.



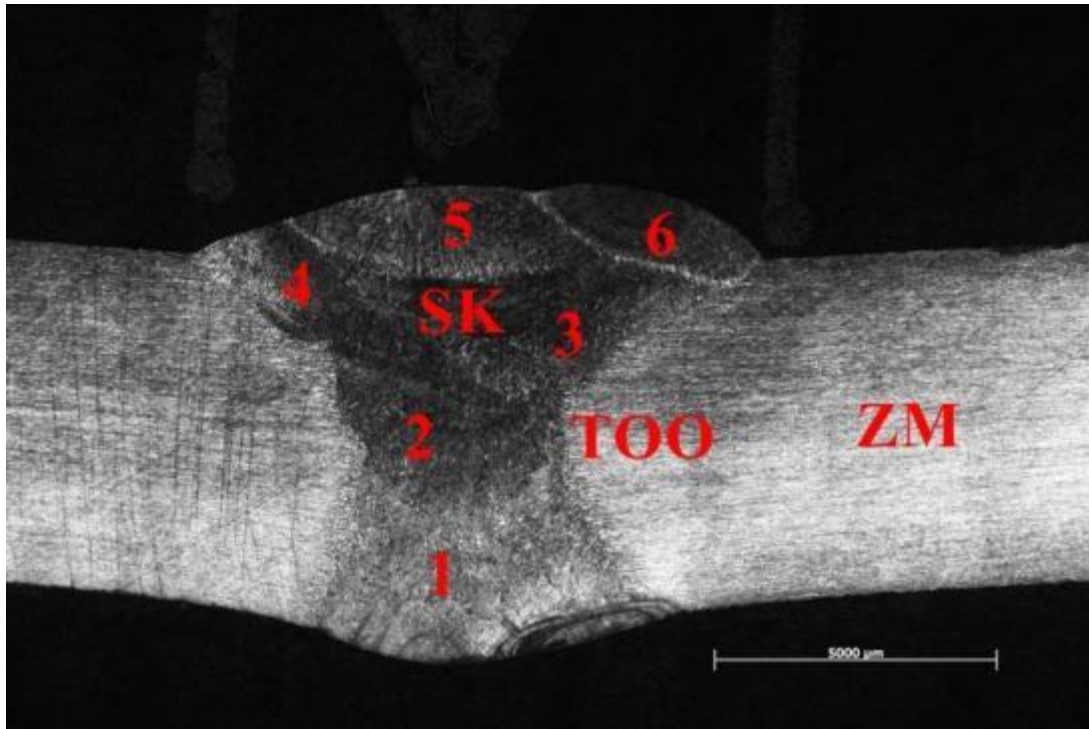
Obr. 69 – Pozorování makrostruktury vzorku č. 1

Obrázek č. 69 ukazuje svařený vzorek na 1 vrstvu, zřetelně lze odlišit svarový kov, tepelně ovlivněnou oblast a základní materiál, rozsah tepelně ovlivněné oblasti lze stanovit na šířku 1-1,5 mm. Na snímku nejsou patrné žádné vady a necelistvosti. Na snímku č. 70 níže byly pozorovány na elektronovém mikroskopu při zvětšení 2500x karbidy na hranicích zrn, snímek je vyhotoven z tepelně ovlivněné oblasti.



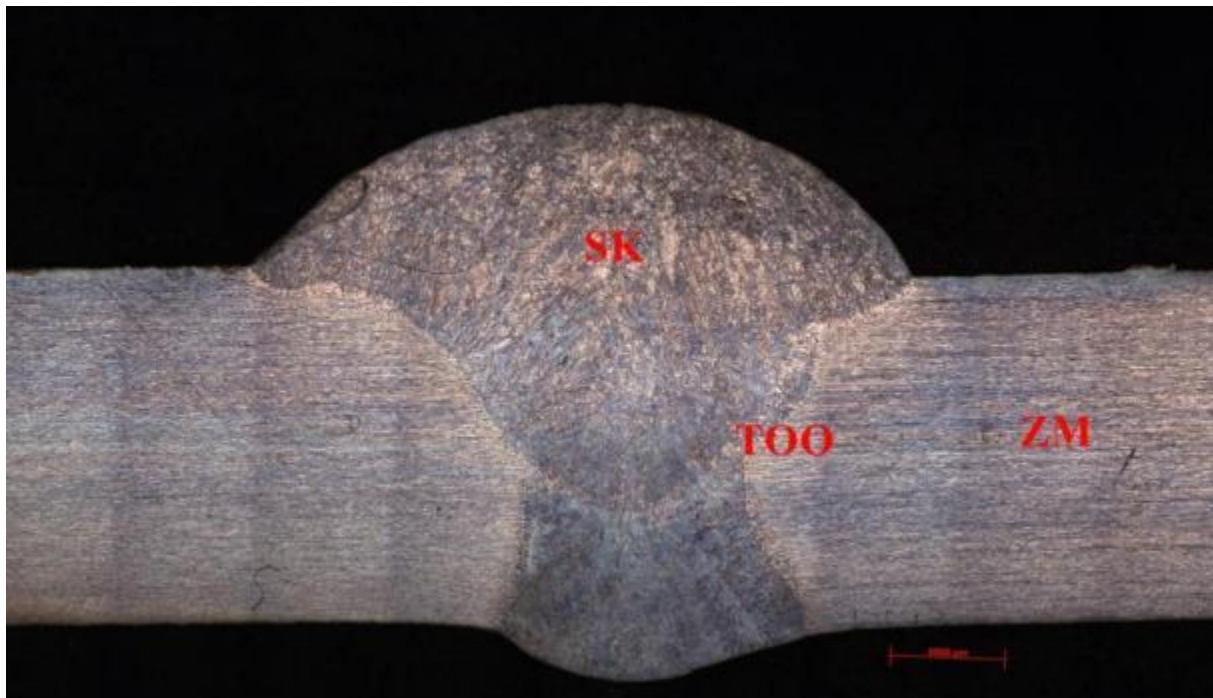
Obr. 70 – Karbidy na hranicích zrn kontrolního vzorku č. 1





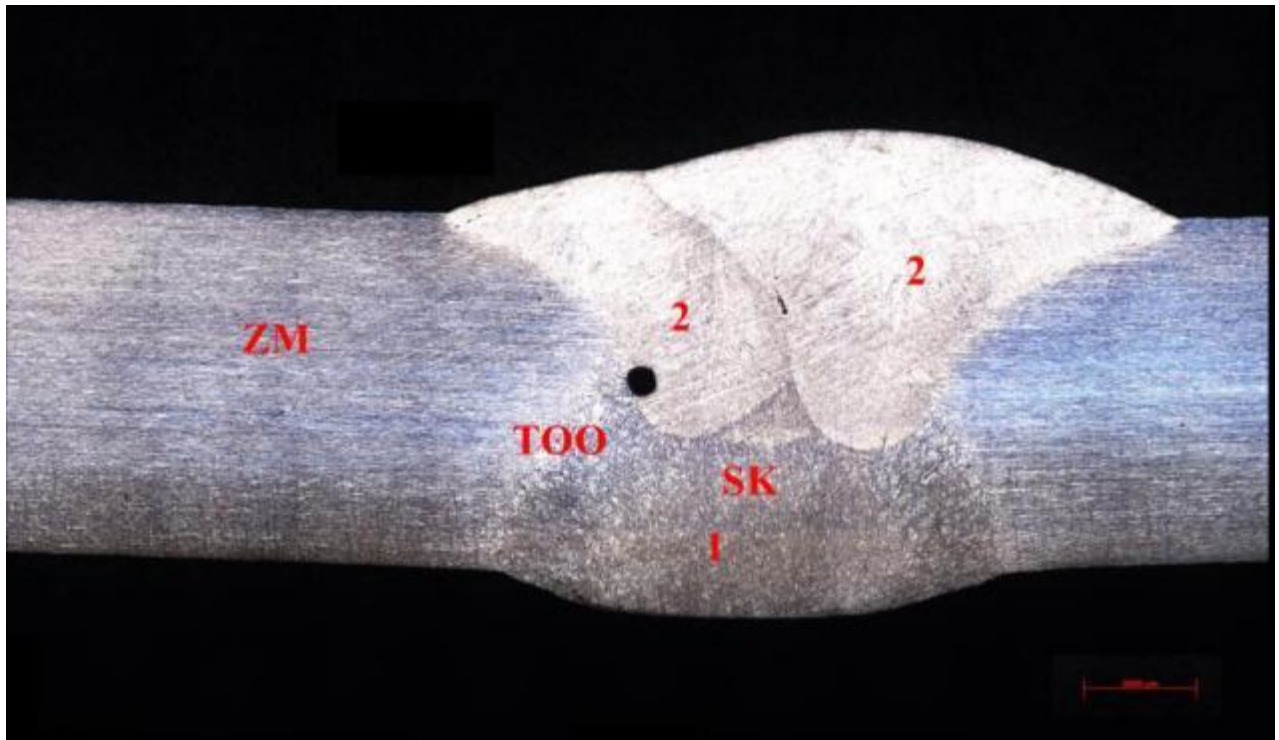
Obr. 71 – Pozorování makrostruktury vzorku č. 2

Pozorovaný obrázek č. 71 ukazuje naleptanou makro strukturu v šesti svarových vrstvách, rozsah tepelně ovlivněné oblasti byl šířky do 1 mm a nebyly pozorovány žádné vady a nečistosti.



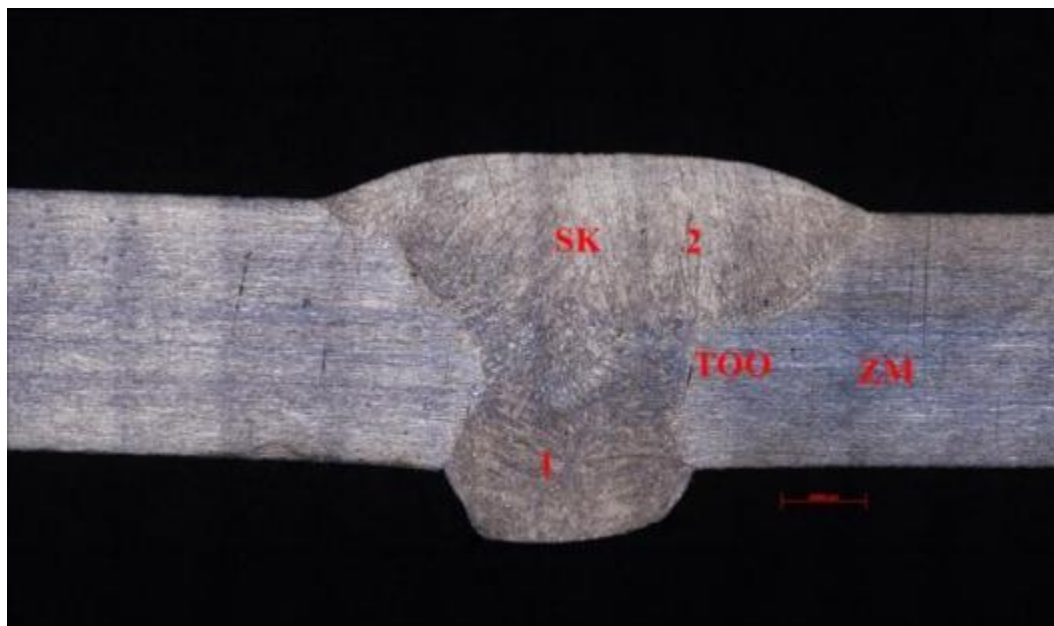
Obr. 72 – Pozorování makrostruktury vzorku č. 3

Pozorovaný obrázek č. 72 ukazuje naleptanou makro strukturu ve třech svarových vrstvách kontrolního vzorku č. 3, dvě vrstvy zhotovené metodou 141 a krycí vrstva metodou 135, rozsah tepelně ovlivněné oblasti byl šířky do 1 mm, nebyly pozorovány žádné vady a necelistvosti.



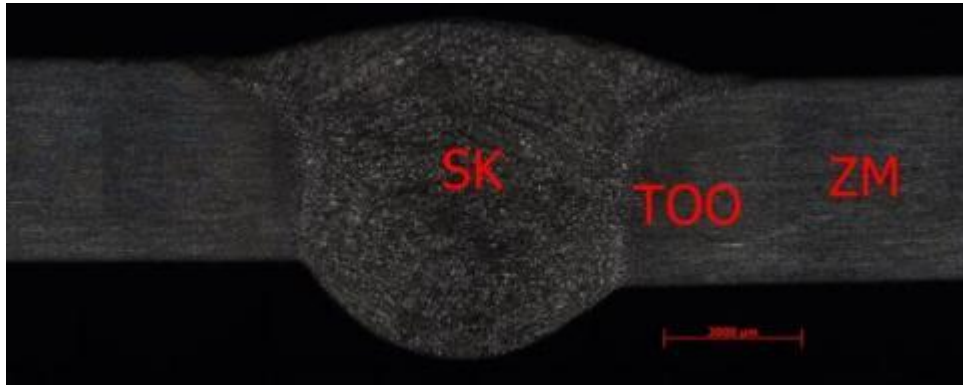
Obr. 73 – Pozorování makrostruktury vzorku č. 4

Na pozorovaném snímku č. 73 je vidět naleptanou makro strukturu ve třech svarových vrstvách kontrolního vzorku č. 4, vrstvy zhotovené metodou 135, rozsah tepelně ovlivněné oblasti byl šířky do 1,5 mm, dále je vidět patrný pór, který byl přímo v broušeném vzorku. Hodnocení makro struktury bylo nevyhovující.

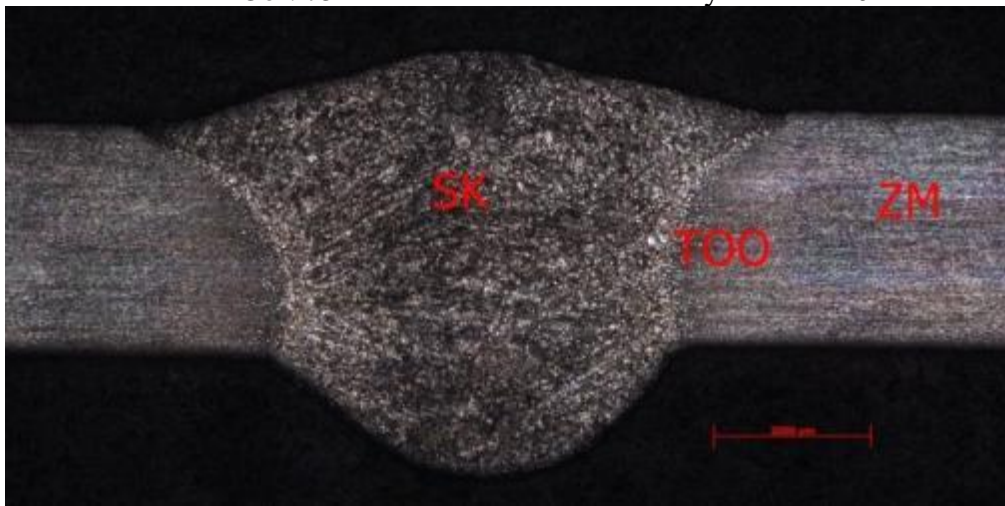


Obr. 74 – Pozorování makrostruktury vzorku č. 5

Na pozorovaném snímku č. 74 je vidět naleptanou makro strukturu ve dvou svarových vrstvách kontrolního vzorku č. 5, vrstvy zhotovené metodou 135. Při pohledu na levou část kořene je patrný náznak trhliny nebo vrubu, které má za následek hodnocení vzorku jako nevyhovující.



Obr. 75 – Pozorování makrostruktury vzorku č. 6


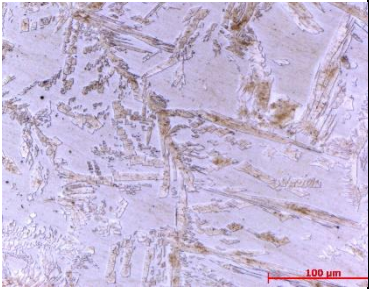

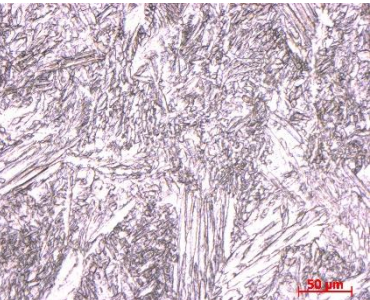
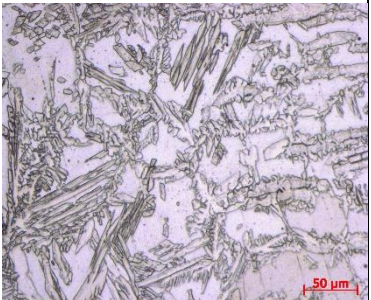
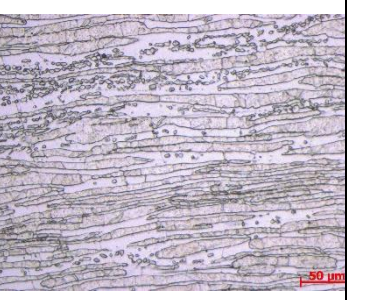
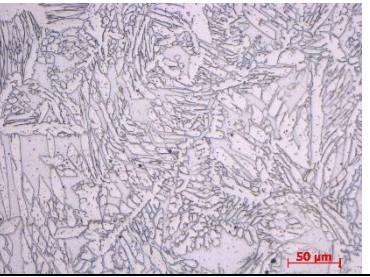
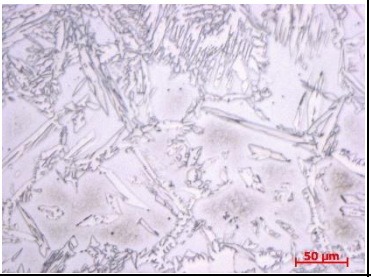

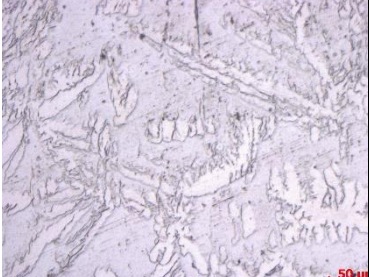

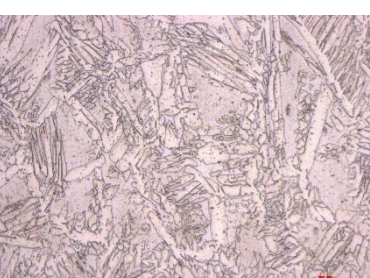
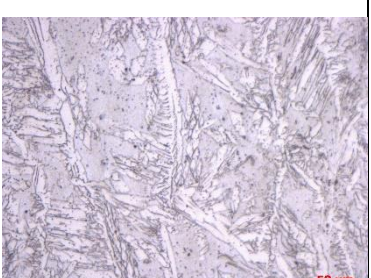
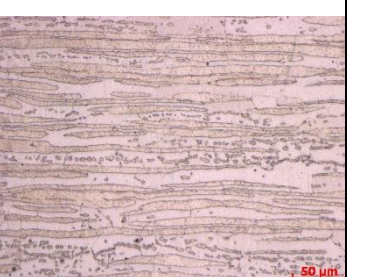


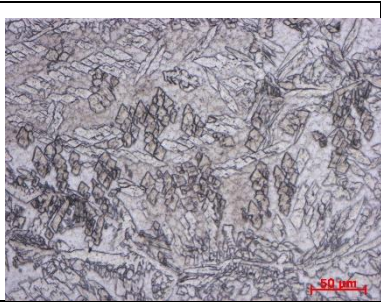

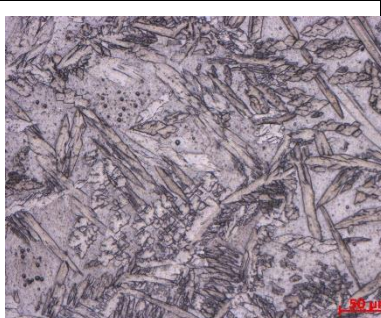
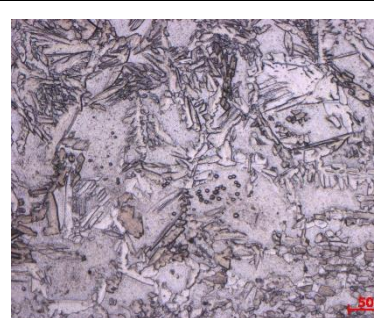
Obr. 76 – Pozorování makrostruktury vzorku č. 7

Na pozorovaném snímku č. 75 a 76 jsou vidět makro struktury vzorků č. 6 a 7, každý ze vzorků byl svařen na jednu svarovou vrstvu metodou 135. Na snímcích nejsou vidět žádné vady ani vměstky.

Dále byla pozorována mikrostruktura, kde snímky jsou v následující tabulce č. 29 pro jednotlivé vzorky zpravidla vždy po snímku po jedné z oblastí – základní materiál, tepelně ovlivněná oblast, svarový kov. U základním materiálu je patrné protáhnutí zrn základního materiálu. Dále s postupem ke středu svaru je vidět tepelně ovlivněná oblast, která měla na všech snímcích zhrubnutá zrna v porovnání se základním materiálem a svarovým kovem.

Tab. 29 Zhotovené snímky mikrostruktury jednotlivých kontrolních spojů

	Střed svarového kovu	Přechodová oblast – TOO	Základní materiál
Vzorek č. 1			
Vzorek č. 2			
Vzorek č. 3			Nezhotoven
Vzorek č. 4			
Vzorek č. 5			

Vzorek č. 6			Nezhotoven
Vzorek č. 7			Nezhotoven

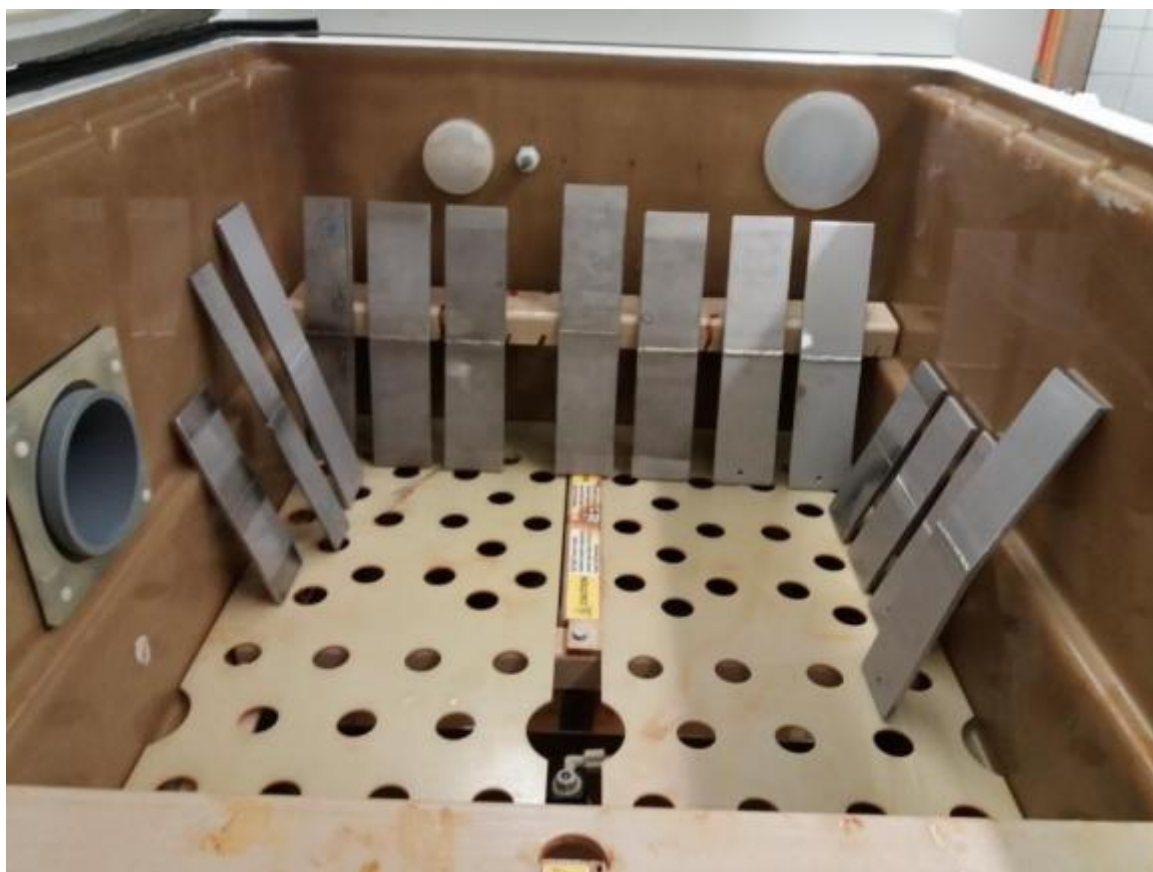
## 6. Testování kontrolních vzorků a jejich korozních vlastností

Pro testování korozních vlastností byla vybrána zkouška v korozní komoře v solné mlze, tato metoda testování byla realizována dle ČSN EN ISO 9227. Parametry prováděné zkoušky jsou uvedeny v tabulce č. 30.

Tab. 30 Parametry korozního testu [32]

Koncentrace solného roztoku [%]	Hodnota pH solného roztoku [pH]	Teplota ve zkušební komoře [°C]	Spad roztoku (sběrač 80 cm <sup>2</sup> ) [ml/h]	Doba testu [hodin]
5±1	6,5 – 7,2	35±2	1,5	1240

Kontrolní vzorky č. 1, 2, 4, 5 byly dodány ve dvou provedeních očištění svarového spoje a přilehlého okolí. Prvním variantou bylo mechanické očištění nerezovým kartáčem, takto bylo provedeno očištění i pro kontrolní vzorky č. 6, 7. Druhou variantou bylo chemické očištění, moření povrchu kyselinou fluorovodíkovou s následnou pasivací kyselinou dusičnou, provedení bylo nástřikem s následnými kroky omytí. Pro test dále byly ještě doplněny vzorky dvou jakostí austenitických ocelí – 1.4301 a 1.4571. Oba vzorky byly svařeny metodou 15 a dále byly provedeny obě varianty očištění. Rozložení testovaných vzorků je zdokumentováno na obrázku č. 77 a 78. [32]



Obr. 77 – Rozložení testovaných vzorků v korozní komoře

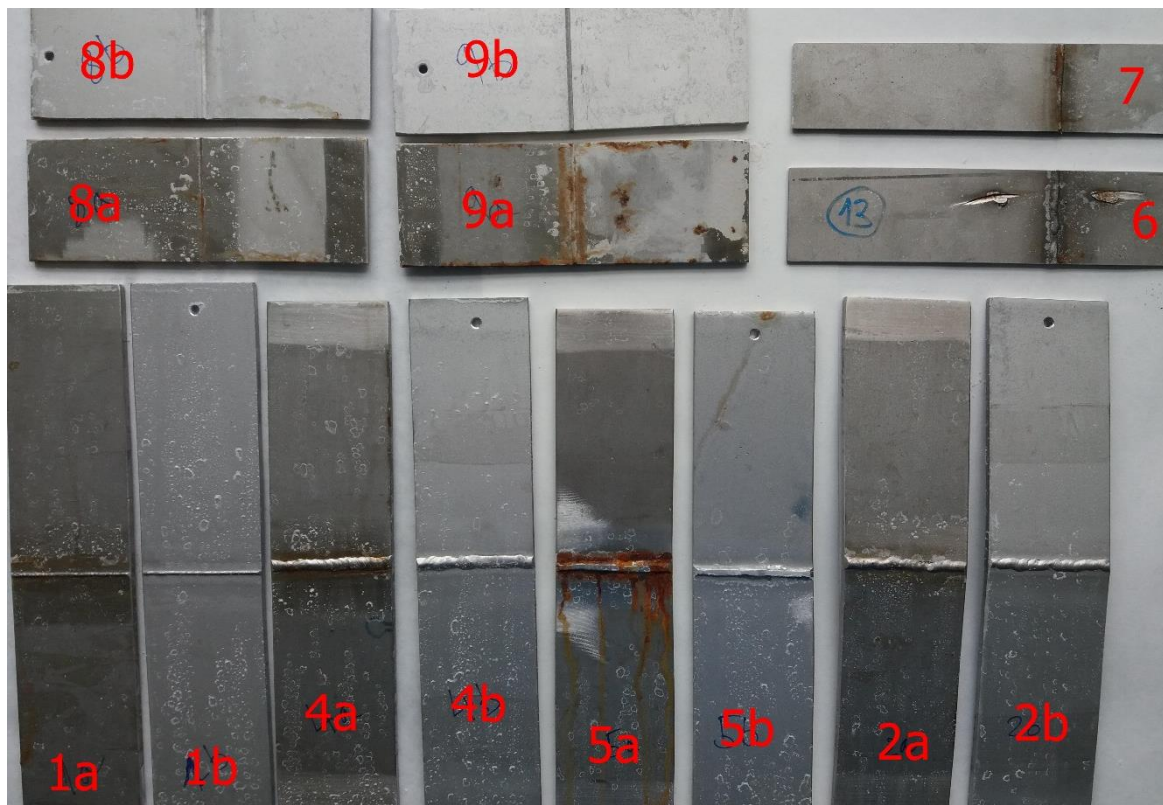


Obr. 78 – Rozložení testovaných vzorku v korozní komoře

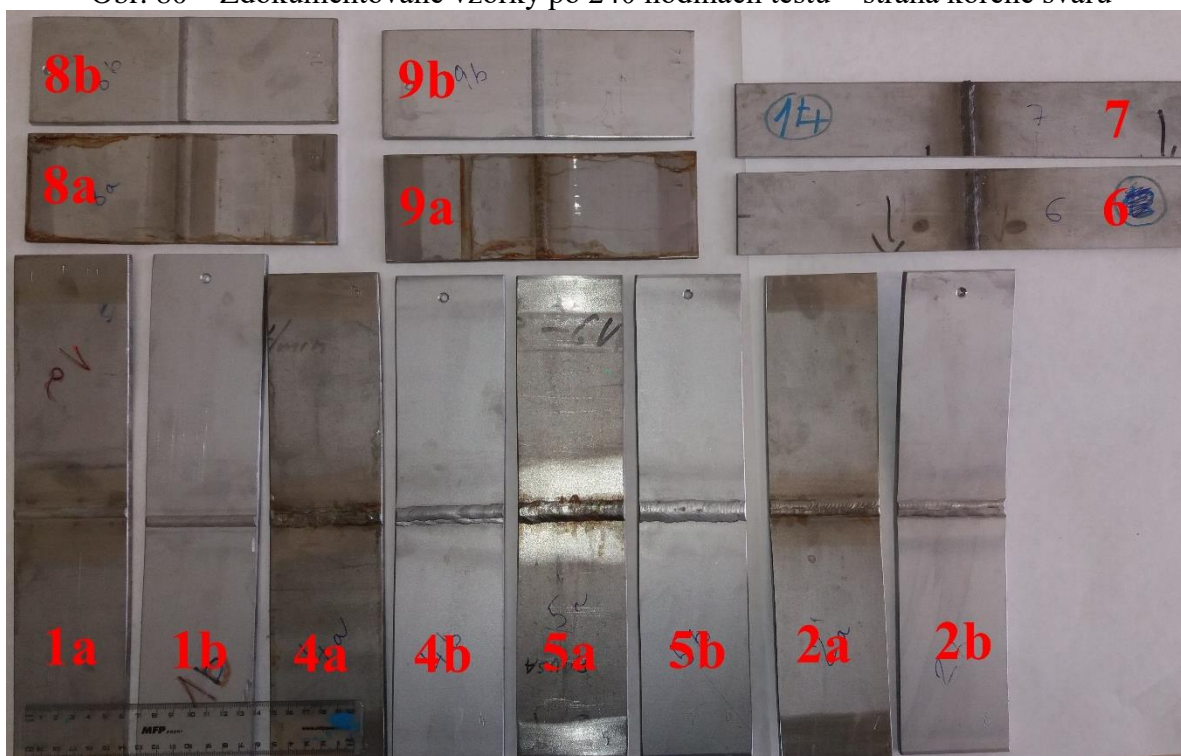
Doba testování v první sérii testu byla 240 hodin, po uplynutí této doby byly vzorky z komory vyjmuty a zdokumentovány na obrázcích č. 79 a 80. Bylo provedeno hodnocení napadení svarového spoje do vzdálenosti 20 mm od osy svaru, hodnocení bylo provedeno ze stran kořene a líce svaru. Pro snadnější přehled byly vypracovány tabulky č. 31, kde lze nalézt seznam testovaných vzorků a základní parametry testovaných vzorků, dále z dostupných informací byla pro porovnání vypočtena hodnota korozní odolnosti – PREN. Dále pak na obrázcích č. 81 a 82 jsou zdokumentovány vzorky po ukončení testu po 1240 hodinách.



Obr. 79 – Zdokumentované vzorky po 240 hodinách testu – strana líce svaru

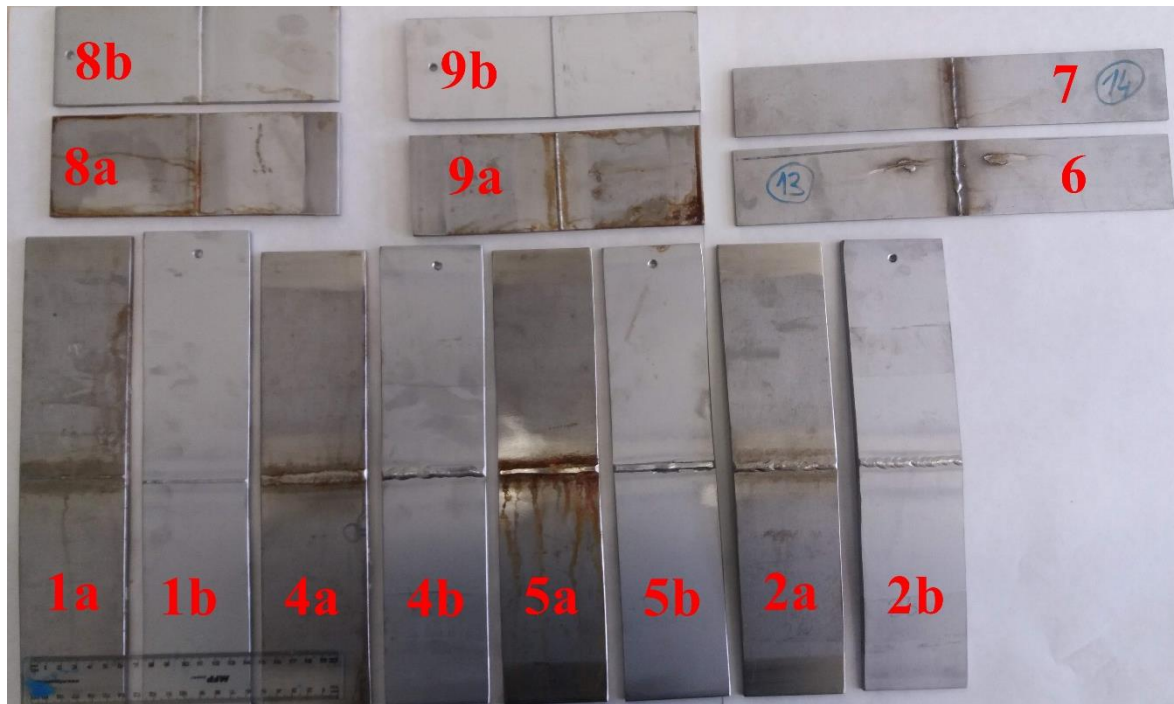


Obr. 80 – Zdokumentované vzorky po 240 hodinách testu – strana kořene svaru



Obr. 81 – Zdokumentované vzorky po 1240 hodinách testu – strana líce svaru





Obr. 82 – Zdokumentované vzorky po 1240 hodinách testu – strana kořene svaru

Tab. 31 Přehled testovaných vzorků

Vzorek	Materiál	PREN	Metoda svařování	Vnesené teplo do svaru [kJ/mm]	Opracování svaru
1a	1.4410 – 6 mm	41,8	15	0,78	očištěno
1b					mořeno, pasivováno
2a			141	0,48	očištěno
2b					mořeno, pasivováno
4a			135	0,44	očištěno
4b					mořeno, pasivováno
5a			135	0,78	očištěno
5b					mořeno, pasivováno
6			1.4410 – 3 mm	41,9	135
7	135	0,31			očištěno
8a	1.4301 – 6 mm	17,5-20,8	15	0,81	očištěno
8b					mořeno, pasivováno
9a	1.4571 – 6 mm	23,1-26,8	15	0,82	očištěno
9b					mořeno, pasivováno

V následující tabulce jsou č. 32 jsou detailněji přiblíženy jednotlivé vzorky a rozsah korozního napadení včetně krátkého popisu. Zpravidla byly hodnoceny čtyři rozsahy výskytu

koroze – bez koroze, náběhové zbarvení, výskyt plošné koroze, výskyt koroze a vznik korozních produktů.

Tab. 32 Souhrnné hodnocení testovaných vzorků

Vzorek	Délka testu [hod]	Plošné zasažení koroze [%]	
		Líc svaru	Kořen svaru
1a	240	0	15
	1240	5-10	30-40
	Po 1240 hodinách testu ze strany kořene hodnoceno zasažení náběhovými barvami koroze, nedošlo k vytvoření korozních produktů.		
1b	240	0	0
	1240	0	0-2
	Bez znatelných náběhových barev vyjma jednoho lokálního místa.		
2a	240	0-5	20-25
	1240	10-15	25-30
	U všech hodnocení došlo zasažení náběhovými barvami koroze, bez vzniku nebo ulpívání korozních produktů.		
2b	240	0	0
	1240	0	0
	Bez známek koroze.		
4a	240	0-1	25-30
	1240	35-40	20-25
	V oblasti kořene v prvním kroku testu dochází ke vzniku náběhových barev koroze, dále už dochází k prvním vznikům koroze a prvních korozních produktů. Ze strany líce svaru dochází po 1240 hodinách k velkému rozvoji koroze ve formě zbarvení a lokálnímu rozvoji korozních produktů.		
4b	240	0	0
	1240	0-2	0-5
	Bez koroze, lokální zvýraznění náběhových barev koroze.		
5a	240	2-3	75-80
	1240	30-35	80-90
	V průběhu testu značný rozvoj zbarvení a korozních produktů ze strany líce svaru mezi jednotlivými hodnocením. Značné korozní zasažení koroze ze strany kořene svar včetně korozních produktů.		
5b	240	0	0
	1240	1-2	0
	Drobné lokální korozní zbarvení na lícové straně svaru.		
6	240	1-2	5-10

	<b>1240</b>	5	15-20
	Bez koroze a korozních produktů, pouze větší plošné korozní zbarvení ze strany kořene		
<b>7</b>	<b>240</b>	1-3	20-25
	<b>1240</b>	3-5	25-35
	Ze strany kořene vznik koroze po hranici TOO, ze strany líce nepatrné korozní zbarvení.		
<b>8a</b>	240	5-10	3-5
	1240	10-15	35-40
	Po 240 hodinách drobné zbarvení koroze ze strany lícu svaru. V průběhu testu rozvoj koroze kořene svaru a okolí, při bližším zkoumání nevyhovující část svaru (nenatavená hrana).		
<b>8b</b>	<b>240</b>	0	0
	<b>1240</b>	0	0-5
	Bez napadení, lokální korozní zbarvení.		
<b>9a</b>	<b>240</b>	20-25	50-55
	<b>1240</b>	40-45	50-55
	Značné vznik koroze v průběhu testování, lokální vznik korozních produktů.		
<b>9b</b>	<b>240</b>	0	0
	<b>1240</b>	0	0
	Bez výskytu koroze.		

### 6.1. Testování korozních vzorků – příčná zkouška tahem

Po hodnocení koroze bylo rozhodnuto o podrobení nejvíce zasaženého vzorku testování příčnou zkouškou tahem. Pro zkoušení byl zvolen vzorek s označením – 5a, kde z dostupného materiálu byly vyrobeny dvě zkušební tělesa.

Předpoklad vlivu koroze se v průběhu testu na vzorky nepotvrdil hodnoty dosažené při zkoušce jsou shrnuty v tabulce č. 33 a pohled na zdokumentované vzorky je na obrázku č. 83.

Tab. 33 Mechanické hodnoty příčné zkoušky tahem vzorku č. 5a

Číslo vzorku	R <sub>m</sub> [MPa]	Místo lomu
<b>1</b>	841	Lom mimo svar
<b>2</b>	762	Lom mimo svar
$\bar{x}$	<b>801,5</b>	
<b>s</b>	<b>55,9</b>	



Obr. 83 – Přetržené vzorky kontrolního spoje č. 5a

Z naměřených hodnot meze pevnosti pro jednotlivé zkušební tělesa je patrný vyhovující výsledek i přes korozní napadení svarů a TOO. Kritériem pro vyhovující příčnou zkoušku tahem svarového bylo nutné dosažení minimální hodnoty 750 MPa. Z výsledků je patrné vliv koroze na pevnost v tahu nebyl u tohoto vzorku prokázán, a tak nebylo nutné testovat další vzorky.

## 7. Diskuze výsledků

Práce řešila provedení kontrolních svarových spojů z korozivzdorné oceli s austeniticko-fertickou strukturou, jakosti X2CrNiMoN 25-7-4. Při návrhu bylo počítáno s aplikací materiálu do vysoce korozního prostředí jako jsou např. tepelné výměníky chlazené mořskou vodou. Při výběru metod bylo bráno v úvahu i možné využití na těchto zařízeních. Dále byly průběžně vybrány další parametry svařování jako použití ochranných plynů a přídavných materiálů, v poslední řadě vliv proudových a napěťových parametrů na výsledný svarový spoj.

Z těchto parametrů byla předběžně vytvořena pWPS, podle které byly svařeny první kontrolní vzorky, případně u některých metod došlo k úpravě parametrů v závislosti na jakosti vytvořeného spoje. V průběhu svařování byla kontrolována teplota interpass a bylo měřeno a přepočítáno vnesené teplo u každého svarového spoje. Před svařením kontrolních vzorků bylo svařeno i několik zkušebních vzorků, pro zacvičení svářeče a operátora. Úprava svařovacích parametrů byla nutná u svařování TIG, s drobným zvýšením proudové charakteristiky, tak aby bylo možné snadněji ovládat tavnou lázeň. I přes tento krok bylo dodrženo vnesené teplot. Druhým krokem bylo drobné upravení parametrů u svařování MAG, kdy v některých úsecích docházelo k velkému rozstříku kovu.

U každého předpokládaného kontrolního spoje došlo k provedení NDT testování, které by prokázalo případné nedostatky. Prvním testem byla vizuální kontrola, který se prováděla okamžitě na pracovišti svařování. Kde oprava byla nutná, byl vzorek č. 2 v místě kořene, kde vznikly na hranici přípustnosti nenatavené hrany. Toto místo bylo opraveno. Následně kapilární zkoušky byly u vzorků vyhovující. Problematika vznikla při testování vzorků č. 3, kde na snímku byly zřetelné póry v celé délce svaru, v některých místech byly dokonce shlukovány. Tento výsledek byl nevyhovující. V tomto okamžiku bylo přistoupeno k úpravě svařovacích parametrů metody 135, snahou bylo dodat do svarového spoje více tepla s dodržení maximální možné hranice 1,5 kJ/mm. Tímto krokem došlo v některých případech i ke změně způsobu přenosu kovu v oblouku, ovšem po jednotlivých radiografických zkouškách byl výsledek nezatelný. K urychlení prací bylo odzkoušeno svařování vzorků č. 4 a 5 (bez svařování kořenové vrstvy metodou 141), vzorky byly přímo svařovány pouze metodou 135 na dvě, respektive tři svarové housenky. Pro vzorek č. 5 byl navíc použit plyn s příměsí hélia ve výši 20%, ani tento krok nesnížil počet pórů. I přes nevyhovující výsledky NDT bylo rozhodnuto o omezeném testování. Radiografické testy u ostatních metod č. 1, 2, 6, 7 byly vyhovující.

Následně bylo přistoupeno k mechanickým testům, kde jako první byla provedena příčná zkouška tahem. Pro jednotlivé sady zkušebních těles bylo pro vyhovující výsledek nutností dosaženo minimální pevnosti základního materiálu daného výrobkovou normou pro polotovary plechu, hodnota pevnosti činila 750 MPa. Toho výsledku dosáhly všechny testované sady kontrolních spojů včetně vzorku č. 3, kde i přes výskyt pórů bylo dosaženo požadované hodnoty. Jediným mírně negativním výsledkem bylo snížení tažnosti pro vzorek č. 2, kde ovšem zpětně nebylo možné zjistit souvislost. V tomto pohledu mohlo jít o chybu měření v průběhu testování nebo vysoké tepelné ovlivnění a případná degradace materiálu.

Mechanické zkoušky pokračovaly testováním zkušebních těles na hodnoty nárazové práce v prostředí při -40 °C. Hodnotícím kritériem bylo dosažení 27 J nárazové práce, všechny vzorky byly redukováného průřezu 5x10 mm nebo 3x10 mm. Vysoké hodnoty nárazové práce pro vzorky č. 1 a 2 které byly přes 100 J pro svarový kov i tepelně ovlivněnou oblast, s následným poklesem hodnot nárazové práce pro vzorek č. 3 obsahující póry. Testované vzorky č. 6 a 7 vykazovali nejnižší hodnoty nárazové práce. Všechny dosažené hodnoty nárazové práce byly z pohledu kritéria vyhovující, u vzorků č. 1 a 2 by bylo možné svarové spoje pro provoz zařízení dalším testováním vzorků posunout dále k nižším teplotám.

Testování vzorků ohybem bylo vyhovující pro vzorky č. 1, 2, 3, kde ohnutá zkušební tělesa nevykazovala žádné viditelné trhliny na hodnocených plochách, tímto byly hodnoceny jako vyhovující. U kontrolních vzorků č. 4, 5 a 6 došlo ke značné iniciaci trhlín vždy na jednom zkušebním tělese. Pro vzorky 4 a 5 je vysoká pravděpodobnost vznik trhlín ze shluku pórů uvnitř spoje, u vzorku č. 6 se jednalo pravděpodobně o lokální defekt, ačkoliv radiografický test defekt neodhalil.

Zkoušky mikrotvrdosti jednotlivých vzorků neodhalily vysoké hodnoty tvrdosti ani žádnou závislost průběhů tvrdosti, ze všech vzorků byly naměřeny nejvyšší hodnoty u vzorku č. 2, u ostatních vzorků byly hodnoty do 300 HV. Porovnání naměřených hodnot s hodnotami atestu a materiálového listu jakosti oceli, kde jsou hodnoty uváděny 280 HV resp. 310 HV, lze říci že hodnoty mikrotvrdosti jsou ve vyhovujících mezích.

Při testování makrostruktury nedošlo ke zjištění trhlín a defektů u jednotlivých vzorků, při naleptání byly zřetelně viditelné jednotlivé svarové vrstvy a tepelně ovlivněná oblast. Při dalším hodnocení mikrostruktury a vyšším rozlišení bylo zřetelně vidět zhrubnutí jednotlivých pásů tepelně ovlivněných oblasti na vzorcích v porovnání se svarovým kovem a základním materiálem.

Finálním testem bylo provedení testu korozních vlastností svarových spojů. U této zkoušky došlo k vystavení vzorků 5 % solnému roztoku při teplotě 35 °C po celkovou dobu 1240 hodin. Při průběžných kontrolách byl zjištěn první výskyt koroze po 140 hodinách s následným rozvojem. Při 240 hodinách došlo k následnému přerušení testů a zdokumentování vzorků. Dalším pokračováním testu a průběžnými kontrolami došlo k ukončení testu po 1240 hodinách a opětovnému zdokumentování vzorků. Součástí dokumentace bylo hodnocení plošného napadení koroze. Vše je shrnuto v příslušné kapitole. Celkově nejhorší výsledek měl vzorek austenitické oceli jakosti 1.4571 a vzorek austeniticko-feritické oceli pod označením 5a, oba vzorky byly pouze mechanicky očištěny. Celkově nízké korozní napadení prokázala i austenitická korozivzdorná ocel jakosti 1.4301, která má ze všech testovaných vzorků nejméně legujících prvků. Celkovým shrnutím lze říci že nejlépe dopadli oceli chemicky očištěné (moření+pasivace) a bylo by vhodné toto zpracování navrhnout i pro případný výrobek do korozního prostředí.

Mechanickým testováním korozního vzorku na příčnou zkoušku tahem nedošlo ke snížení mechanických vlastností v souvislosti s lokální plošnou korozi.

## 8. Závěr

Z celkového počtu testovaných vzorků lze jistě za vyhovující prohlásit pouze vzorky č. 1, 2, 7, které v průběžně vyhověly všem testům. Při realizaci svarového spoje dle vzorku č. 2 by bylo vhodné objasnit sníženou tažnost vzorků u příčné zkoušky tahem, kde by bylo vhodné minimálně odzkoušet novou sadu vzorků. Pro případné vystavení certifikátu WPQR by bylo nutné svařit novou sadu kontrolních spojů za dozoru nezávislého orgánu včetně nové sady zkoušek.

Pro nevyhovující vzorky č. 3, 4, 5 by bylo vhodné další zaměření a vyzkoušení jiného svařovacího zdroje, který při svařování těchto vzorků nebyl dostupný, případně dle možností použít svařovací zdroj, který byl použit pro svaření vzorků č. 6 a 7, kde byla možnost volby programu pro konkrétní jakost základního materiálu, kde tento program je předběžně nastaven od výrobce zdroje. Případně tento krok kombinovat s úpravou geometrie svaru – zvětšit otupení na 2 mm a snížit svarovou mezeru na 1,5 až 2 mm. Dalším krokem by mohla být náhrada přídavného materiálu z plného drátu na drát trubičkový se svařováním s ochranným plynem.

Testování kontrolního vzorku č. 6 při ohybu byla zjištěna trhлина, tento defekt mohl být vlivem skryté trhliny, která nebyla odhalena na radiografickém testu. Proto by bylo vhodné otestovat novou sadu vzorků. Pro realizaci svarového spoje touto metodou v průmyslu by bylo výhodnější využít spíše kontrolní vzorek č. 7, kde vzhledem k použitému formovacímu plynu je několikanásobně nižší cena než plyny se směsí helia. Vlastnosti svarových spojů byly v průběhu testů srovnatelné.

Asi nejvýhodnějším a nejrychlejším typem svařování byl vzorek č. 1 s plazmovým svařováním, tuto metodu lze v praxi použít pouze pro přímé a obvodové svařování a je omezen zpravidla od tlouštěk materiálu 3-8 mm, kde pro jiné rozměry je nutné volit kombinace svařovacích metod s automatizovanou metodou TIG nebo svařování pod tavidlem.

Korozním testem bylo dokázáno že vyšší korozní odolnost proti napadení měly vzorky chemicky očištěné, proto oceli této jakosti by měli mít vždy chemické očištění tepelně ovlivněných oblastí v průběhu výroby, aby nedošlo ke zkrácení životnosti zařízení.

### Použitá literatura:

- [1] BARTÁK, Jiří, Bohumír BEDNÁŘ, Zdeněk HUDEC, et al. *Svařování kovů v praxi: Materiály, výpočty, technologie, požadavky na jakost, bezpečnost práce*. 20. Praha: Verlag Dashöfer, 2013. ISSN 1803-2834.
- [2] ČÍHAL, Vladimír. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. Praha: Academia, 1999. Česká matice technická (Academia). ISBN 80-200-0671-0.
- [3] *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-85-3.
- [4] DORAZIL, Eduard. *Kovové materiály*. Praha: Československá redakce VN MON, 1991. ISBN 80-214-0239-3.
- [5] *Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály (1. díl)* [online]. [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/korozivzdorne\\_oceli\\_3.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/korozivzdorne_oceli_3.pdf)
- [6] NĚMEC, Karel. *Korozivzdorné a žáruvzdorné oceli* [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: [http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura\\_a\\_vlastnosti\\_materialu/prednasky/06%20-%20Korozivzdorne%20a%20zaruvzdorne%20oceli.pdf](http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/06%20-%20Korozivzdorne%20a%20zaruvzdorne%20oceli.pdf)
- [7] *Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály* [online]. 2003 [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy-2-2.html>
- [8] *ASM handbook: Welding, brazing and soldering*. Vol. 6. 10 edition. USA: ASM International, 1993. ISBN 0-87170-382-3.
- [9] EDITORS, David L. Olson. *Ferrous alloy weldments*. Switzerland: Trans Tech Pub, 1992. ISBN 0-87849-544-4
- [10] ČERNÝ M. a kol., 1984: *Korozní vlastnosti kovových konstrukčních materiálů*. 1. vyd., SNTL, Praha, 264 s. DT 620.193:669.018.
- [11] *ASM handbook: Corrosion of Weldments*. ASM International Technical Books Committee, USA, 2006. ISBN-13: 978-0-87170-841-0
- [12] KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009, 218 s.
- [13] ČERNÝ, Jaroslav a Viktor KREIBICH. *Koroze v potrubních systémech* [online]. 2011 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1827&h=116>
- [14] ČÍHAL, Vladimír. *Mezikrystalová koroze ocelí a slitin*. 3. dopl. vyd. Praha: SNTL, 1984, 360 s. DT 620.193:669.14.
- [15] NĚMCOVÁ, Aneta a Bohumil PACAL. *Korozní zkoušení kovových materiálů* [online]. Brno: VUT [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/oporakoroze4/Koroze%20download.pdf>
- [16] AIR LIQUIDE WELDING. *Zařízení na podávání horkého drátu: č. 9557 7800*. 2017, 18 s. Návod k použití - NERTAMATIC 450.
- [17] HENON, Barbara K. *Advances in Automatic Hot Wire GTAW (TIG) Welding* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.arcmachines.com/news/case-studies/advances-automatic-hot-wire-gtaw-tig-welding>
- [18] Innershield - svařování trubičkovým drátem. *CZ WELD* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.czweld.cz/clanky/innershield.htm>

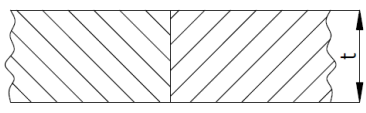
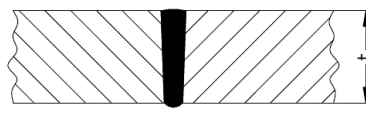


- [19] *Self-Shielded vs. Gas-Shielded Flux-Cored Electrodes* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.lincolnelectric.com/en-za/support/welding-solutions/Pages/shielded-flux-cored-electrodes.aspx>
- [20] ČSN EN 10028-7. *Ploché výrobky z ocelí pro tlakové účely - Část 7: Korozivzdorné oceli*. Praha: ÚNMZ, 2017.
- [21] *Collie welding: Heat input calculators* [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <http://www.colliewelding.com/hicalculators.php>
- [22] OCHODEK, Vladislav. *Vliv teplotního režimu svařování na vlastnosti svarových spojů - I* [online]. leden 2011 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: [http://www.domzo13.cz/dokumenty/vyuka/seminare/vliv\\_tepl\\_rezimu\\_a1.pdf](http://www.domzo13.cz/dokumenty/vyuka/seminare/vliv_tepl_rezimu_a1.pdf)
- [23] PETTERSSON, Rachel, Mikael JOHANSSON a Elin M. WESTIN. *Corrosion performance of welds in duplex, superduplex and lean duplex stainless steels* [online]. 2014, (1), 8 [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: <http://www.outokumpu.com/sitecollectiondocuments/outokumpu-corrosion-management-news-acom-1-2014.pdf>
- [24] ČSN EN ISO 15614-1. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 1: Obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. Praha: ÚNMZ, 2005.
- [25] ČSN EN ISO 5817. *Svařování - Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování) - Určování stupňů kvality*. Praha: ÚNMZ, 2014.
- [26] *Guidelines for welding zeron 100 super duplex stainless steel*. Lincoln Smitweld B.V., The Netherlands.
- [27] *Effect of Shielding Gas Composition on Phase Transformation and Mechanism of Pitting Corrosion of Hyper Duplex Stainless Steel Welds* [online]. Seoul (Korea), 2011, 52(6) [cit. 2018-05-13]. ISSN 1347-5320. Dostupné z: <https://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/52/06/1228.pdf>
- [28] ČSN EN ISO 4136. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Příčná zkouška tahem*. Praha: ÚNMZ, 2013.
- [29] ČSN EN ISO 148-1. *Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda*. Praha: ÚNMZ, 2017.
- [30] ČSN EN ISO 517. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušky ohybem*. Praha: ÚNMZ, 2010.
- [31] ČSN EN ISO 9015-1. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušení tvrdosti - Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním*. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [32] ČSN EN ISO 9227. *Korozní zkoušky v umělých atmosférách - Zkoušky solnou mlhou*. Praha: ÚNMZ, 2018.
- [33] *Lexikon kovů – značení ocelí a norem: Duplexní nerezavějící ocel SAF 2507*. 2006, 2 s. Softwarová databáze.

## PŘÍLOHA č. 1

	Pokyny pro svařování (WPS)	Číslo WPS: _____ Rev. _____
		Vzorek č. 1
		Strana 1 od 1

Místo: Číslo WPQR: Kvalifikace svářeče: Svařovací proces: (Plazma) Druh svaru: Tupý svar Zákazník: Číslo zakázky: Číslo výkresu: Číslo dílu:	Zkoušející nebo zkušebna: Způsob přípravy a čištění: mechan. opracování Opracování kořenové vrstvy: Čištění Specifikace základního materiálu: Č. skupiny ISO TR 15608: 1) [1.4410] X2CrNiMoN25-7-4 10.2 2) [1.4410] X2CrNiMoN25-7-4 10.2 Tloušťka materiálu: 6 mm Vnější průměr: Poloha svařování: PA
--	---

Rozměry:	Geometrie spoje 	Postup svařování 
	©hsk • welding solutions	©hsk • welding solutions

Poznámka:

Detaily pro svařování

	Vrstva svaru	Proces	Ø přídavného materiálu [mm]	Proud	Napětí [V]	Druh proudu / polarita	Rychlost podávání drátu	Rychlost svařování [cm/min]	Vložená energie [kJ/cm]
A)	Kořenová vrstva	15	1	168 A	30,1	= / -	160 m/min	23,4	10,37

Přídavný materiál / svařovací prášek

Označení	Název značky	Výrobce	Zvláštní předpisy pro sušení Čas [h]	Teplota [°C]
A) G 25 9 4 N L	LNM Zeron 100X	Lincoln Electric		

Ochranný plyn

Typ	Název značky	Výrobce	Průtok [l/min]	Doba předfuku [s]	Doba dofuku [s]
A) Svařování: R1 - ArH-5 Kořen: N1-N ***: I1	VARIGON H5	Linde Gas	25		
	Argon 4.6	Linde Gas	76		
			6		

Další informace

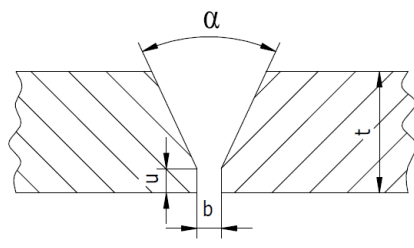
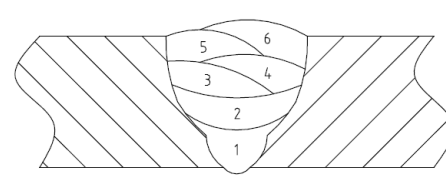
Parametry / hodnota	Rozkvyk: Přímočará housenka	
A) Velikost trysky plazmového plynu: 3 mm	Teplota předehřátí [°C]: 20	
Typ wolframové elektrody: WTh 20, Ø: 4,8 mm	Mezivrstvová teplota [°C]: 100	
Datum / vyhotovil:	Datum / zkontroval:	Datum / schválil:
Podpis	Podpis	Podpis

## Kontrolní vzorek č. 1 – záznam svařování

## PŘÍLOHA č. 2

	Pokyny pro svařování (WPS)	Číslo WPS: Vzorek č. 2	Rev.
		Strana 1 od 2	

Místo: Číslo WPQR: Kvalifikace svářeče: Svařovací proces: (WIG) Druh svaru: Tupý svar Zákazník: Číslo zakázky: Číslo výkresu: Číslo dílu:	Zkoušející nebo zkušebna: Způsob přípravy a čištění: mechan. opracování Opracování kořenové vrstvy: Čištění Specifikace základního materiálu: Č. skupiny ISO TR 15608: 1) [1.4410] X2CrNiMoN25-7-4 10.2 2) [1.4410] X2CrNiMoN25-7-4 10.2 Tloušťka materiálu: 6 mm Vnější průměr: Poloha svařování: PA
---	---

Rozměry:	Geometrie spoje 	Postup svařování 
----------	--	--

Poznámka:

### Detaily pro svařování

	Vrstva svaru	Proces	Ø přídavného materiálu [mm]	Proud	Napětí [V]	Druh proudu / polarita	Rychlost podávání drátu	Rychlost svařování [cm/min]	Vložená energie [kJ/cm]
A)	Kořenová vrstva	141	2	90 A	12,2	= / -		4,8	8,23
B)	Plnicí vrstva	141	2,4	115 A	12,5	= / -		10,5	4,93
C)	Plnicí vrstva	141	2,4	125 A	12,7	= / -		13,5	4,23
D)	Plnicí vrstva	141	2,4	125 A	12,6	= / -		14	4,05
E)	Krycí vrstva	141	2,4	125 A	12,6	= / -		15,6	3,63
F)	Krycí vrstva	141	2,4	125 A	12,5	= / -		16,7	3,37

### Přídavný materiál / svařovací prášek

	Označení	Název značky	Výrobce	Zvláštní předpisy pro sušení	
				Čas [h]	Teplota [°C]
A)	W 25 9 4 N L	LNT 2507	Lincoln Electric		
B)	G 25 9 4 N L	LNM Zeron 100X	Lincoln Electric		
C)	G 25 9 4 N L	LNM Zeron 100X	Lincoln Electric		
D)	G 25 9 4 N L	LNM Zeron 100X	Lincoln Electric		
E)	G 25 9 4 N L	LNM Zeron 100X	Lincoln Electric		
F)	G 25 9 4 N L	LNM Zeron 100X	Lincoln Electric		

### Ochranný plyn

	Typ	Název značky	Výrobce	Průtok [l/min]	Doba předfuku [s]	Doba dofuku [s]
A)	Svařování: N2 - ArN-2 Kořen: N1	VARIGON N2 Stickstoff 2.8	Linde Gas Linde Gas	12 25		
B)	Svařování: N2 - ArN-2	VARIGON N2	Linde Gas	12		
C)	Svařování: N2 - ArN-2	VARIGON N2	Linde Gas	12		
D)	Svařování: N2 - ArN-2	VARIGON N2	Linde Gas	12		
E)	Svařování: N2 - ArN-2	VARIGON N2	Linde Gas	12		
F)	Svařování: N2 - ArN-2	VARIGON N2	Linde Gas	12		

### Další informace

	Parametry / hodnota
A)	Typ wolframové elektrody: WTh 20, Ø: 2,4 mm
B)	Typ wolframové elektrody: WTh 20, Ø: 2,4 mm
C)	Typ wolframové elektrody: WTh 20, Ø: 2,4 mm
D)	Typ wolframové elektrody: WTh 20, Ø: 2,4 mm
E)	Typ wolframové elektrody: WTh 20, Ø: 2,4 mm
F)	Typ wolframové elektrody: WTh 20, Ø: 2,4 mm

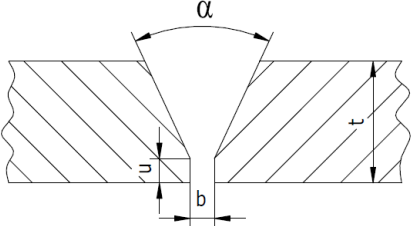
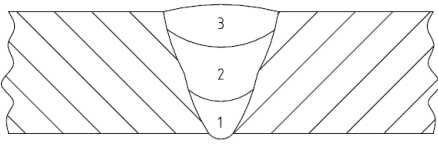
Rozkyv: Přímochará housenka  
Teplota předehřátí [°C]: 20  
Mezivrstevná teplota [°C]: 100

## Kontrolní vzorek č. 2 – záznam svařování

### PŘÍLOHA č. 3

	Pokyny pro svařování (WPS)	Číslo WPS: Rev.
		Vzorek č. 3
		Strana 1 od 1

Místo: Číslo WPQR: Kvalifikace svářeče: Svařovací proces: (WIG), (MAG) Druh svaru: Tupý svar Zákazník: Číslo zakázky: Číslo výkresu: Číslo dílu:	Zkoušející nebo zkušebna: Způsob přípravy a čištění: mechan. opracování Opracování kořenové vrstvy: Čištění Specifikace základního materiálu: 1) [1.4410] X2CrNiMoN25-7-4 10.2 2) [1.4410] X2CrNiMoN25-7-4 10.2 Tloušťka materiálu: 6 mm Vnější průměr: Poloha svařování: PA
--	--

Rozměry:	 <p>Geometrie spoje</p>	 <p>Postup svařování</p>
----------	--	--

Poznámka:

Detaily pro svařování									
	Vrstva svaru	Proces	Ø přídavného materiálu [mm]	Proud	Napětí [V]	Druh proudu / polarita	Rychlost podávání drátu	Rychlost svařování [cm/min]	Vložená energie [kJ/cm]
A)	Kořenová vrstva	141	2	96 A	12,3	= / -		5,4	7,87
B)	Plnicí vrstva	141	2,4	141 A	14	= / -		9,9	7,18
C)	Krycí vrstva	135	1	169 A	23,6	= / +	9,2 m/min	23,3	8,22

Přídavný materiál / svařovací prášek				Zvláštní předpisy pro sušení	
Označení	Název značky	Výrobce	Čas [h]	Teplota [°C]	
A) W 25 9 4 N L	LNT 2507	Lincoln Electric			
B) G 25 9 4 N L	LNM Zeron 100X	Lincoln Electric			
C) G 25 9 4 N L	LNM Zeron 100X	Lincoln Electric			

Ochranný plyn						
	Typ	Název značky	Výrobce	Průtok [l/min]	Doba předfuku [s]	Doba dofuku [s]
A)	Svařování: N2 - ArN-2 Kořen: N1	VARIGON N2 Stickstoff 2.8	Linde Gas Linde Gas	12 25		
B)	Svařování: N2 - ArN-2	VARIGON N2	Linde Gas	12		
C)	Svařování: M12 - ArC-2,5	CRONIGON 2	Linde Gas	13		

Další informace		
Parametry / hodnota		
A) Typ wolframové elektrody: WTh 20, Ø: 2,4 mm	Rozkvy: Přímočará housenka	
B) Typ wolframové elektrody: WTh 20, Ø: 2,4 mm	Teplota předehřátí [°C]: 20	
C) Transfer materiálu: Impulzní oblouk	Mezivrstvová teplota [°C]: 100	

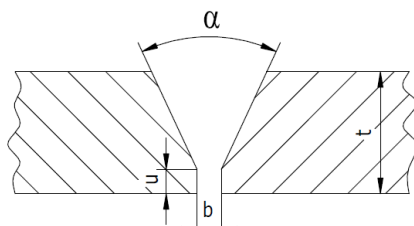
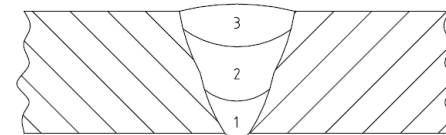
Datum / vyhotovil:	Datum / zkontroloval:	Datum / schválil:
Podpis	Podpis	Podpis

### Kontrolní vzorek č. 3 – záznam svařování

### PŘÍLOHA č. 4

	Pokyny pro svařování (WPS)	Číslo WPS: _____ Rev. _____
		Vzorek č. 4
		Strana 1 od 1

Místo: Číslo WPQR: Kvalifikace svářeče: Svařovací proces: (MAG) Druh svaru: Tupý svar Zákazník: Číslo zakázky: Číslo výkresu: Číslo dílu:	Zkoušející nebo zkušebna: Způsob přípravy a čištění: mechan. opracování Opracování kořenové vrstvy: mechan. opracování Specifikace základního materiálu: Č. skupiny ISO TR 15608: 1) [1.4410] X2CrNiMoN25-7-4 10.2 2) [1.4410] X2CrNiMoN25-7-4 10.2 Tloušťka materiálu: 6 mm Vnější průměr: Poloha svařování: PA
---	--

Rozměry:	Geometrie spoje 	Postup svařování 
----------	--	--

Poznámka:

Detaily pro svařování									
	Vrstva svaru	Proces	Ø přídavného materiálu [mm]	Proud	Napětí [V]	Druh proudu / polarita	Rychlost podávání drátu	Rychlost svařování [cm/min]	Vložená energie [kJ/cm]
A)	Kořenová vrstva	135	1	125 A	20,8	= / +	6 m/min	24	5,20
B)	Krycí vrstva	135	1	132 A	22,8	= / +	6,1 m/min	36,4	3,97
C)	Krycí vrstva	135	1	132 A	22,5	= / +	10,8 m/min	35,3	4,04

Přídavný materiál / svařovací prášek				Zvláštní předpisy pro sušení	
	Označení	Název značky	Výrobce	Čas [h]	Teplota [°C]
A)	G 25 9 4 N L	LNM Zeron 100X	Lincoln Electric		
B)	G 25 9 4 N L	LNM Zeron 100X	Lincoln Electric		
C)	G 25 9 4 N L	LNM Zeron 100X	Lincoln Electric		

Ochranný plyn						
	Typ	Název značky	Výrobce	Průtok [l/min]	Doba předfuku [s]	Doba dofuku [s]
A)	Svařování: M12 - ArC-2,5 Kořen: N1-N	CRONIGON 2	Linde Gas	18 7		
B)	Svařování: M12 - ArC-2,5	CRONIGON 2	Linde Gas	15		
C)	Svařování: M12 - ArC-2,5	CRONIGON 2	Linde Gas	15		

Další informace		
	Parametry / hodnota	
A)	Transfer materiálu: Impulzní oblouk	Rozkvy: Přímočará housenka
B)	Transfer materiálu: Impulzní oblouk	Teplota předehřátí [°C]: 20
C)	Transfer materiálu: Impulzní oblouk	Mezivrstevová teplota [°C]: 100

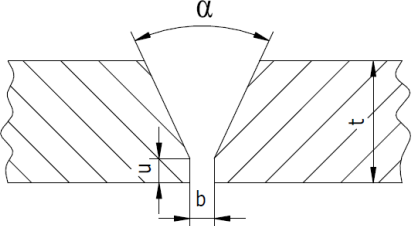
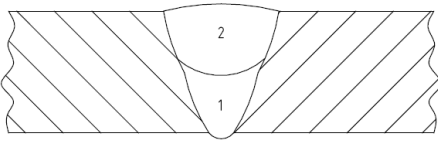
Datum / vyhotovil:	Datum / zkontroval:	Datum / schválil:
Podpis	Podpis	Podpis

## Kontrolní vzorek č. 4 – záznam svařování

## PŘÍLOHA č. 5

	Pokyny pro svařování (WPS)	Číslo WPS: Rev.
		Vzorek č. 5
		Strana 1 od 1

Místo: Číslo WPQR: Kvalifikace svářeče: Svařovací proces: (MAG) Druh svaru: Tupý svar Zákazník: Číslo zakázky: Číslo výkresu: Číslo dílu:	Zkoušející nebo zkušebna: Způsob přípravy a čištění: mechan. opracování Opracování kořenové vrstvy: mechan. opracování Specifikace základního materiálu: Č. skupiny ISO TR 15608: 1) [1.4410] X2CrNiMoN25-7-4 10.2 2) [1.4410] X2CrNiMoN25-7-4 10.2 Tloušťka materiálu: 6 mm Vnější průměr: Poloha svařování: PA
---	--

Rozměry:	Geometrie spoje 	Postup svařování 
----------	--	--

Poznámka:

### Detaily pro svařování

	Vrstva svaru	Proces	Ø přídavného materiálu [mm]	Proud	Napětí [V]	Druh proudu / polarita	Rychlost podávání drátu	Rychlost svařování [cm/min]	Vložená energie [kJ/cm]
A)	Kořenová vrstva	135	1	126 A	20,8	= / +	6 m/min	19,4	6,48
B)	Krycí vrstva	135	1	157 A	27,3	= / +	9 m/min	22,4	9,18

### Přídavný materiál / svařovací prášek

Označení	Název značky	Výrobce	Zvláštní předpisy pro sušení Čas [h]	Teplota [°C]
A) G 25 9 4 N L	LNM Zeron 100X	Lincoln Electric		
B) G 25 9 4 N L	LNM Zeron 100X	Lincoln Electric		

### Ochranný plyn

Typ	Název značky	Výrobce	Průtok [l/min]	Doba předfuku [s]	Doba dofuku [s]
A) Svařování: M12 - ArHeC-20/2 Kořen: N1-N	CRONIGON 2He20	Linde Gas	14 7		
B) Svařování: M12 - ArHeC-20/2	CRONIGON 2He20	Linde Gas	14		

### Další informace

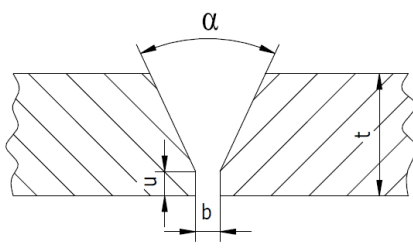
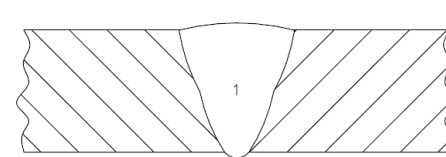
Parametry / hodnota	Rozkyv: Přímočará housenka	
A) Transfer materiálu: Impulzní oblouk	Teplota předehřátí [°C]: 20	
B) Transfer materiálu: Impulzní oblouk	Mezivrstvosvá teplota [°C]: 100	
Datum / vyhotovil:	Datum / zkontroval:	Datum / schválil:
Podpis	Podpis	Podpis

## Kontrolní vzorek č. 5 – záznam svařování

## PŘÍLOHA č. 6

	Pokyny pro svařování (WPS)	Číslo WPS: Vzorek č. 6	Rev.:
		Strana 1 od 1	

Místo: Číslo WPQR: Kvalifikace svařeče: Svařovací proces: (MAG) Druh svaru: Tupý svar Zákazník: Číslo zakázky: Číslo výkresu: Číslo dílu:	Zkoušející nebo zkušebna: Způsob přípravy a čištění: Opracování kořenové vrstvy: Specifikace základního materiálu: 1) [1.4410] X2CrNiMoN25-7-4 2) [1.4410] X2CrNiMoN25-7-4 Tloušťka materiálu: 3 mm Vnější průměr: Poloha svařování: PA	Řezání vodním paprskem Čištění Č. skupiny ISO TR 15608: 10.2 10.2
---	---	---

Rozměry:	Geometrie spoje 	Postup svařování 
----------	--	--

Poznámka:

Detaily pro svařování

	Vrstva svaru	Proces	Ø přídavného materiálu [mm]	Proud	Napětí [V]	Druh proudu / polarita	Rychlost podávání drátu	Rychlost svařování [cm/min]	Vložená energie [kJ/cm]
A)	Kořenová vrstva	135	1	93 A	21	= / +	4,5 m/min	30,5	3,07

Přídavný materiál / svařovací prášek

Označení	Název značky	Výrobce	Zvláštní předpisy pro sušení Čas [h]	Teplota [°C]
A) G 25 9 4 N L	OK Autrod 2509	Esab		

Ochranný plyn

Typ	Název značky	Výrobce	Průtok [l/min]	Doba předfuku [s]	Doba dofuku [s]
A) Svařování: M12 - ArHeC-20/2 Kořen: M12 - ArHeC-20/2	CRONIGON 2He20 CRONIGON 2He20	Linde Gas Linde Gas	14 12		

Další informace

Parametry / hodnota
A) Transfer materiálu: Impulzní oblouk

Rozkvy: Přímočará housenka  
Teplota předehřátí [°C]: 20  
Mezivrstvová teplota [°C]: 100

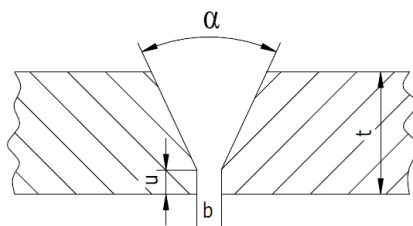
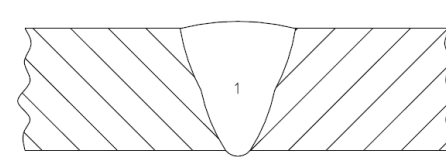
Datum / vyhotovil:	Datum / zkontroloval:	Datum / schválil:
Podpis	Podpis	Podpis

## Kontrolní vzorek č. 6 – záznam svařování

### PŘÍLOHA č. 7

	Pokyny pro svařování (WPS)	Číslo WPS: Vzorek č. 7	Rev.
		Strana 1 od 1	

Místo: Číslo WPQR: Kvalifikace svářeče: Svařovací proces: (MAG) Druh svaru: Tupý svar Zákazník: Číslo zakázky: Číslo výkresu: Číslo dílu:	Zkoušební nebo zkušební: Způsob přípravy a čištění: Opracování kořenové vrstvy: Specifikace základního materiálu: 1) [1.4410] X2CrNiMoN25-7-4 2) [1.4410] X2CrNiMoN25-7-4 Tloušťka materiálu: 3 mm Vnější průměr: Poloha svařování: PA	Řezání vodním paprskem Čištění Č. skupiny ISO TR 15608: 10.2 10.2
---	--	---

Rozměry:	<p>Geometrie spoje</p>  <p>©hsk • welding solutions</p>	<p>Postup svařování</p>  <p>©hsk • welding solutions</p>
----------	--	--

Poznámka:

Detaily pro svařování									
	Vrstva svaru	Proces	Ø přídavného materiálu [mm]	Proud	Napětí [V]	Druh proudu / polarita	Rychlost podávání drátu	Rychlost svařování [cm/min]	Vložená energie [kJ/cm]
A)	Kořenová vrstva	135	1	94 A	21,9	= / +	4,7 m/min	34,7	2,85

Přídavný materiál / svařovací prášek			Zvláštní předpisy pro sušení		
Označení	Název značky	Výrobce	Čas [h]	Teplota [°C]	
A) G 25 9 4 N L	OK Autrod 2509	Esab			

Ochranný plyn						
	Typ	Název značky	Výrobce	Průtok [l/min]	Doba předfuku [s]	Doba dofuku [s]
A)	Svařování: M12 - ArHeC-20/2 Kořen: N1-N	CRONIGON 2He20	Linde Gas	13 12		

Další informace			Rozkyv:	
Parametry / hodnota			Teplota předehřátí [°C]:	Přímočará housenka
A) Transfer materiálu: Impulzní oblouk			20	
			Mezivrstvová teplota [°C]:	100

Datum / vyhotovil:	Datum / zkontroval:	Datum / schválil:
Podpis	Podpis	Podpis

## Kontrolní vzorek č. 7 – záznam svařování