VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SVAŘOVÁNÍ TENKOSTĚNNÉHO POTRUBÍ Z KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ
WELDING THIN-WALLED PIPES MADE OF STAINLESS STEELS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Tomáš Naď
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Jaroslav Kubíček
SUPERVISOR

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

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

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

Svařování tenkostěnného potrubí z korozivzdorných ocelí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tenkostěnné potrubí z korozivzdorné oceli je využíváno v celé řadě odvětví průmyslu i stavebnictví. Jediný způsob výroby větších průměrů trubek je svinování plechu s následným svařováním. BP je zaměřena na rozbor možných způsobů svařování trubek s hodnocením vlastností samotného svarového spoje.

Cíle bakalářské práce:

1. Literární studie problematiky svařitelnosti korozivzdorných ocelí.
2. Návrh experimentální práce.
3. Rozbor technologie svařování trubek a vlasností spoje.
4. Vyhodnocení výsledků.

Seznam doporučené literatury:

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

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

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

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

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

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

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

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

NAĎ Tomáš: Svařování tenkostěnného potrubí z korozivzdorných ocelí.

Práce vytvořená v rámci bakalářského studia, se zabývá technologií svařování tenkostěnných trubek z korozivzdorné oceli a rozborem svařitelnosti korozivzdorných ocelí. Je zde uveden základní popis svařitelnosti materiálu a základní vady při svařování, charakteristika korozivzdorných ocelí, jejich dělení, označování, legování a obecný přehled jejich svařitelnosti. V experimentální části jsou popsány vybrané technologie svařování, které se používají na výrobu tenkostěnného potrubí z korozivzdorné oceli (LBW, PAW, HFIW). Na závěr je zjišťováno, jakou technologií jsou představené vzorky tenkostěnného potrubí svařeny a je porovnávána makrostruktura svarů.

Klíčová slova: Svařování, svařitelnost, tenkostěnné potrubí, korozivzdorná ocel

ABSTRACT

NAĎ Tomáš: Welding thin-walled pipes made of stainless steel

The bachelor's thesis deals with technology of welding of thin-walled stainless steel pipes and the analysis of weldability of stainless steels. The theoretical part provides a basic description of the material's weldability and the basic defects in welding, the characteristics of stainless steels, their division, marking, alloying and a general overview of their weldability. The experimental part describes selected welding technologies used for the production of thin-walled stainless steel pipes (LBW, PAW, HFIW). Finally, the technology used to weld the presented samples of thin-walled pipes is ascertained and the macrostructure of the weld are compared.

Keywords: Welding, weldability, thin-walled pipes, stainless steel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NAĎ, Tomáš. *Svařování tenkostěnného potrubí z korozivzdorných ocelí* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125052. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V …… dne 26.6.2020

……

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Jaroslavu Kubíčkovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval rodině za podporu při studiu.

OBSAH

Zadání
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování

ÚVOD 9
1 SVAŘITELNOST MATERIÁLU 10
1.1 Praskání svarových spojů 12
1.1.2 Trhliny za horka 12
1.1.3 Studené trhliny 13
1.1.4 Lamelární trhliny 13
1.1.4 Žíhací trhliny 14
2 CHARAKTERISTIKA KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ 15
2.1 Dělení korozivzdorných ocelí 15
2.2 Hlavní legující prvky korozivzdorných ocelí 18
2.3 Značení korozivzdorných ocelí 19
2.4 Vlastnosti korozivzdorných ocelí 21
3 SVAŘITELNOST KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ 27
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST 29
4.1 Metody svařování tenkostěnných trubek z korozivzdorné oceli 29
4.2 Materiál vzorků 32
4.3 Metody svařování vzorků 33
5 ZÁVĚR 43

Seznam použitých zdrojů
Seznam použitých symbolů a zkratek
Seznam obrázků
Seznam tabulek

ÚVOD [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]

Tenkostěnné potrubí z korozivzdorné oceli nachází využití napříč všemi průmyslovými odvětvími. Mezi přední výhody patří jejich korozní odolnost a to i v agresivních chemických prostředích, chemická neutrálnost, pevnostní charakteristiky a hygienická čistota. V automotive se používají na výrobu výfukových systémů, v potravinářském průmyslu splňují nejpřísnější hygienické předpisy, v petrochemickém průmyslu se využívá jejich chemická odolnost a stálost pro těžbu a dopravu ropy, zemního plynu a nejrůznějších agresivních látek, v energetickém průmyslu jako výměníky, ve stavebnictví nahrazují některé konstrukce kvůli vzhledové stránce. Pro výrobu tenkostěnného potrubí z korozivzdorné oceli se využívá slinování plechů a následné svaření. Pro svařování se používají technologie LBW (laser beam welding), PAW (plasma arc welding) a HFIW (high frequency induction welding).

Obr. 1 Příklady využití tenkostěnných trubek z korozivzdorné oceli [5], [6], [7], [8], [9], [10]

1 SVAŘITELNOST MATERIÁLU [13], [14], [15], [16], [18], [19], [20], [21]

Svařitelnost je technologická vlastnost, kterou se rozumí komplexní charakteristika materiálu vyjadřující vhodnost kovu pro požadované svařované spoje předepsané jakosti a konstrukční spolehlivosti. Svařitelnost jednotlivých kovových materiálů a jejich slitin je velmi rozdílná. K faktorům ovlivňující svařitelnost lze zařadit:

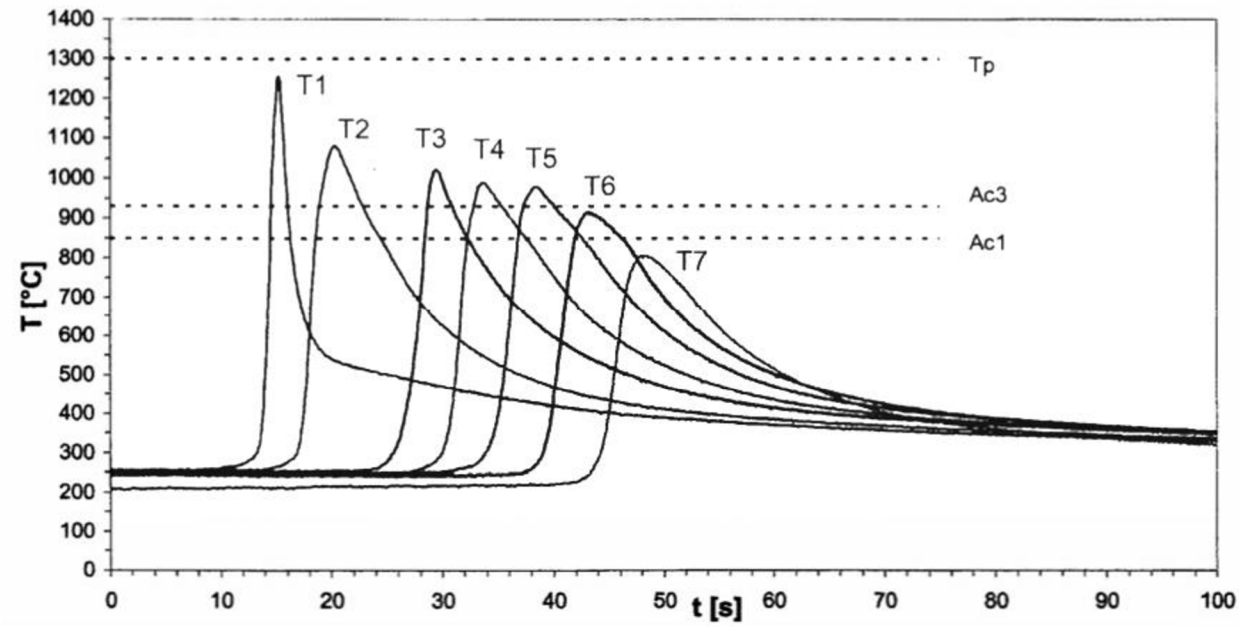
- Chemické složení materiálu
- Návrh svaru
- Technologie svařování
- Svařovací proces
- Poloha svařování
- Prostředí
- Způsob namáhání svaru

➢ **Teplotní cyklus svařování**

Teplotním cyklem se označuje průběh teploty ve svarovém spoji při jeho vytváření. Při procesu svařování dochází krátkodobě k intenzivnímu místnímu ohřevu materiálu na vysoké teploty, vneseným teplem se natavuje malý objem kovu a v důsledku tepelné vodivosti se ohřívá i okolní oblast základního materiálu. Vysoké teploty a jejich změny v základním materiálu při svařování způsobují:

- Fázové přeměny
- Fyzikálně chemické reakce
- Změny struktury v oblasti svarového spoje
- Změny objemu způsobující vnitřní napětí a deformace ve svaru

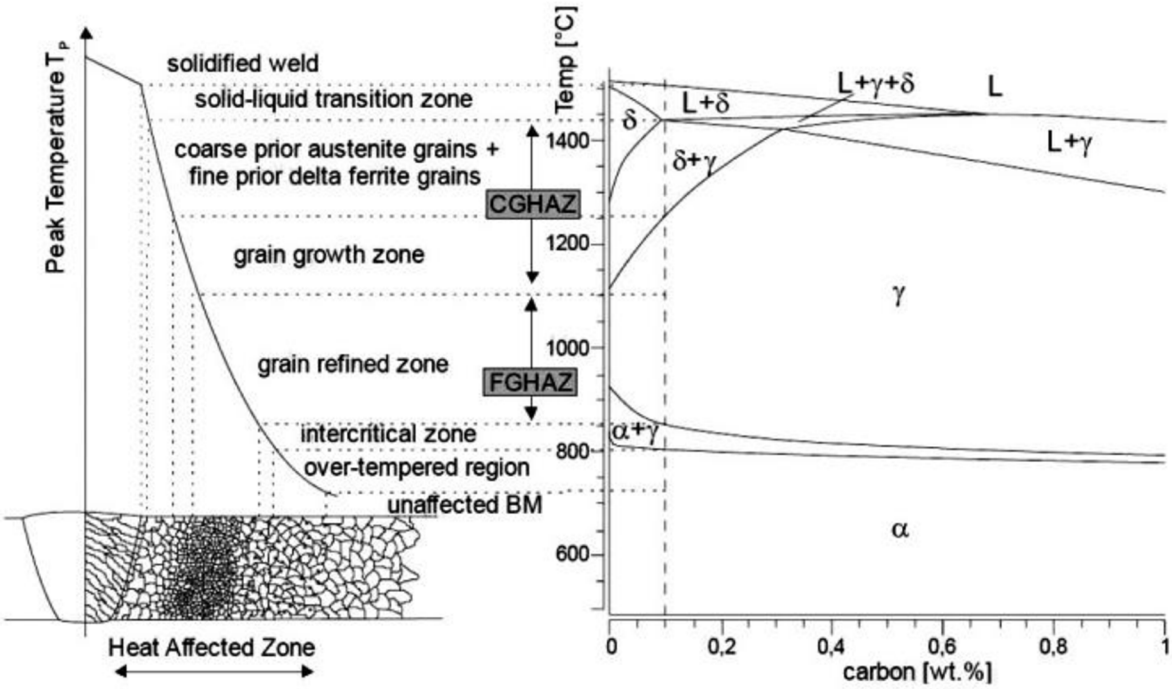
Míra a rozsah uvedených změn závisí na výše uvedených faktorech a množství tepla vneseném do svarového spoje na jednotku délky. Délka výdrže na kritické teplotě má vliv na strukturní změny, při kterých dochází k růstu zrn, následné ochlazování ovlivňuje polymorfní přeměny a difuzi vodíku. Křivky teplotních cyklů se mohou sestavovat experimentálně nebo je lze vyhledat v tabulkách, mohou nabývat různých tvarů – závisí na technologii svařování, předehřevu, tepelnému zpracování po ohřevu, místech měření, počtu navařených housenek atp.



Obr. 2 Příklad průběhu teplotních cyklů v závislosti na čase a místě posuzovaném svarového spoje pro svařování jedné vrstvy housenky [13]

- **Tepelně ovlivněná oblast**

Tepelně ovlivněnou oblastí (TOO) je oblast svarového spoje, ve kterém dojde ke změnám mikrostruktury v důsledku působení zdroje tepla od svařování. Dochází zde k výrazným strukturním změnám, mající vliv na vlastnosti svarových spojů



Obr. 3 Vliv teplotního účinku na strukturu svarového spoje v oceli 1.4903 [14]

1.1 Praskání svarových spojů [13], [14], [15], [16], [18], [19], [20], [21]

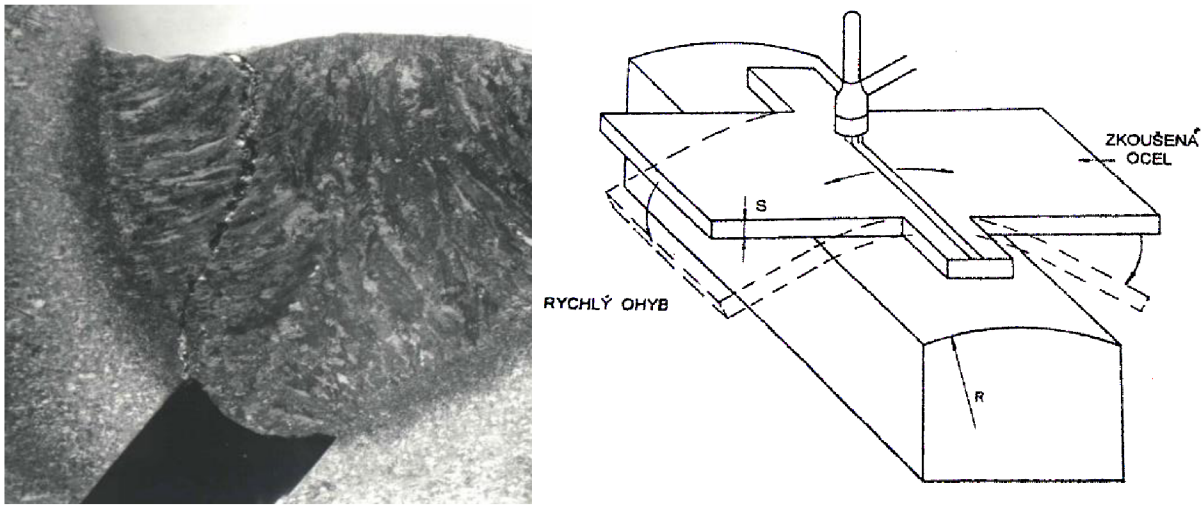
Trhliny ve svarových spojích jsou nepřípustné a omezují nebo znemožňují jejich použitelnost. Při svařování se volí takové podmínky, aby nedocházelo k praskání svarových spojů. Mohou nastat aplikace, při kterých nelze dodržet zadané podmínky a trhliny se objeví. V takovém případě se přistupuje k studiu a hodnocení pomocí lomové mechaniky vyskytnutých chyb a připouštíme nebo vylučujeme jejich použitelnost v dané aplikaci. K typům trhlin svarových kovů patří: trhliny za horka, studené trhliny, lamelární trhliny, žíhací trhliny a korozní trhliny.

1.1.2 Trhliny za horka [13], [18], [19], [20]

Lze je nejčastěji pozorovat ve svarovém kovu ale mohou vznikat i v tepelně ovlivněné oblasti. Jak již název napovídá, vznikají při ochlazování za vysokých teplot. Dělí se na:

- Krystalizační vznikající při krystalizaci svarového kovu při tuhnutí. Souvisí se snížením tažnosti kolem teploty solidu.
- Likvační vznikající ve svarovém kovu při několikavrstvém svařování nebo ve vysokoohřátém podhousenkovém pásmu teplem ovlivněné oblasti základního materiálu.
- Polygonizační, které jsou charakteristické pro vysokolegované austenitické oceli a slitiny niklu, mohou vznikat v tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu nebo ve svarovém kovu při nižší teplotě, souvisí s poruchami na hranicích zrn při ochlazování v oblasti teploty rekrystalizace.

Zkoušky náchylnosti k trhlinám za horka lze rozdělit na: zkoušky s vlastní tuhostí, zkoušky s vynucenou tuhostí, zkoušky s reálným nebo simulovaným svařovacím cyklem. Z nejznámějších zkoušek lze uvést zkoušky Murex, Varenstraint, Transvarenstraint, Frisco, Esso, LPT a další. Pro zamezení vzniku horkých trhlin je nutné snížení měrného výkonu svařování, použití přídavných materiálů vysoké čistoty, volba vhodných technik svařování, tvaru svarového spoje a předehřevu, nepoužívat housenky s malým tvarovým koeficientem svaru a malým průřezem, zejména v kořenové oblasti.

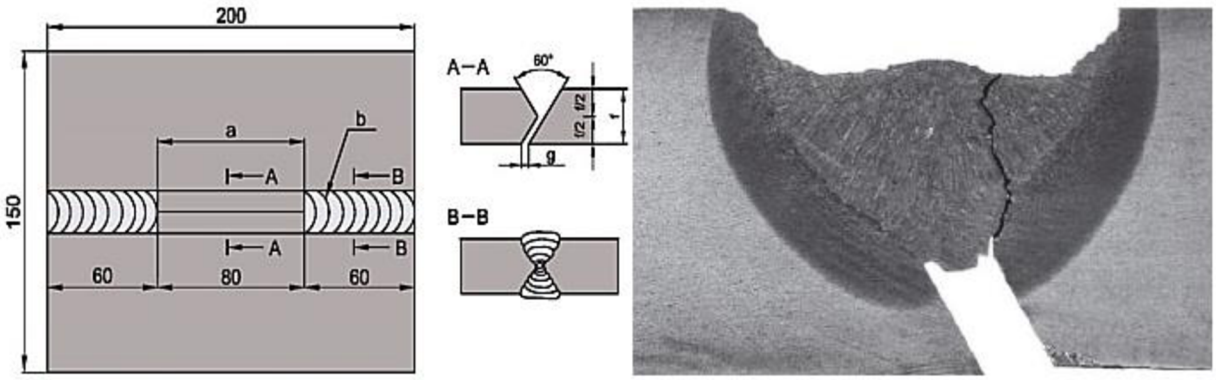


Obr. 4 Vlevo příklad trhliny za horka, vpravo zkouška Transvarestraint [18] [20]

1.1.3 Studené trhliny [13],[15], [16], [18], [19], [20]

Vznikají při nízkých teplotách (pod 200°C) při chladnutí anebo po vychladnutí svarových spojů. Může nastat i opožděné praskání, kdy se trhliny začnou objevovat hodiny až dny po svaření. Velkým podílem na těchto typech defektů se podílí vodík, dále tvrdé rozpadové fáze (martenzitické, bainitické) a zvýšené napětí. Trhliny jsou podélné i příčné, povrch mají lesklý a nezoxidovaný. Nejčastěji se vyskytují v podhousenkové oblasti ale mohou se vyskytovat i v kořenové oblasti, v koncových oblastech a ve svarovém kovu. Zdrojem vodíku ve svarech je nejčastěji atmosférická vlhkost, vlhkost z obalu elektrod a tavidel, popř. svařovací dráty po povrchové úpravě.

Experimentální zkoušky na hodnocení studené praskavosti lze rozdělit na: zkoušky s využitím reálného svařování, zkoušky se simulovaným svařovacím cyklem (simulátory Thermorestor, Gleebe, Smit-weld), zkoušky s vlastní tuhostí (Tekken, Lehigh, CTS, křížová a další) a zkoušky s vynucenou tuhostí (Implant). Zkoušky studené praskavosti se obecně označují jako zkoušky svařitelnosti ocelí, při nichž hledáme takové podmínky svařování, aby se výskyt prasklin eliminoval. Náchylnnost ocelí ke studeným trhlinám lze vyhodnotit i empiricky dle chemického složení oceli, vlivu tuhosti svařovaného spoje, vlivu difuzního vodíku atp. K zamezení vzniku trhlin za studena je nutné používat nízkovodíkové technologie svařování, provádět pečlivé sušení přídavných materiálů před použitím a zabránit jejich navlhnutí při skladování, aplikovat předehřev, dohřev, používat vyšší měrný výkon při svařování, volit vhodné techniky svařování pro minimalizaci vzniku zbytkových napětí po svařování, vyvarovat se ostrých vad (neprůvary, studené spoje, zápaly), které jsou místními koncentrátory napětí a iniciátory trhlin v průběhu svařování vyplňovaných vrstev.

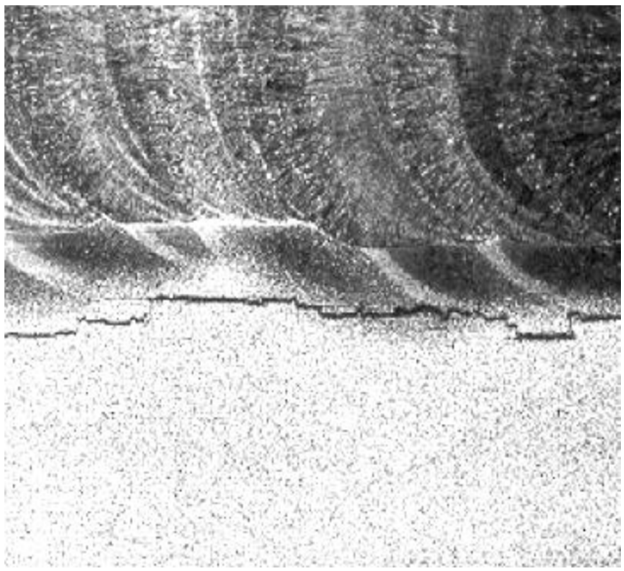


Obr. 5 Vlevo schéma zkoušky Tekken, studená trhlina ve vzorku při zkoušce Tekken [16] [15]

1.1.4 Lamelární trhliny [13], [17], [18], [19], [20]

Vznikají v základním materiálu nebo tepelně ovlivněné oblasti v důsledku namáhání plechu ve směru jeho tloušťky. Pozorujeme je ve válcovaných plechách nebo ve výkovcích s vysokým stupněm prokování. Mají kaskádovitý, stupňovitý tvar zpravidla rovnoběžný s povrchem plechu. Svařování samotné může více způsoby přispět k iniciaci

lamelárního praskání, především při vícevrstvém svařování může docházet k vzniku pnutí ve směru tloušťky plechu, dále přispívá difundující vodík ze svarového kovu do tepelně ovlivnění oblasti. Mezi iniciátory patří i již existující trhliny za horka nebo vodíkem indukované praskliny. Hlavní činitelé ovlivňující vznik lamelárních trhlin jsou: přítomnost velkého počtu plochých, rozválcovaných, plastických vměstků (nejčastěji sulfidů), plastické vlastnosti oceli ve směru tloušťky, způsob svařování a svařovací parametry, konstrukce svařovaného uzlu a obsah difuzního vodíku.



Obr. 6 Lamelární prasklina [17]

Pro hodnocení náchylnosti ocelí k lamelárnímu praskání lze využít parametrické rovnice zahrnující vliv chemického složení materiálu, obsahu nečistot a obsahu difuzního vodíku. Dále lze využít řady experimentálních zkoušek: zkouška Det Norske Veritas, Cranfieldova zkouška, oknová zkouška. K zamezení vzniku lamelárních trhlin je nutné: používat základní materiály se zaručenou kontrakcí ve směru tloušťky materiálu, zlepšení čistoty oceli, snížení obsahu difuzního vodíku, přesměrovat působení tahových napětí změnou tvaru spoje, použít polštářování na ploše, kde působí kolmá tahová napětí, použít techniky svařování, které minimalizují napětí od svařování.

1.1.4 Žíhací trhliny [13], [18], [19], [20]

Vznikají při tepelném zpracování svarových spojů nebo při mnohavrstvém svařování. Lze je rozlišit na trhliny, které vznikají za nízkých teplot v oblasti při ohřevu na teploty žíhání v rozmezí teplot 200 – 300 °C. Tyto trhliny můžou vznikat v důsledku vysoké rychlosti ohřevu na žíhací teplotu, při které je velký rozdíl teplot mezi povrchem a jádrem svaru. Tím vznikají termální napětí, které můžou dále spolupůsobit s napětími strukturními, což jsou napětí vznikající při rozpadu přesycených tuhých roztoků jako jsou martenzit nebo dolní bainit. Dalším typem jsou trhliny, které vznikají v oblasti teplot 600 – 650 °C (klasické žíhací trhliny). Třetím typem jsou podnávarové trhliny. K omezení vzniku žíhacích trhlin se využívá hlavně úpravy žíhacích režimů a jejich kontrola. Snížení rychlosti ohřevu na žíhací teplotu, především v prvních fázích ohřevu (do 250 °C), použití mezioperační žíhací teploty, použití dvojstupňového žíhání a kontrola ochlazování z žíhacích teplot.

2 CHARAKTERISTIKA KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ [11], [12], [19], [23]

Korozivzdorné oceli jsou vysoce legované oceli s obsahem chromu obvykle min. 11,7 % a s dalšími legujícím prvky jako nikl (až 30%), mangan (až 24%), molybden, tantal a další (Si, Al, Ti, W, V a N). Dále jsou charakteristické nízkým obsahem síry a fosforu (do 0,03 %), obsah uhlíku se pohybuje v rozmezí 0,01% až 0,1% a u martenzitických korozivzdorných ocelích od 0,2 % až 1 %. Zvýšenou odolnost vůči korozi ocel získává díky tzv. pasivaci povrchu, kdy v korozivzdorných ocelích reaguje kyslík s chrómem a na povrchu ocele se vytváří vrstva oxidu chromitého (Cr_2O_3) zabraňující dalšímu postupu reakce. Vzniklá vrstva se nazývá pasivní díky svojí nízké reaktivitě s okolím. Trvanlivost pasivní vrstvy závisí na složení legované oceli a prostředí v jakém se nachází. Na rozdíl u reakci povrchu uhlíkových ocelí bez přidaného chrómu reaguje kyslík s železem a vzniká porézní vrstva oxidů železa, která umožňuje další postup reakce hlouběji do materiálu. Výsledkem je nakonec úplné zrezivění výrobku. To ovšem neznamená, že korozivzdorné ocele nepodléhají korozi, jejich pasivní stav se může změnit pod vlivem různých podmínek a výsledkem mohou být různé druhy koroze:

- rovnoměrná koroze
- mezikrystalová koroze
- štěrbinová koroze
- důlková koroze
- koroze při mechanickém napětí, koroze z únavy, kontaktní koroze

Kromě zvýšené odolnosti proti korozi se korozivzdorná ocel dále vyznačuje:

- vysokým poměrem pevnosti k hmotnosti
- lehkostí čištění, hygienickým charakterem, estetickým vzhledem
- nízkou magnetickou permeabilitou, nízkou tepelnou vodivostí
- většinou dobrými kryogenními vlastnostmi (austenitické oceli)

2.1 Dělení korozivzdorných ocelí [4], [12], [21], [24], [26], [27], [28]

Korozivzdorné ocele rozdělujeme dle EN 10088 do čtyř základních skupin podle jejich mikrostruktury, které zásadně ovlivňují jejich mechanické vlastnosti a zároveň ovlivňují odolnost vůči korozi.

- Austenitické
- Martenzitické a vytvrditelné
- Feritické
- Duplexní

Dále je lze dělit dle využití na:

- Korozivzdorné
- Žáruvzdorné
- Žárupevné

Dle chemického složení:

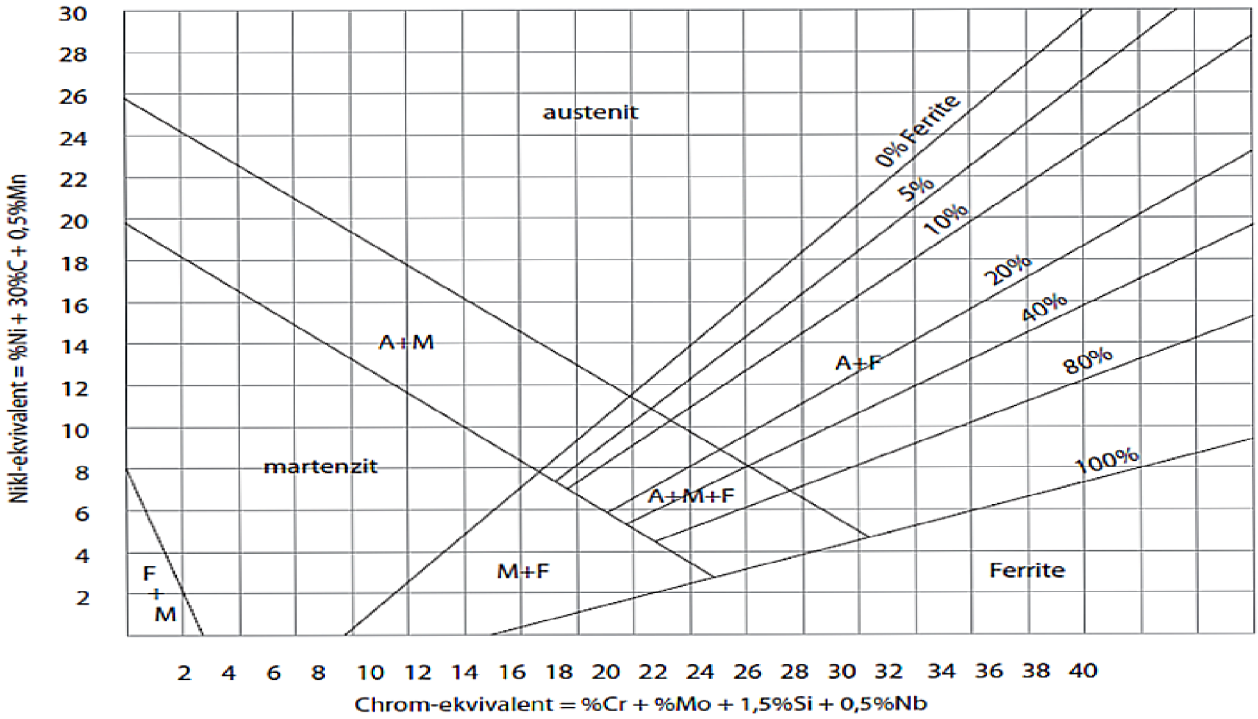
- Vysoce legované
- Chrom-niklové
- Chrom-manganové
- Vytvrditelné

Obsahem a množstvím přísadových prvků lze rozšířit, vyloučit nebo zúžit austenitickou oblast v oceli. Korozivzdorné oceli lze dále zpevňovat martenzitickou transformací nebo precipitací sekundární fáze v nízkouhlíkovém martenzitu. Některé se ale takto zpevňovat nedají - feritické oceli nelze transformovat do austenitické oblasti a austenit v austenitických ocelích je stabilní hluboko pod normálními teplotami. Nejdůležitějšími legujícími prvky jsou:

- austenitotvorné: C, Ni, Cu, Mn, N

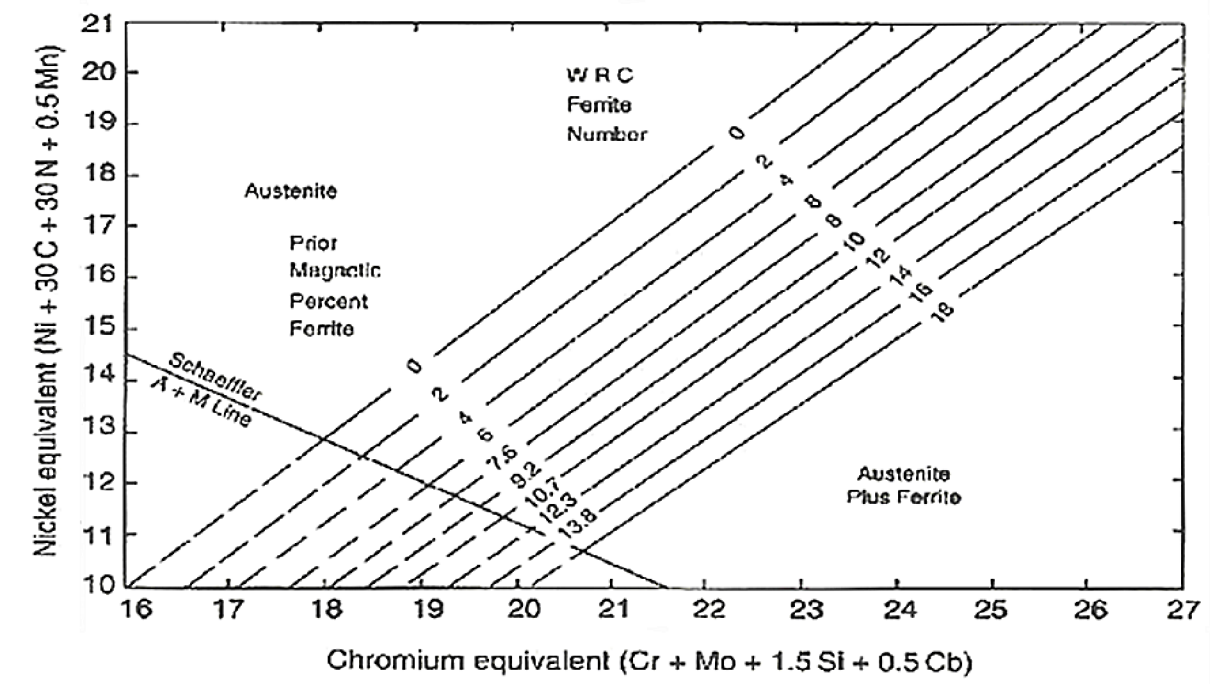
- feritotvorné: Cr, Mo, Si, Al, W, Ti, Nb, V

Pro určení výsledných struktur korozivzdorné oceli slouží Schaefflerův diagram, který je založen na porovnávání chromového a niklového ekvivalentu – poměrného, obsahového zastoupení prvků v materiálu.



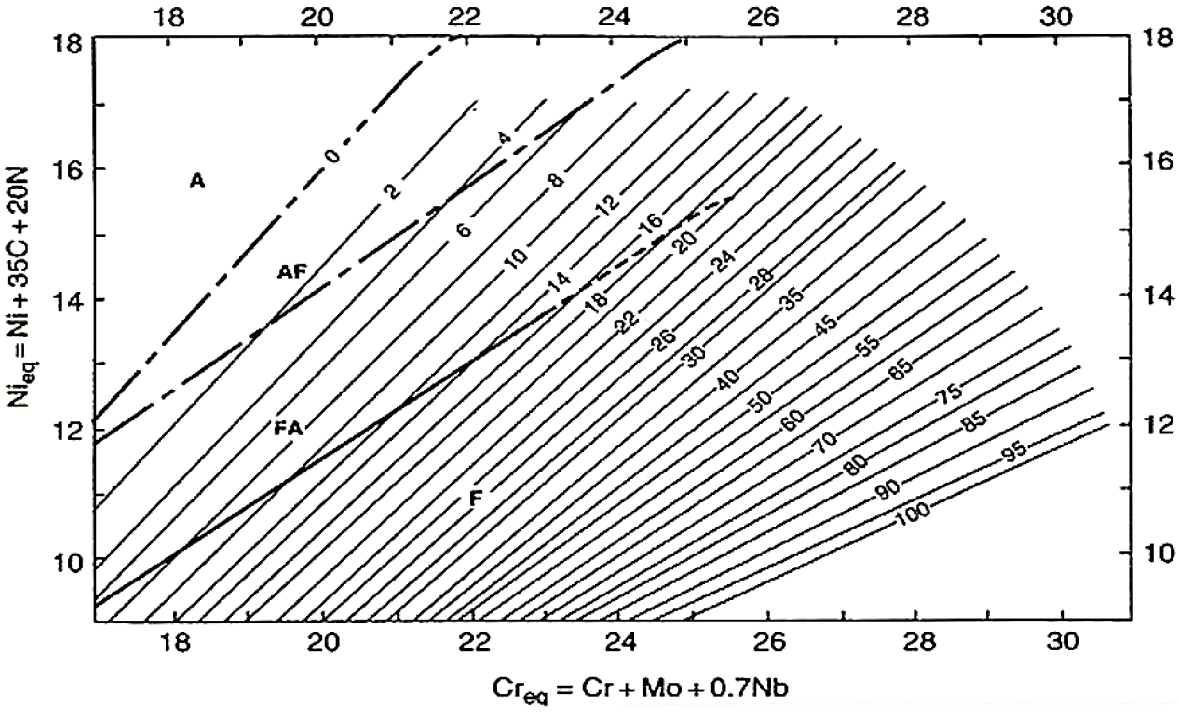
Obr. 7 Schaefflerův diagram [26]

Rozšířením Schaefflerova diagramu je De Longův diagram, ve kterém je zařazenu dusík jako významný austenitotvorný prvek. Lze jej tedy použít pro austenitické chromniklové oceli legované dusíkem.



Obr. 8 De Longův diagram [27]

Dalším rozšířením je WRC diagram, který se používá pro odhad mikrostruktury u Cr-Ni ocelí s vyšším podílem feritu, zejména u tzv. austenitických duplexních ocelí.



Obr. 9 WRC diagram [28]

2.2 Hlavní legující prvky korozivzdorných ocelí [11], [12], [21], [23], [24], [25]

- **Chrom**

Chrom je základní a nejvýznamnější legující prvek korozivzdorných ocelí podporující feritickou strukturu. S jeho rostoucím obsahem roste i korozní odolnost v oxidačních prostředích. Pro vytvoření souvislé pasivační vrstvy na povrchu je nutné ocel legovat minimálně 11,7 hm.%. Při takovém legování dochází k tvorbě tenké vrstvy, která je odolná pouze v suchých atmosférických podmínkách. Pro zvýšení korozní odolnosti pasivní vrstvy se ocel leguje 18 hm.% chromu, pro extrémní odolnosti do extrémních podmínek lze ocel legovat až k 30 hm%. Při legování obsahu chrómu nad 20 hm.% dochází k negativnímu ovlivnění některých vlastností jako je např. svařitelnost, houževnatost nebo obrobitelnost a může vést k vytvoření velmi tvrdé a křehké sigma fáze. Pro zvýšení korozní odolnosti ocelí s 18 hm.% chromu se ocel dále leguje doplňujícími prvky zlepšující korozní odolnost – molybden, nikl, měď.

- **Nikl**

Nikl je austenitotvorný prvek, stěžejní hlavně v austenitických a duplexních ocelích. Pro austenitické korozivzdorné oceli se používá optimální obsah přibližně 8 - 12 hm.%, v duplexních přibližně 6 hm.%. Pro speciální použití lze ocel legovat až 30 hm.%. Zvyšuje korozní odolnost proti minerálním kyselinám a zlepšuje repasivační schopnost v redukčním prostředí, zvyšuje pevnost při nízkých ztrátách houževnatosti, neovlivňuje svařitelnost.

- **Uhlík**

Uhlík bývá obecně v korozivzdorných ocelích obsažen do 0,2 hm.%, výjimku tvoří martenzitické oceli, ve kterých se obsah uhlíku pohybuje v rozsahu 0,2 – 1,2 hm.%. S menším obsahem uhlíku obsaženém v ocelích klesá i pevnost, zvyšuje se svařitelnost, tažnost a řezná obrobitelnost. Z hlediska korozní odolnosti je nízký obsah uhlíku zásadní z důvodu vysoké afinity k prvkům zodpovědným za tvorbu pasivního filmu na povrchu – hlavně chrómu a molybdenu, se kterými uhlík tvoří tvrdé karbidy, které nemohou reagovat s kyslíkem, a tím vyčerpává pasivační potenciál těchto prvků.

- **Molybden**

Molybden přispívá k vytvoření pasivního filmu na povrchu korozivzdorných ocelí. Je feritotvorný prvek, a proto austenitické oceli legované molybdenem mají zvýšený obsah niklu pro udržení austenitické struktury. Zvyšuje odolnost proti transkrystalické korozi a bodové korozi v přítomnosti chloridů. Příznivě se projevuje na svařitelnosti.

- **Dusík**

Dusík je v austenitických a duplexních ocelích prospěšný díky zvyšování odolnosti vůči bodové korozi a potlačování vzniku chrom-molybdenové sigma fáze, má zpevňující účinek za pokojových teplot. U feritických korozivzdorných ocelí je nežádoucí z hlediska mechanických vlastností.

- **Mangan**

Mangan do obsahu 2 hm.% poskytuje podobné vlastnosti jako nikl, při vyšším obsahu zvyšuje v austenitických ocelí pevnost při tváření za studena ale ztrácí podobné vlastnosti niklu.

- **Titan, niob, tantal**

Titan, niob a tantal se přidávají do korozivzdorných ocelí díky jejich vysoké afinitě k uhlíku, která je vyšší než má chróm. Přednostně tedy vytváří karbidy uhlíku a nedochází k ochuzení hranic zrn o chrom (stabilizace oceli). Titan má pozitivní vliv na pevnost svárů po sváření bez následujícího tepelného zpracování.

- **Bór**

Bór přisazovaný v malých množstvích zlepšuje tvářitelnost a zvyšuje žárupevnost. Při vyšších koncentracích se tvářitelnost snižuje a vyvolává sklon k praskavosti svarů. Korozivzdorné oceli s obsahem 0,75 – 2 hm. % se používají pro stavbu kompaktních skladů, které slouží pro umístění vyhořelých článků bezprostředně vyjmutých z atomových reaktorů.

- **Hliník**

Hliník zvyšuje žáruvzdornost a s niklem tvoří intermediální fáze, používané k precipitačnímu vytvrzení.

- **Měď**

Měď je slabě austenitotvorný prvek, zvyšuje korozní odolnost v prostředí kyseliny sírové, zlepšuje obrobitelnost, používá se k legování vytvrditelných ocelí.

- **Síra, selen, fosfor, olovo**

Zvyšují obrobitelnost, ale snižují korozní odolnost.

2.3 Značení korozivzdorných ocelí [4], [12], [24], [29]

- **Značení dle ČSN 42 0002: 1976**

Původní a stále používané označování dle ČSN zařazuje tvářené korozivzdorné oceli do konstrukčních oceli třídy 17, značení se skládá z 6 číslic:

41 7XYZ, kde:

4 označuje hutní materiál

1 značí tvářenou ocel

7 značí korozivzdornou ocel

X definuje hlavní legující prvky

– 0 značí legování chromem

– 2 legování chromem a niklem

– 3 legování chromem niklem a molybdenem

Obvykle se první číslice vynechává a ocel je zapsána např. ve tvaru 17 240. Dále se využívá označování tří barev, z nichž první je pro korozivzdorné oceli vždy červená.

- **Značení dle EN 10 027-1**

Další značení je podle EN 10 027-1 (třídící znak 42 0011), kdy se značí pomocí písmen a číslic v obecném tvaru:

X MMM AAA N-N, kde:

X značí korozivzdornou ocel,

NNN značí 100x zvětšený střední obsah uhlíku,

AAA označuje značky legujících prvků podle sestupného obsahu,

N-N střední obsah legujících prvků podle pořadí aaa.

Příklady označení: X5CrNi18-10, X2CrNiMoCuN25-6-3

- **Značení dle EN 10 027-2**

Při značení dle EN 10 027-2 (třídící znak 42 0012) se požívá číselné označení podle schématu:

1.4XYZ, kde

1 označuje, že se jedná o ocel,

4 označuje korozivzdornou ocel. Další číslo

X obsahuje následující informace:

0 – chromové oceli s obsahem niklu max. 2,5% bez molybdenu niobem nebo titanem

1 – chromové oceli s obsahem niklu do 2,5% s molybdenem bez niobu nebo titanu

3 – chromové oceli s 2,5% niklu a více bez molybdenu, niobu nebo titanu

4 – chromové oceli s 2,5% niklu a více s molybdenem, bez niobu nebo titanu

5 – oceli chromniklové nebo chromniklmolybdenové se zvláštními přísadami (měď, titan, niob,…). Čísla 7 a 8 se používají pro oceli žáruvzdorné, číslo 9 pro žárupevné. Poslední dvě číslice specifikují ocel.

Y,Z dále specifikují ocel

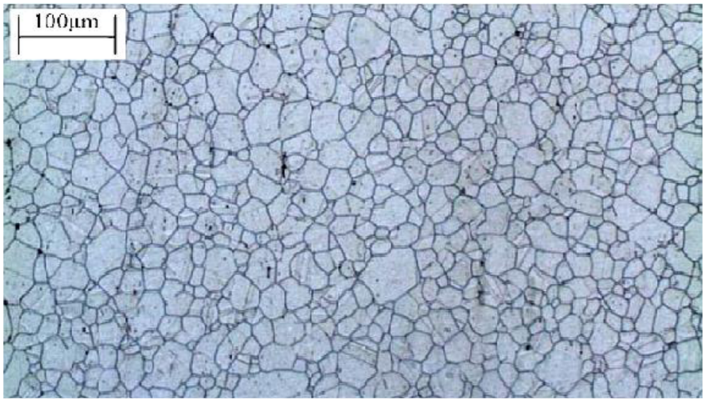
Tab. 1 Příklady značení korozivzdorných ocelí a jejich chemické složení [29]

Označení EN 10 027-1	X5CrNi18-10	X2CrNiMo17-12-2	X2CrNiMoN22-5-3
Označení EN 10 027-2	1.4301	1.4404	1.4462
Označení ČSN	17 240	17 349	-
C [%]	max. 0,07	max. 0,03	max. 0,03
Cr [%]	17,0 - 19,5	16,5 - 18,5	21,0 - 23,0
Ni [%]	8,0-10,5	10,0-13,0	4,5 - 6,5
Mo [%]		2,0-2,5	2,5 - 3,5
N [%]	max. 0,11	max. 0,11	0,11 - 0,22
Si [%]	max. 1,0	max. 1,0	max. 1,0
P [%]	max. 0,045	max. 0,045	max. 0,035

2.4 Vlastnosti korozivzdorných ocelí [11], [12], [21], [23], [24], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35]

- **Austenitické korozivzdorné oceli**

Dosahují austenitické struktury za normálních teplot, jsou nejrozšířenějším druhem korozivzdorných ocelí a uplatňují se v chemickém potravinářském, farmaceutickém, energetickém průmyslu a v neposlední řadě i ve stavebnictví díky široké nabídce sortimentu hutního materiálu. Disponují velkou korozní odolností, dobrou svařitelností a vzhledem k austenitické struktuře jsou parametry tažnosti a houževnatosti lepší než v uhlíkových a nízkolegovaných ocelích. Nevýhodou je nižší mez kluzu 175 – 250 MPa při tažnosti 40 – 50 % a horší obrobitelnost. Zvýšení pevnostních hodnot se provádí především legováním dusíkem (0,03 %) a manganem. Tato úprava ale může vést ke snížení korozní odolnosti. Jinou možností zvyšování pevnosti je pomocí deformačního zpevnění za studena, kdy se austenit částečně transformuje na deformační martenzit. Při deformačním zpevnění není korozní odolnost výrazně ovlivněna.



Obr. 10 Austenitická struktura v oceli 1.4372 [30]

Pro zlepšení obrobitelnosti se používá legování sírou, selenem a olovem, přičemž dochází k zhoršení korozní odolnosti. V optimálním chemickém složení a stavu, který se dosáhne rozpouštěcím žíháním a následujícím rychlým ochlazením ve vodě nebo na vzduchu (podle tloušťky stěny materiálu), jsou nemagnetické. Přísady dusíku, manganu, niklu, austenitotvorných a feritotvorných prvků ve vhodně zvoleném množství umožňuje udržet austenitickou strukturu i za záporných teplot. Základním typem austenitické korozivzdorné oceli jsou typy tzv. 18-9, tedy 18 % chromu a 9 % niklu s obsahem uhlíku cca 0,08%. Celkovou korozní odolnost lze zlepšit zvýšením chromu a niklu, legováním molybdenem, mědí a křemíkem. Proti mezikrystalové korozi se používá stabilizace oceli – legování titanem nebo niobem. V ELC ocelích (Extra Low Carbon) s obsahem uhlíku pod 0,03 % je zaručena homogenní austenitická Cr-Ni struktura a dobrá svařitelnost bez nebezpečí vzniku mezikrystalové a nožové koroze svarových spojů. Volba těchto ocelí je prováděna na základě konkrétního prostředí a pravděpodobnosti vzniku různých druhů korozního napadení. Austenitické korozivzdorné oceli nejsou odolné proti koroznímu praskání za napětí, výjimku tvoří vysokolegované superaustenitické oceli s nejvyššími obsahy niklu.

- <u>Chromnikolvé oceli (CrNi)</u> se vyrábějí jako nestabilizované nebo stabilizované titanem či niobem. Obsahují nejčastěji 18 – 20 % chromu a 8 – 11 % niklu. Nestabilizované oceli s obsahem uhlíku nad 0,03 % nejsou vhodné ke svařování, stabilizované lze svařovat i s vyšším obsahem uhlíku než 0,03 %. Oceli s nízkým obsahem uhlíku bývají často legovány dusíkem pro zvýšení pevnostních hodnot. Dále austenitické Cr-Ni oceli s obsahem uhlíku nad 0,03 % je nutné podrobit rozpouštěcímu žíhání při teplotě přibližně 1050 °C s rychlým ochlazením ve vodě, kdy se potlačí precitipace karbidů a získá se austenitická struktura i s obsahem uhlíku 0,1 %. Chromniklové austenitické oceli jsou velmi rozšířené díky uplatnění v potravinářském průmyslu, kde splňují hygienické předpisy.

- Chromniklmolybdenové oceli (CrNiMo) se legují molybdenem se středním obsahem 2,25 %, 2,75 %, 3,5 % a více s obsahy uhlíku 0,03 – 0,07 % a 0,1 %. Oceli s nízkým obsahem uhlíku bývají často legovány dusíkem pro zvýšení pevnostních hodnot. Přísada molybdenu zvyšuje odolnost proti bodové a štěrbinové korozi, čím vyšší je koncentrace molybdenu, tím vyšší je zmíněná korozní odolnost. Dále je zvýšena korozní odolnost proti rovnoměrné korozi v prostředí neoxidujících minerálních kyselin. Chromniklmolybdenové oceli se používají tam, kde jsou chromniklové oceli nedostatečně odolné proti korozi, využívají se např. v prostředí s halogenidy, mořskou vodou a dalších speciálních aplikacích v agresivních prostředích, ve kterých se používají speciální CrNiMo oceli s přesně chemickým vyváženým složením.

- Chrommanganové oceli se původně používaly místo CrNi ocelí kvůli úspoře niklu. Nyní se legují dusíkem a molybdenem. Obsahy uhlíku dosahují 0,02 – 0,08 % a dusíku 0,2 – 0,3 %, kdy je zajištěna stabilita austenitu s kombinací vysoké tažnosti, odolnosti proti opotřebení a korozní odolnosti. Oceli jsou bezpečně nemagnetické i po silném tváření za studena, uplatňují se v prostředích nízkých teplot, mají dobrou korozní odolnost v mnoha redukčních a oxidačních prostředích a jsou částečně odolné proti bodové a štěrbinové korozi. Používají se v kryogenních aplikacích, automobilovém průmyslu, jako chemická a potravinářská zařízení, v těžařském průmyslu pro těžbu ropy a plynů, pro prostředí s mořskou vodou a přístrojovou techniku, která musí být zcela nemagnetická s odolností ve vysoce agresivním prostředí.

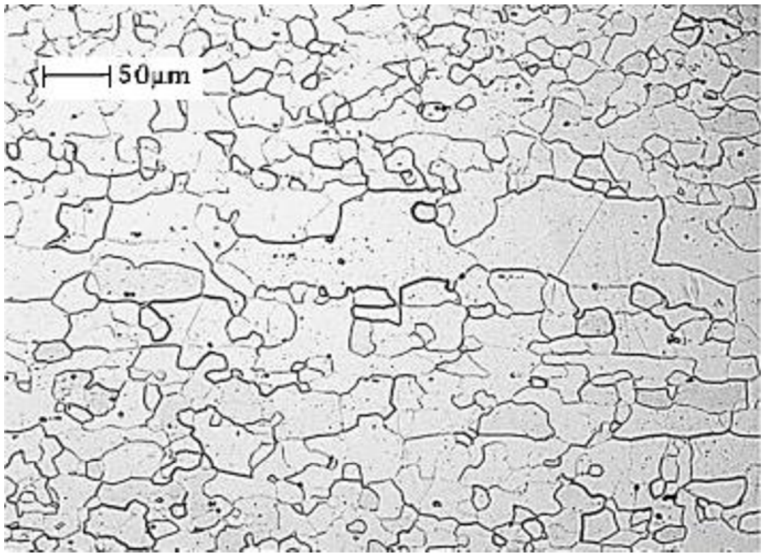
- Vysokolegované oceli se používají v aplikacích se zvýšeou korozní odolností proti různým typům koroze, někdy zaměřené i na jeden jediný typ koroze. Vysoké korozní odolnosti se dosahuje zvýšením koncentrace chromu na 19 – 23 %, niklu až 30 %, molybdenu do 7 % a přísadou mědi s velmi nízkým obsahem uhlíku a přítomností dusíku, který zvyšuje pevnostní charakteristky a stabilizuje austenit. Mají vysokou odolnost vůči mezikrystalové a celkové korozi jak v základním materiálu, tak i ve svarech. Vyšší obsahy molybdenu zaručují vyšší odolnost vůči štěrbinové a bodové korozi. Využívají se v potravinářském a farmaceutickém průmyslu, kde je požadována vysoká čistota produktu, v petrochemickém a energetickém průmyslu. Při zvýšení obsahu niklu nad 30 % vznikají tzv. superaustenitické oceli, které mají dobrou korozní odolnost proti většině typů koroze a při nejvyšším obsahu niklu (až 42 %) odolávají koroznímu praskání za napětí.

Tab. 2 Mechanické vlastnosti vybraných austenitických ocelí [29]

EN 10 027-2	EN 10 027-1	R_m [MPa]	$Rp_{0,2}$ [MPa]	A [%]	HB
1.4301	X5CrNi18-10	500 - 750	195	35 - 45	215
1.4305	X8CrNiS18-9	500 - 700	190	35	230
1.4307	X2CrNi18-9	450 - 700	180	35 - 45	215
1.4401	X5CrNiMo17-12-2	510 - 710	205	35 - 45	215
1.4541	X6CrNiTi18-10	500 - 720	190 - 225	30 - 40	215
1.4571	X6CrNiMoTi17-12-2	500 - 700	200 - 240	30 - 40	215
1.4652	X1CrNiMoCuN24-22-8	750 - 1000	430	40	310

- **Feritické korozivzdorné oceli**

Obsahují do 30 % chromu a 0,08 % uhlíku, při tuhnutí se z taveniny vylučuje chromový ferit. Rozpustnost uhlíku v chromovém feritu je velmi nízká (nižší než 0,01 %) a uhlík se při vyšších koncentracích vylučuje ve formě karbidů, které mohou způsobit křehnutí oceli. Použití feritických ocelí je zajímavé vzhledem k jejich odolnosti vůči koroznímu praskání, nejsou kalitelné a jejich pevnost je vyšší než u nelegované uhlíkové oceli.



Obr. 11 Feritická struktura v oceli 1.4512 [31]

Nevýhodou je křehnutí za vysokých teplot (900 °C). V rozmezí 350 – 550°C, kdy maxima křehnutí nabývá při 475 °C, má praktický význam zejména při svařování těchto ocelí. Výjimku křehnutí za výše uvedených teplot jsou oceli s velmi nízkým obsahem uhlíku a obsahem chromu 24 – 30 %, kdy je výrazně potlačeno. Feritické oceli s vyšším obsahem uhlíku se používají jako žáruvzdorné a jsou při pokojové teplotě křehké. Obsah fosforu u feritických ocelí je omezen na 0,040% a síry na 0,015 %, pro zlepšenou obrobitelnost se koncentrace síry zvyšuje až na 0,35%. Feritické oceli s nízkým obsahem uhlíku a dusíku jsou levnější než austenitické a v řadě aplikacích je nahrazují.

- <u>13 % chromové feritické oceli</u> obsahují 11,5 – 13,5 % chromu a obsah uhlíku je pod 0,08 %, mají dobrou korozní odolnost v atmosféře, vodní páře, přírodních vodách, zředěné kyselině dusičné a slabých organických kyselinách. Nejvyšší korozní odolnost je dosažena při kvalitním povrchu, tvářitelnost a svařitelnost je podmíněná. Používají se v chemickém průmyslu (ventily, výměníkové trubky při zpracování ropy, trubky čerpadel, nádrže), lze je použít i v potravinářském průmyslu. Nedoporučují se pro aplikace použití nad 320 °C.

- <u>17 % chromové feritické oceli</u> obsahují chrom v rozmezí 16 – 18 %, obsah uhlíku je pod 0,08% a mohou být legovány molybdenem a stabilizovány titanem. Navíc od 13% chromových feritických ocelí jsou korozně odolné vůči znečištěné atmosféře, mořské vodě, benzínu, pracím prostředkům, chladícím kapalinám bez chloridů, akalickém prostředí a většině pracím prostředků, jsou odolné vůči bodové korozi a koroznímu praskání a to i v mírně kyselích roztocích. Využívají se v potravinářském, automobilovém průmyslu a v architektuře. Při vyšším obsahu uhlíku a po ohřevu nad 900 °C může dojít k částečné austenitické přeměně a struktura po tepelném zpracování je smíšená. Tyto oceli se označují jako poloferitické.

- <u>25 % chromové feritické</u> oceli jsou oproti 17 a 13 % chromovými feritickými ocelemi korozně odolnější, ale mají zvýšenou náchylnost ke křehnutí. Jejich hlavní význam s obsahy uhlíku 0,1 – 0,2 % je použití jako žáruvzdorné oceli.

- Superferity obsahují 18 – 29 % chromu a velmi nízký obsah uhlíku a dusíku, jejichž součet dosahuje 0,015 – 0,025 % a obvykle jsou stabilizovány titanem nebo niobem. Mají čistě feritickou strukturu s velmi nízkým obsahem intersticiálních prvků (C,N). Oceli mají dobrou tvářitelnost, svařitelnost, vyšší pevnostní hodnoty, dobrou tažnost a vrubovou houževnatost. Oproti ostatním feritickým ocelím je zlepšená odolnost proti rovnoměrné a mezikrystalové korozi, vysoká odolnost proti koroznímu praskání za napětí, bodové a štěrbinové korozi. Jejich použití je nahrazováno duplexními ocelemi.

- **Martenzitické korozivzdorné oceli**

Obsahují do 18 % chromu a uhlíku do 0,15 % (některé až 0,25 %), jejich korozní odolnost ve srovnání s austenitickými a feritickými ocelemi je nejniží, ale na druhou stranu vykazují nejvyšší tvrdosti, pevnosti a meze kluzu. Nejlepší korozní odolnosti se dosahuje mořením nebo kvalitním leštěním povrchu oceli. Korozní odolnost je zajištěna po zakalení, oceli s vyšším obsahem uhlíku se doporučují kalit nadvakrát. Po kalení se doporučuje ocel popustit pro snížení vnitřního pnutí. Nebezpečí používání martenzitických ocelí je křehnutí způsobené vodíkem po tepelném zpracování v určitých atmosférách nebo po ohřevu na teplotu 350 – 550 °C. Svařitelnost je velmi omezená, je nutné používat předehřevy a po svaření další tepelné zpracování.

Obr. 12 Martenzitická struktura v oceli 1.4545 [32]

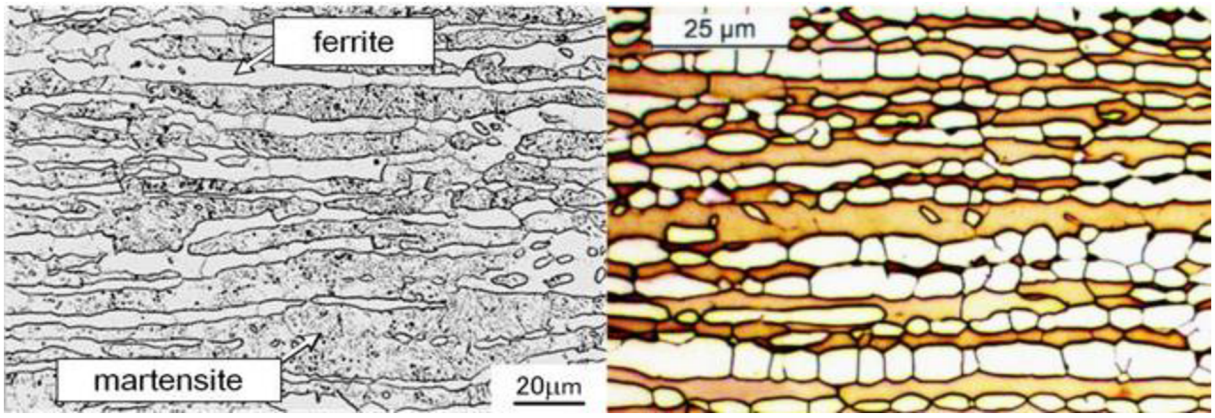
- Martenzitické oceli bez niklu obsaující 0,15 % uhlíku a 13 % chromu se používají v přírodních podmínkách (atmosféra, voda, pára), při zvýšeném obsahu uhlíku na 0,2 % se používají jako lopatky parních turbín, v chemickém a energetickém průmyslu. Oceli s obsahem uhlíku 0,3 – 0,4% se používají na výrobu chirurgických nástrojů, nožů a v aplikacích pro vyšší nároky na otěruvzdornost. Dalším zvyšováním obsahu chromu a uhlíku se zlepšuje korozní odolnost a otěruvzdornost. Oceli s obsahem uhlíku nad 0,2% nejsou svařitelné.

- Martenzitické chromové oceli s niklem mají oproti martentitickým ocelím bez niklu vyšší pevnost, lepší plastické vlastnosti a podmíněnou svařitelnost díky sekundárnímu asutenitu v mikrostruktuře a přísadou niklu. Obsahují přibližně 17 % chromu, 2 – 7,8 % niklu a 0,2 % uhlíku. Používají se na lopatky parních turbín a dalších zařízení přicházející do styku s vodou. Při legování molybdenem jsou odolné i v prostředí mořské vody.

- Supermartenzitické oceli mají velmi nízké obsahy uhlíku – pod 0,015 %, dále 11 - 13 % chromu, 5,5 - 6,5 % niklu a 2 - 2,25 % molybdenu s velmi nízkým obsahem síry. Mají vysokou pevnost, zlepšenou houževnatost a jsou dobře svařitelné. Používají se pro potrubí při těžbě a dopravě agresivních plynů.

- **Duplexní korozivzdorné oceli**

Duplexní oceli mají dvoufázovou strukturu, díky níž kombinují výhody obou struktur. Mezi nejpoužívanější patří oceli s austeniticko-feritickou struturou. Dále se používají martenziticko-feritické a martenziticko-austenitické. Vyhovují vyšším nárokům na korozní odolnost s dlouhodobu spolehlivostí a maximální bezpečností.



Obr. 13 Vlevo martenziticko-feritická struktura, vpravo austeniticko-feritická struktura (světle austenit, tmavě ferit) v duplexních ocelích [33] [34]

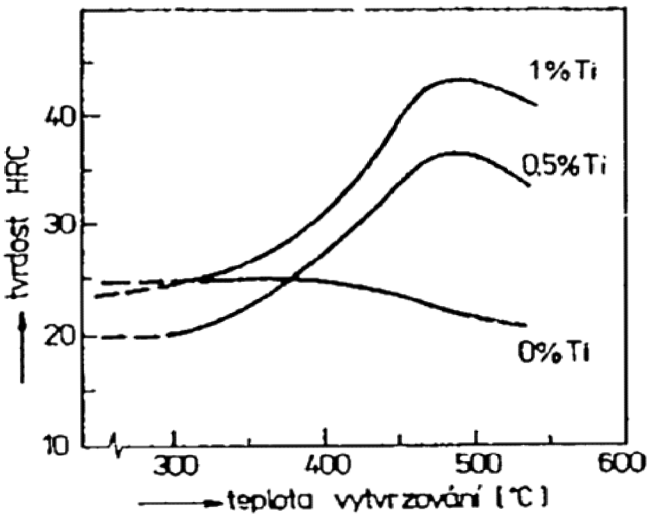
- Austeniticko-feritické oceli obsahují 21 – 28 % chromu a 3,5 – 8 % niklu při velmi nízkém obsahu uhlíku (do 0,07 %, většinou cca 0,02 %) s řadou dalších legujících prvků, obsah křemíku je omezen do 1 %, fosforu do 0,035 % a síry do 0,015 %. Podíl feritické struktury se pohybuje od 40 do 60%. Mají vyšší mez kluzu než austenitické oceli, jsou lépe obrobitelné za zachování dobré tažnosti. Po rozpouštěcím žíhání a rychlém ochlazení se dosahuje meze kluzu 420 – 530 MPa. Oceli jsou dobře svařitelné, mají dobrou odolnost vůči mezikrystalové korozi a odolnost proti štěrbinové, bodové korozi, a proti koroznímu praskání je vyšší než austenitiké oceli. Používají se převážně v chemickém, petrochemickém a energetickém průmyslu a v oblasti, kde přicházejí do styku s mořskou vodou.
- Martenziticko-feritické oceli obsahují maximálně 0,04 % uhlíku, přibližně 13 % chromu, obsahy síry a fosforu jsou omezeny na 0,008 %, stabilizují se titanem nebo niobem a legují manganem, který zvyšuje pevnostní hodnoty. Stablizace zjemňuje zrno a zlepšuje vrubovou houževnatost. Struktura obsahuje obvykle 20 % feritu. Používá se hlavně pro vodné roztoky obsahující oxid uhličitý a při těžbě zemního plynu. Mají dobrou tvářitelnost v širokém rozsahu teplot.
- Martenziticko-austenitické oceli obsahují přibližně 0,06 % uhlíku, 13 – 16 % chromu, 4 – 6 % niklu a jsou dále legovány molybdenem. Austenitická struktura je zastoupena přibližně z 25 %. Oceli mají dobrou svařitelnost, tažnost, odolnost proti křehkému lomu a kavitace. Používají se v chemickém průmyslu, na oběžná kola parních turbín a v parních elektrárnách.

Tab. 3 Mechanické vlastnosti vybraných duplexních ocelí [29]

EN 10 027-2	EN 10 027-1	Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	A [%]	HB
1.4477	X2CrNiMoN29-7-2	750 - 1050	550 - 650	20 -25	310
1.4462	X2CrNiMoN22-5-3	640 - 950	450 - 500	20 - 25	270
1.4410	X2CrNiMoN25-7-4	730 - 1000	530 - 550	15 - 25	290

- **Precipitačně vytvrditelné korozivzdorné oceli**

K přednostem precipitačně vytvrzovaných ocelí jsou dobré mechanické vlastnosti a korozní odolnost. Lepších mechanických vlastností se dosahuje zpevněním intermetalických fází – precipitáty molybdenu, mědi, hliníku, titanu, niobu a vanadu. Precipitační vytvrzování se provádí až na konci výrobního cyklu výrobku, jako tepelné zpracování za nízkých teplot (400 – 500 °C) a po obrobení. Využívají se především v leteckém, kosmickém průmyslu (tryskové motory) a pro vysoce namáhané součásti v petrochemickém průmyslu.



Obr. 14 Závislost obsahu titanu a teploty vytvrzování na tvrdost HRC v precipitačně vytvrditelných korozivzdorných ocelí [35]

3 SVAŘITELNOST KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ [11], [13], [19], [20], [26]

- **Martenzitické oceli**

Jsou při svařování náchylné na studené trhliny, a proto vyžadují použití předehřevu na cca 250 °C, kontrolu interpass teplot a aplikaci dohřevu. Po svaření následuje tepelné zpracování – žíhání pro snížení vnitřního pnutí pod teplotou Ac_1. Rychlost ohřívání na žíhací teploty se pohybují od 30 do 80°C/1h. Dále mají zvýšenou vrubovou houževnatost a je nutné se vyhnout ostrých vrubů, přechodů a neprůvarů. Při vyšším obsahu uhlíku se objevuje náchylnost k tvorbě žíhacích trhlin. V těchto případech je nutné věnovat zvýšenou pozornost rychlosti ohřevu při žíhání svarových spojů. U silnějších a členitějších svařenců je nutné provést tepelné zpracování ihned po svaření, pokud to není možné, udržují se na mezioperační teplotě (180 – 240°C) až do žíhání. Jako přídavné materiály se používají materiály podobného chemického složení jako základní materiál, popřípadě niklové slitiny. Jako metody svařování se používají 111, 141, 121, 131, 136.

- **Feritické oceli**

Základní problematiku svařitelnosti feritických ocelí lze rozdělit na dvě skupiny – s obsahem uhlíku cca 0,08% a na skupinu s velmi nízkým obsahem intersticiálních prvků, především uhlíku a dusíku ($\sum C + N \leq 0{,}04$ hm. %). V první skupině je riziko vzniku austenitu, který se dále transformuje na martenzit, proto se používá předehřev. Teploty předehřevu se stanovují experimentálně ze zkoušek praskavosti. V druhé zmíněné skupině feritických ocelí není nebezpečí vzniku austenitu. V pásmu přehřátí TOO při teplotách nad 900 °C dochází k zhrubnutí zrna, které má za následek zkřehnutí pásma a nelze jej odstranit tepelným zpracováním. Aby nedocházelo k hrubnutí zrna, oceli se svařují s limitovaným příkonem svařovacího procesu – nízké parametry svařovacího napětí a proudu, malý průměr přídavného materiálu. Svařence jsou dále náchylné na zkřehnutí 475 a vznik σ-fáze. Nedoporučuje se svařovat velké tloušťky klasických feritických ocelí (vyšší tepelné příkony). Další problém je možnost vzniku interkrystalické koroze (MKK). Klade se důraz na čistotu prostředí při svařování a ochranu svarového kovu. Jako přídavné materiály se používají materiály s podobným chemickým složením základního materiálu, přídavné materiály dolegované 4 hm. % Ni, a nebo slitiny niklu. Metody svařování: 111, 131, 135, 141.

- **Austenitické oceli**

Mají asi o 50% větší tepelnou roztažnost a o asi 30% nižší tepelnou vodivost než oceli feritické, což zapříčiňuje soustředění tepla ve svaru a vyšší napětí a deformaci při svařování. Svařitelnost je nejvíce ovlivněna třemi hlavními faktory, které jsou nežádoucí:

- <u>Náchylnost k tvorbě trhlin za horka</u>

  Příčinou vzniku trhlin za horka jsou prvky jako S, P, Si, Ti, Nb, které snižují plasticitu kovu při tuhnutí v mezidendritických prostorách, nebo vytvářejí se železem a niklem nízkotavitelná eutektika, výrazně snižující technologickou pevnost zrn. Obsahy titanu, niobu a křemíku jsou limitovány. Obsah síry lze snížit pomocí manganu (vznik MnS přecházejícího strusky). Vliv fosforu je možné snížit pomocí δ-feritu,

ve kterém se rozpouští. Pro stanovení optimálního obsahu δ-feritu v závislosti na chemickém složení se používají diagramy (Schaeffler, De Long, WRC).

- Precipitace karbidů chrómu, jejímž důsledkem je MKK

  Precipitace karbidů nastává v rozmezí 425 – 815 °C, které se vylučují na hranicích zrn a dochází ke ztrátě pasivační odolnosti proti korozi. K zamezení vyloučení karbidů se používají stabilizační prvky (Ti, Nb) nebo snížení obsahu uhlíku pod 0,03 hm. %. Lze využít i rozpouštěcího žíhání při teplotě 950 – 1000 °C a rychlého ochlazení.

- Zkřehnutí vznikem σ-fáze

  σ-fáze se vylučuje při vysokém obsahu chrómu v rozmezí 500 – 800 °C, je tvrdá, křehká intermetalická sloučenina. Její vznik podporuje více faktorů, nejčastěji feritotvorné (Si, Al, Ti, Mo, Nb) a karbidotvorné (Ti, Zr, Nb, Ta) prvky, heterogenita složení, zvýšený obsah δ-feritu a další.

Při svařování austenitických korozivzdorných ocelí lze použít téměř všechny technologie svařování. Svařují se bez předehřevu s dokonalou ochranou svarových ploch včetně kořenových částí. Teplota interpass by neměla být vyšší než 150 °C. Jako přídavné materiály se používají materiály podobného složení základního materiálu s vysokou metalurgickou čistotou. Tepelné zpracování se používá zřídka, ale u ocelí stabilizovaných je tepelné zpracování doporučováno.

- **Duplexní oceli**

Svařují se obvykle bez předehřevu, u větších tlouštěk se doporučuje předehřev o teplotě 100 – 150 °C. Horní i spodní hranice tepelného příkonu svařování je omezena (pro stejné množství feritu jako v základním materiálu). Jako přídavné materiály se používají materiály se stejným chemickým složením základního materiálu nebo se zvýšeným obsahem niklu, který zajistí stejný podíl austenitu a feritu ve struktuře. Důležitá je vysoká metalurgická čistota přídavného materiálu. Tepelné zpracování se obvykle neprovádí. Pro zvýšení korozní odolnosti lze aplikovat rozpouštěcí žíhání s rychlým ochlazením.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST [11], [19], [39], [40]

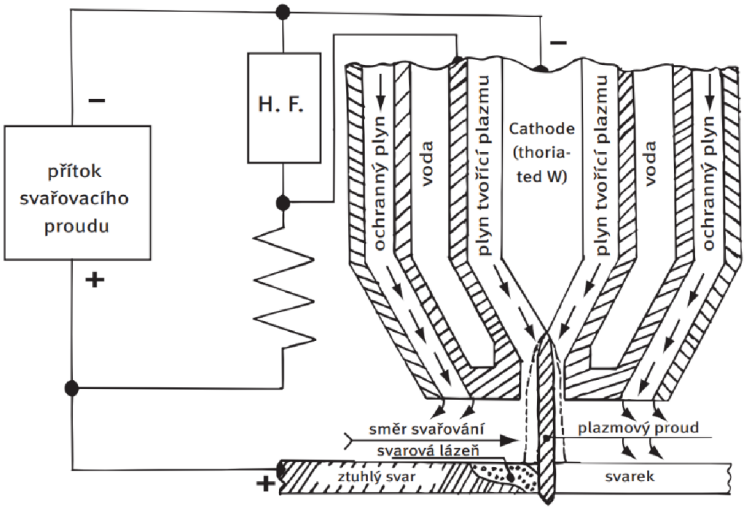
Experimentální část bakalářské práce se zabývá studiem svarů tenkostěnných trubek z korozivzdorné oceli, které se při výrobě svařují nejčastěji technologiemi LBW (laser beam welding), PAW (plasma arc welding) a HFIW (high frequency induction welding).

4.1 Metody svařování tenkostěnných trubek z korozivzdorné oceli

[11], [19], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42]

- **Plazmové svařování (PAW)**

Plazma je nazývána jako čtvrté skupenství hmoty. Je to vysoce ohřátý plyn složený z elektronů a iontů vznikající odtržením elektronů z elektronového obalu atomů plynu nebo roztržením molekul. Při plazmovém svařování je zdrojem plazmy plazmový plyn a elektrický oblouk, který hoří mezi wolframovou elektrodou s příměsí 2% thoria a svařencem (usměrněná plazma – přenesený oblouk) nebo vnitřku hořáku (neusměrněná plazma – nepřenesený oblouk) anebo mezi oběma. Svařování plazmou je podobné jako obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (GTAW), ale plazmový oblouk je díky usměrnění oblouku v trysce mnohem tenčí. Vystupující proud plazmy má vysokou plošnou hustotu energie a teplota v něm dosahuje 5000 – 30 000 K.



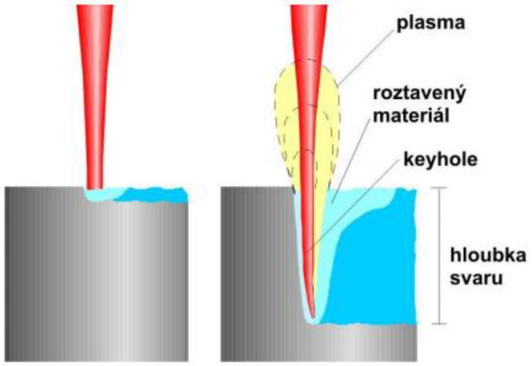
Obr. 15 Schéma plazmového svařování [11]

Jako plazmový plyn se používá čistý argon, helium nebo směs argonu a helia s průtokem 0,5 – 9 l/min. Svarová lázeň je chráněna ochranným plynem. Plyny používané k ochraně jsou obdobné jako u technologie GTAW, jedná se zejména o čistý argon, dále směs argonu s vodíkem až do výše 20% Ar-vodík a směs argonu a helia. Pro svařování austenitických korozivzdorných ocelí jsou doporučovány směsi obsahující vodík ale pro duplexní, feritické a martenzitické korozivzdorné oceli jsou zakázány. Směsi s přídavkem dusíku jsou doporučovány pro svařování duplexních korozivzdorných ocelí kvůli udržení podílu austenitu a feritu ve struktuře. Pro usměrnění plazmy lze použít fokusační plyn (směs argonu a dusíku nebo argonu a vodíku) s průtokem 4 – 7 l/min. Plazmové svařování lze dále dělit na mikroplazmové se svařovacím proudem 0,1 – 20 A, středněplazmové svařování se svařovacím proudem 20 – 100 A a svařování klíčovou dírkou se svařovacím proudem nad 100 A. Plazmové svařování se vyznačuje stabilním svařovacím procesem, malou TOO, malým převýšením svaru (nižší pracnost následného opracování svaru), vysokou kvalitu a vzhledem svaru, sníženou pracností přípravy svarových ploch.

- **Laserové svařování (LBW)**

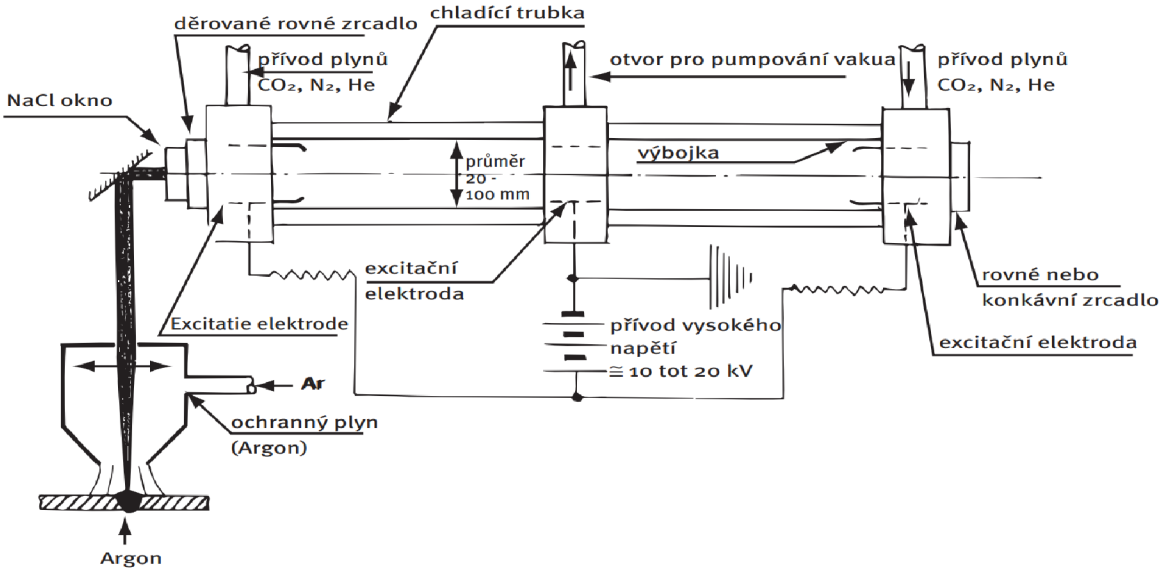
Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, tj. zesilování světla stimulovanou emisí záření) je optický zdroj elektromagnetického záření – světla, které je koherentní (s konstantním fázovým posuvem vlnové délky) a monochromatické (kmitající pouze na jedné frekvenci). Laser vzniká na principu absorpce energie elektrony aktivního prostředí a jejich excitací, následnou relaxací a vyzářením fotonů. Tyto fotony dále interagují s dalšími elektrony inverzní populace (excitované elektrony) a spouští se tzv. stimulovaná emise fotonů se stejnou frekvencí a fází. Díky umístění aktivního prostředí do rezonátoru dochází k opětovnému průchodu fotonů a tok fotonů se exponenciálně zvyšuje. Výsledný svazek opouští rezonátor přes polopropustné zrcadlo. Laserový svazek lze snadno usměrnit a při laserovém svařování dochází k rychlému lokálnímu ohřevu. Dle hustoty záření lze rozlišovat dva způsoby svařování – kondukční a penetrační režim. Lasery samotné lze rozdělit do několika skupin lišící se konstrukcí i vlastnostmi:

- Dle aktivního prostředí (plynové, pevnolátkové, polovodičové, kapalinové, plazmatické)
- Dle vlnových délek (viditelné pásmo, infračervené pásmo, UV, RTG)
- Dle typu buzení
- Dle režimu práce (pulzní, kontinuální)



Obr. 16 Vlevo kondukční režim, vpravo penetrační režim [41]

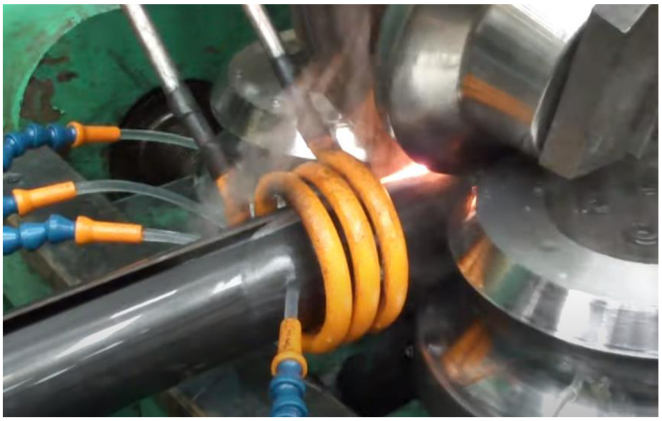
Pro svařování korozivzdorných ocelí se dnes nejčastěji používají vláknové lasery a pevnolátkové YAG lasery (yttrium-aluminium garnet). Pro tlustší plechy se používají vláknové a CO_2 lasery (1,5 – 6 mm) a pro plechy do 1,5 mm se upřednostňují YAG lasery v pulzním režimu. Mezi hlavní výhody laserového svařování patří úzký a hluboký svar širokého spektra materiálu, velmi krátký teplotní cyklus (omezení růstu zrna – svařování feritických korozivzdorných ocelí, konkrétně trubek), malá TOO, vysoká produktivita, kvalita svaru, povrchový vzhled a automatizace procesu. Kombinace LBW a dalších technologií svařování tvoří hybridní technologie (LAGMAW, LATIG, PALW).



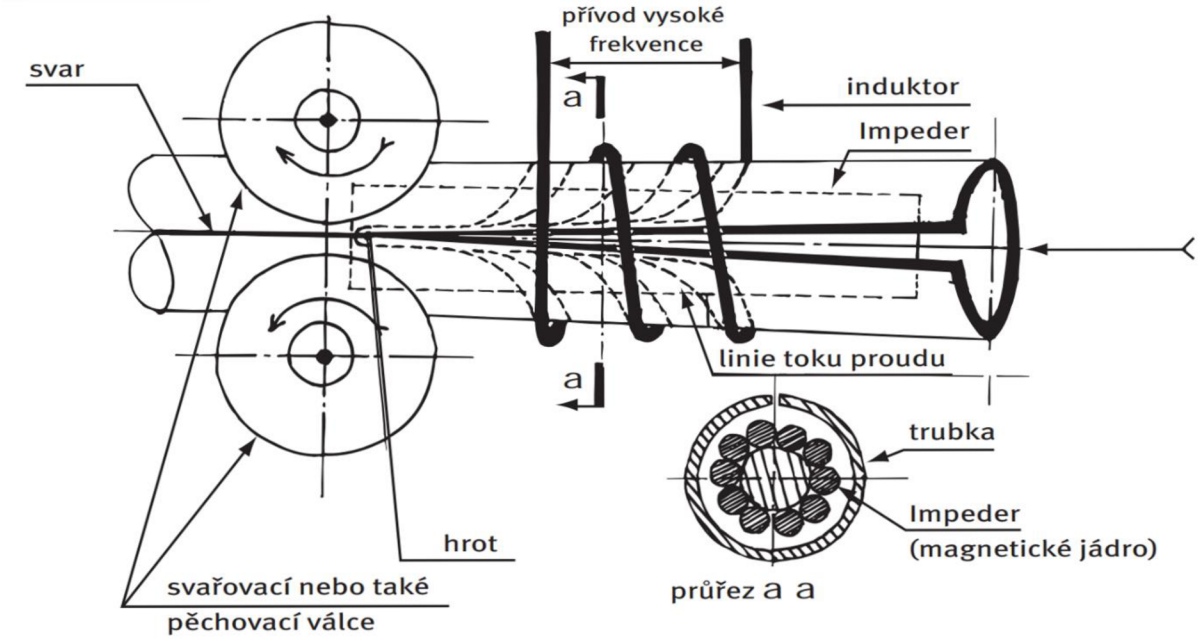
Obr. 17 Schéma CO_2 laseru [11]

- **Vysokofrekvenční indukční svařování (HFIW)**

Se převážně používá na svařování trubek ze svinutých plechů do válcového tvaru. Systém se skládá z pěchovacích válců, indukční cívky a impederu (magnetické jádro). Do místa svaru se dostává budoucí trubka s rozevřením svarového spoje do tvaru „V“ s úhlem 4 až 7°. Cívkou protéká vysokofrekvenční proud (140 – 500 kHz) a ohřívá vířivým proudem indukovaným ve svařovaném materiálu místo budoucího svaru, vsunutím mezi kladky vzniká kontinuální švový spoj, jehož kvalitu lze následně monitorovat on-line ultrazvukovým detektorem. Tuto metodu nelze použít u austenitických ocelí. Impeder i cívka jsou chlazeny vodou. Tato metoda je vysoce produktivní a lze se vyhnout růstu zrn při svařování feritických korozivzdorných ocelí. Při svařování korozivzdorných ocelí se používá svařovací výkon od 150 až do 350 kW a lze dosáhnout svařovací rychlosti až 90 m/min.



Obr. 18 HFIW svařování v praxi [42]



Obr. 19 Schéma HIFW svařování [11]

4.2 Materiál vzorků [3], [12], [19], [24], [26], [29], [36], [39]

Potrubí určené ke studiu jsou vyrobena z austenitické oceli 1.4301 (ČSN 17 240, AISI 304, X5CrNi 18-10), která je jedna z nejpoužívanějších korozivzdorných ocelí na trhu, má dobrou svařitelnost, tvářitelnost za studena a špatnou obrobitelnost. Používána je zejména v potravinářském, farmaceutickém a chemickém průmyslu (gastronomie, externí architektura, vodárny, čističky odpadních vod, masný, mlékárenský, pivovarnický průmysl, ve zdravotnictví, ozdobné prvky, zábradlí, fontány atp.). Chemické složení vyhovuje normě pro použití výrobků pro potraviny a pitnou vodu.

Tab. 4 Chemické složení oceli 1.4301 [29]

C [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mn [%]	Si [%]	S [%]	P [%]	N [%]
max 0,07	17,5 - 19,5	8 - 10,5	max 2	max 1	max 0,015	max 0,045	max 0,11

Určení mikrostruktury dle Schaefflera

$$Cr_E = Cr + Mo + 1{,}5 \cdot Si + 0{,}5 \cdot Nb \quad [\%] \quad (4.21)$$

$$Ni_E = Ni + 30 \cdot C + 0{,}5 \cdot Mn \quad [\%] \quad (4.22)$$

Určení mikrostruktury dle Hulla (nejpřesnější)

$$Cr_E = Cr + 1{,}21 \cdot Mo + 0{,}48 \cdot Si + 0{,}14 \cdot Nb + 2{,}27 \cdot V + 0{,}72 \cdot W + 2{,}20 \cdot Ti + 0{,}21 \cdot Ta + 2{,}48 \cdot Al \quad [\%] \quad (4.23)$$

$$Ni_E = Ni + 22 \cdot C + 0{,}31 \cdot Mn + 14{,}2 \cdot N + Cu \quad [\%] \quad (4.24)$$

Výpočet Cr_E a Ni_E dle vzorců (4.21), (4.22), (4.23) a (4.24) za obsahy prvků byly dosazeny hodnoty dle Tab. 3:

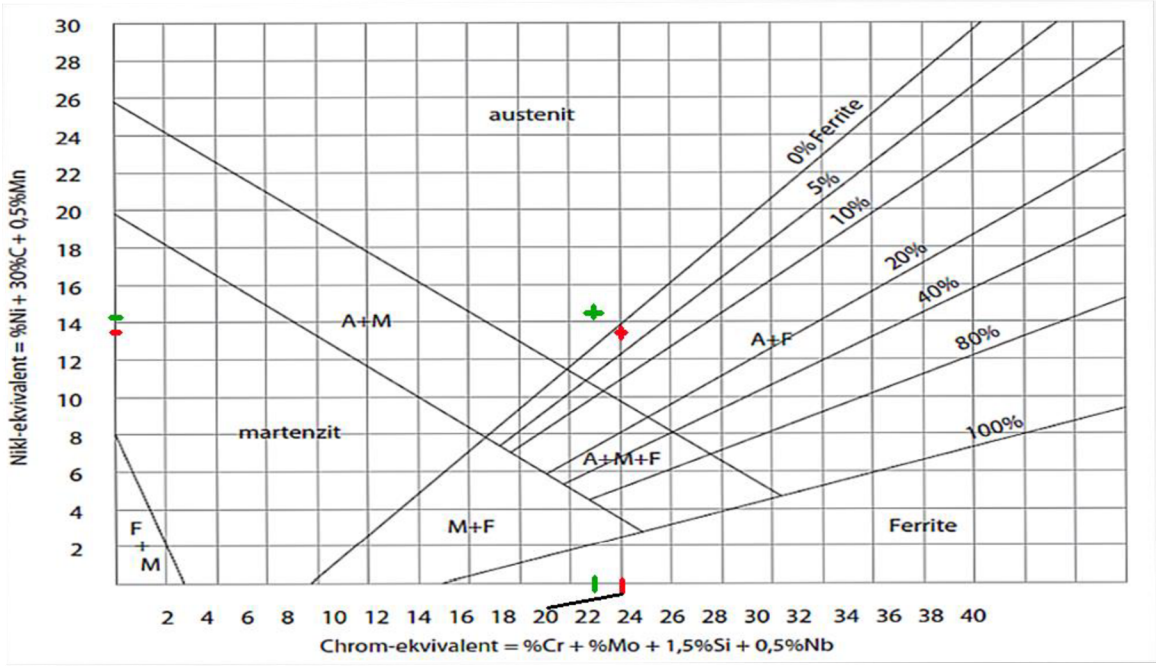
$$Cr_E = Cr + Mo + 1{,}5 \cdot Si + 0{,}5 \cdot Nb = 18{,}5 + 0 + 1{,}5 \cdot 1 + 0{,}5 \cdot 0 = 20\ \%$$

$$Ni_E = Ni + 30 \cdot C + 0{,}5 \cdot Mn = 10{,}5 + 30 \cdot 0{,}07 + 0{,}5 \cdot 2 = 13{,}6\ \%$$

$$Cr_E = Cr + 1{,}21 \cdot Mo + 0{,}48 \cdot Si + 0{,}14 \cdot Nb + 2{,}27 \cdot V + 0{,}72 \cdot W + 2{,}20 \cdot Ti + 0{,}21 \cdot Ta + 2{,}48 \cdot Al = 18{,}5 + 1{,}21 \cdot 0 + 0{,}48 \cdot 1 + 0{,}14 \cdot 0 + 2{,}27 \cdot 0 + 0{,}72 \cdot 0 + 2{,}20 \cdot 0 + 0{,}21 \cdot 0 + 2{,}48 \cdot 0 = 18{,}98\ \%$$

$$Ni_E = Ni + 22 \cdot C + 0{,}31 \cdot Mn + 14{,}2 \cdot N + Cu = 10{,}5 + 22 \cdot 0{,}07 + 0{,}31 \cdot 2 + 14{,}2 \cdot 0{,}11 + 0 = 14{,}22\ \%$$

Zaznamenání výsledků do Schaefflerova diagramu:

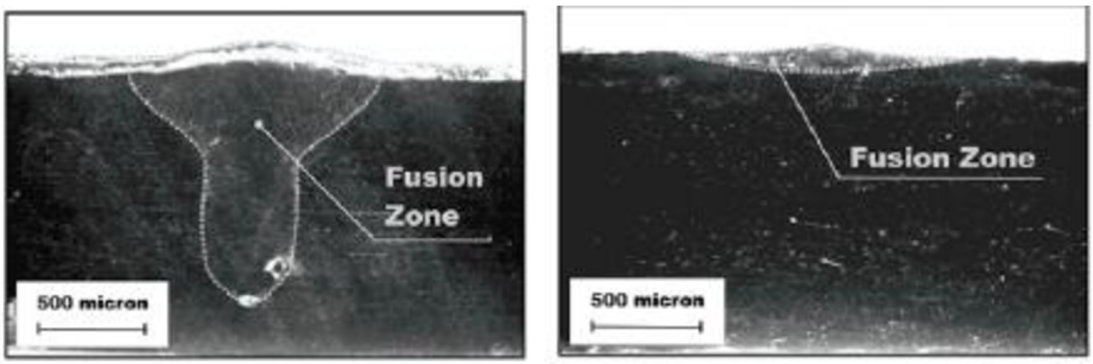


Obr. 20 Vynesené hodnoty Cr_E a Ni_E dle Schaefflera (červeně) a dle Hulla (zeleně) oceli 1.4301 v Schaefflerově diagramu [26]

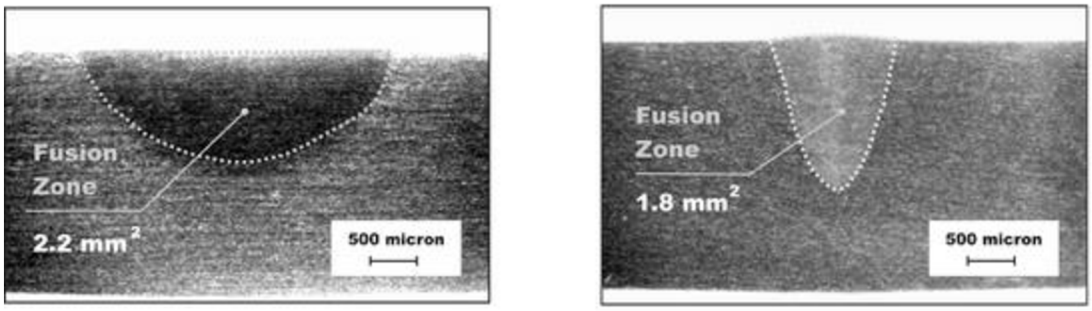
Po vynesení hodnot Cr_E a Ni_E lze říci, že při svařování bez přídavných materiálů lze očekávat austenitickou strukturu.

4.3 Metody svařování vzorků [11], [19], [36], [37], [38], [41], [43], [44]

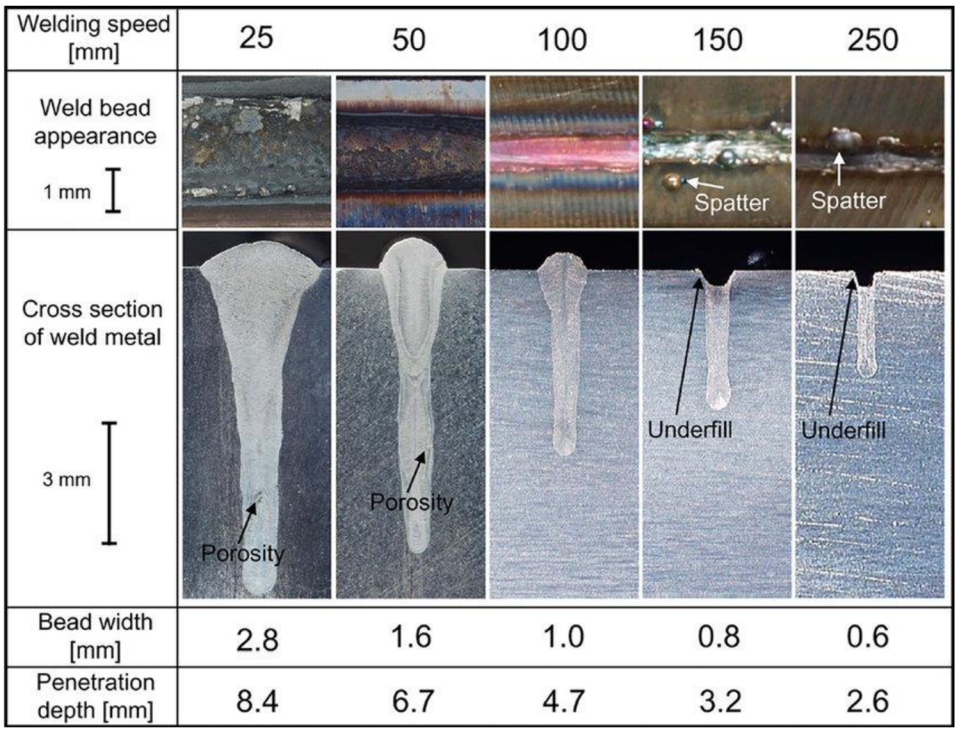
Při výrobě tenkostěnných trubek z austenitické oceli lze očekávat metody svařování LBW nebo PAW. Laserové technologie svařování se vyznačují úzkým a hlubokým svarem a malou oblastí TOO, díky tomu je lze rozlišit.



Obr. 21 Vlevo detail řezu svaru laserem, vpravo detail řezu svaru plazmou v oceli 1.4301 [43]

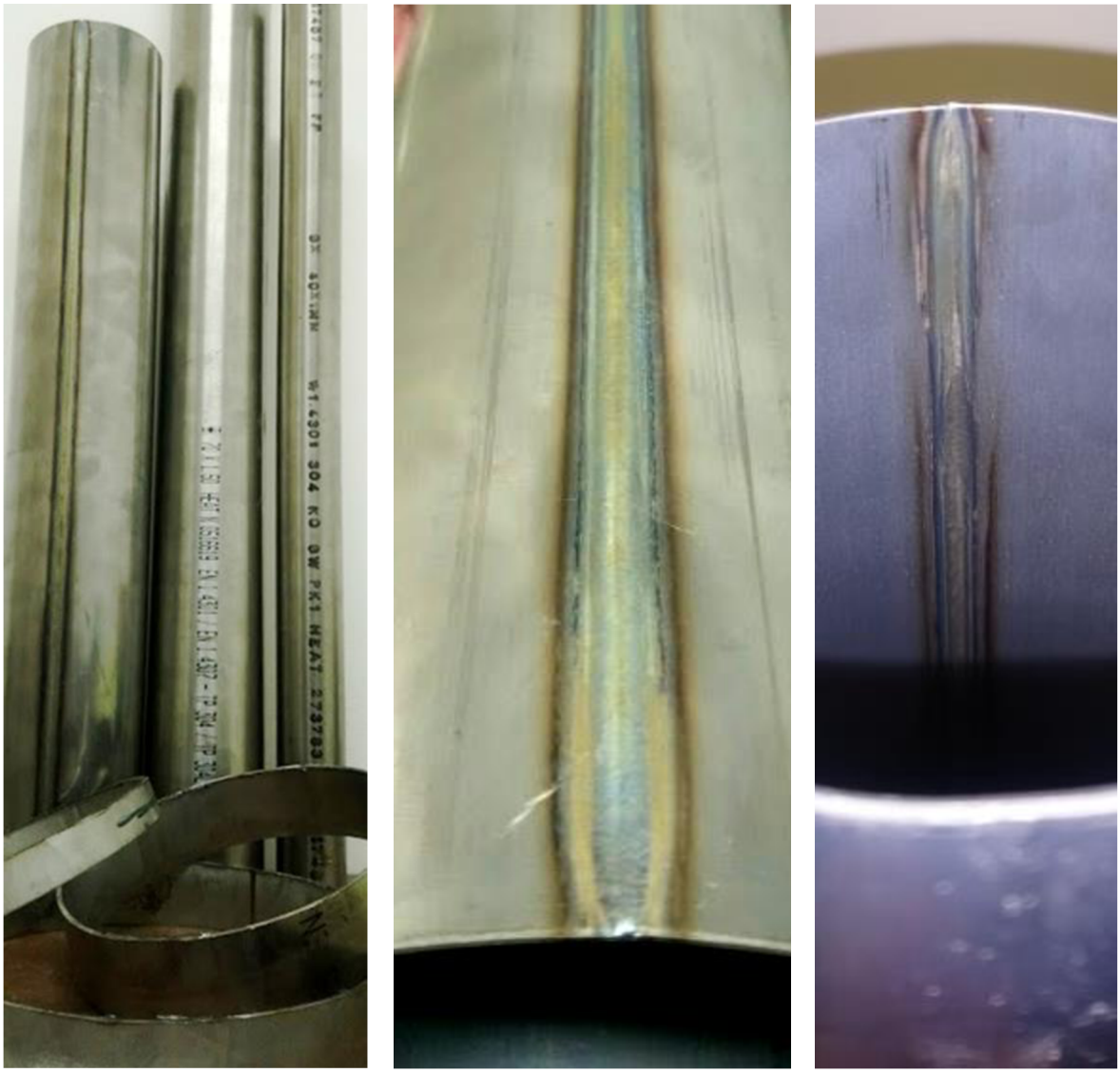


Obr. 22 Vlevo detail řezu svaru plazmou při svařovacím proudu 100 A, vpravo detail řezu svaru laserem o výkonu 600 W při svařovací rychlosti 1,5 m/min v oceli 1.4301 [44]

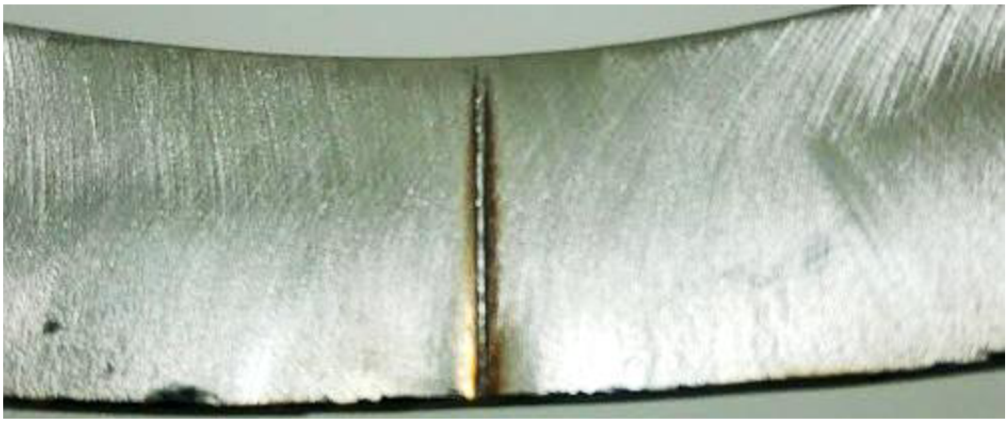


Obr. 23 Srovnání svarů a parametrů svařování laserem o výkonu 6 kW v oceli 1.4301 [45]

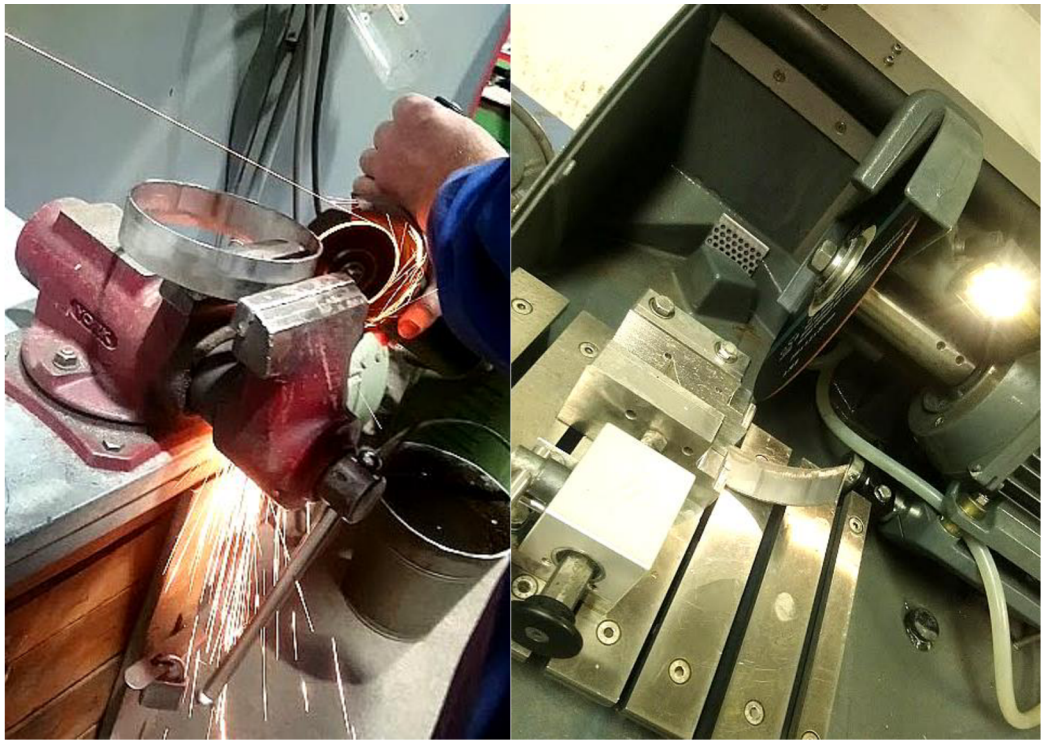
Vzorky svařených trubek z korozivzdorné oceli pro experimentální část bakalářské práce byly dodány školou. Trubky byly děleny pomocí ruční úhlové brusky s řezným kotoučem v dostatečné vzdálenosti od svaru a odřezky následně zkráceny na metalografické pile. Následovalo broušení na metalografické brusce, leptání a pořízení snímků pod mikroskopem. Historie ani parametry svařování nejsou známy.



Obr. 24 Vlevo vzorky určené ke studiu, uprostřed detail na svar PAW vpravo vnitřní část svaru PAW



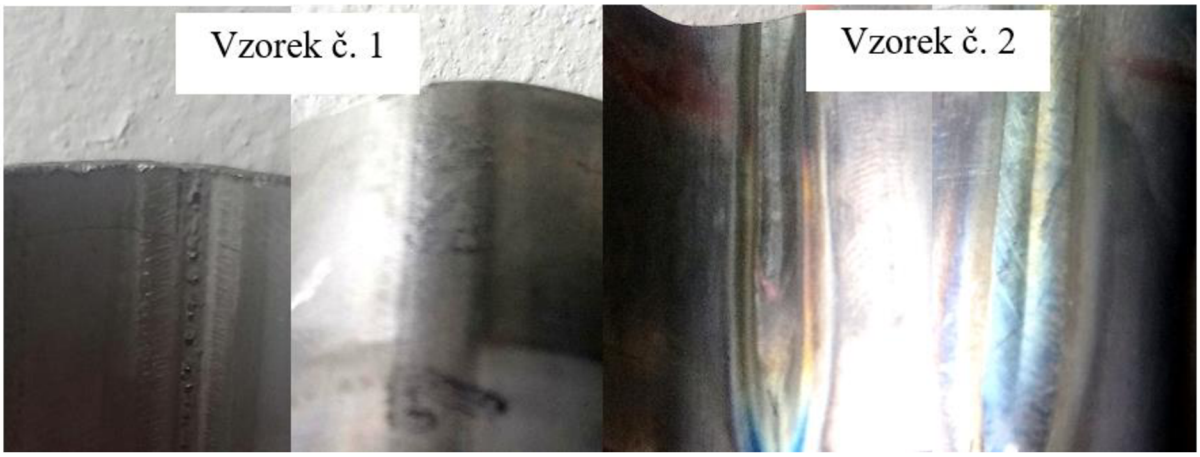
Obr. 25 Detail svaru LBW



Obr. 26 Vlevo dělení vzorků pomocí ruční úhlové brusky, vpravo dělení vzorků na metalografické pile

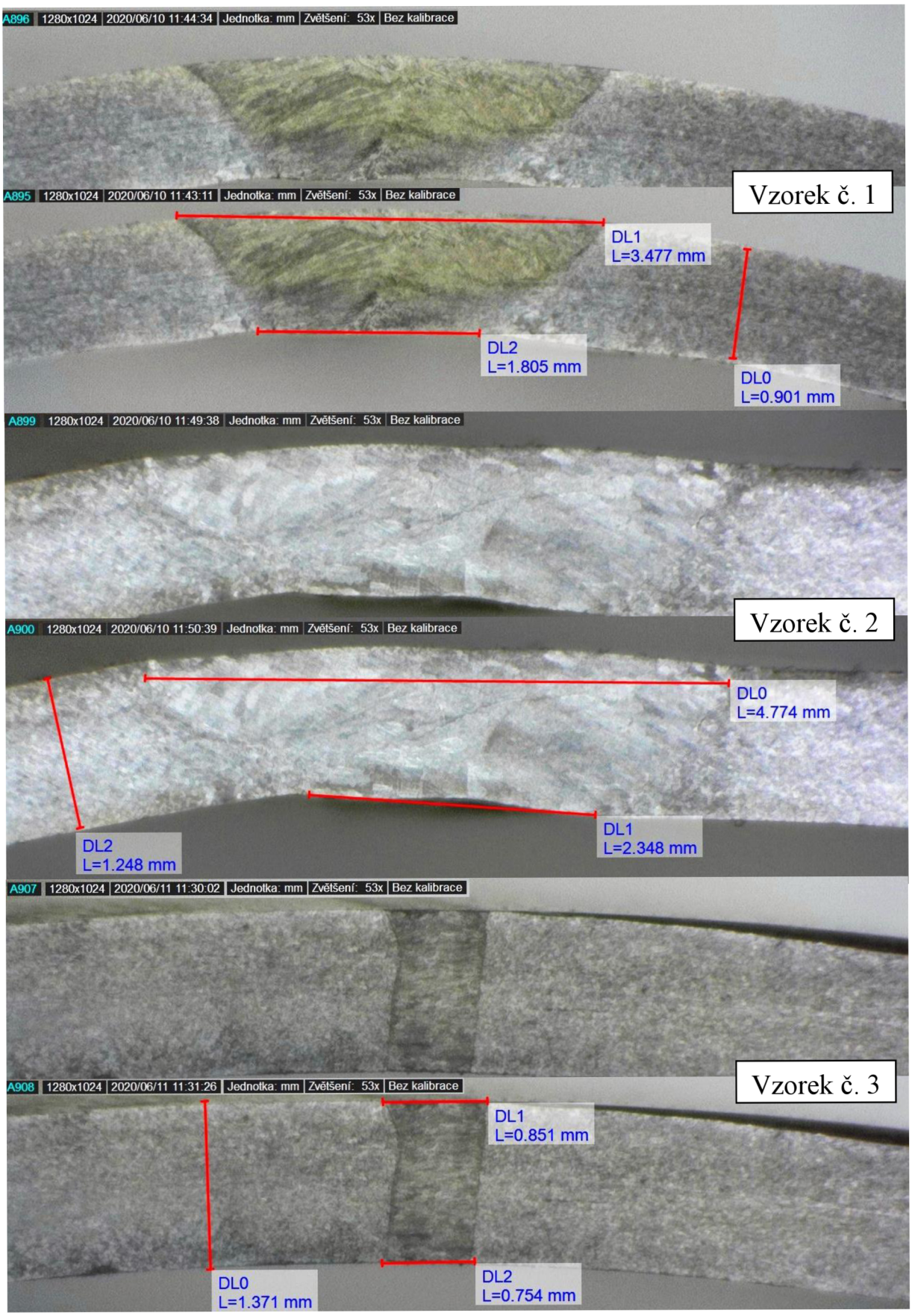
Obr. 27 Vzorky po dělení pomocí ruční úhlové brusky

Obr. 28 Vlevo broušení na metalografické brusce, uprostřed použitá zrnitost brusných kotoučů, vpravo mikroskop použitý pro snímkování

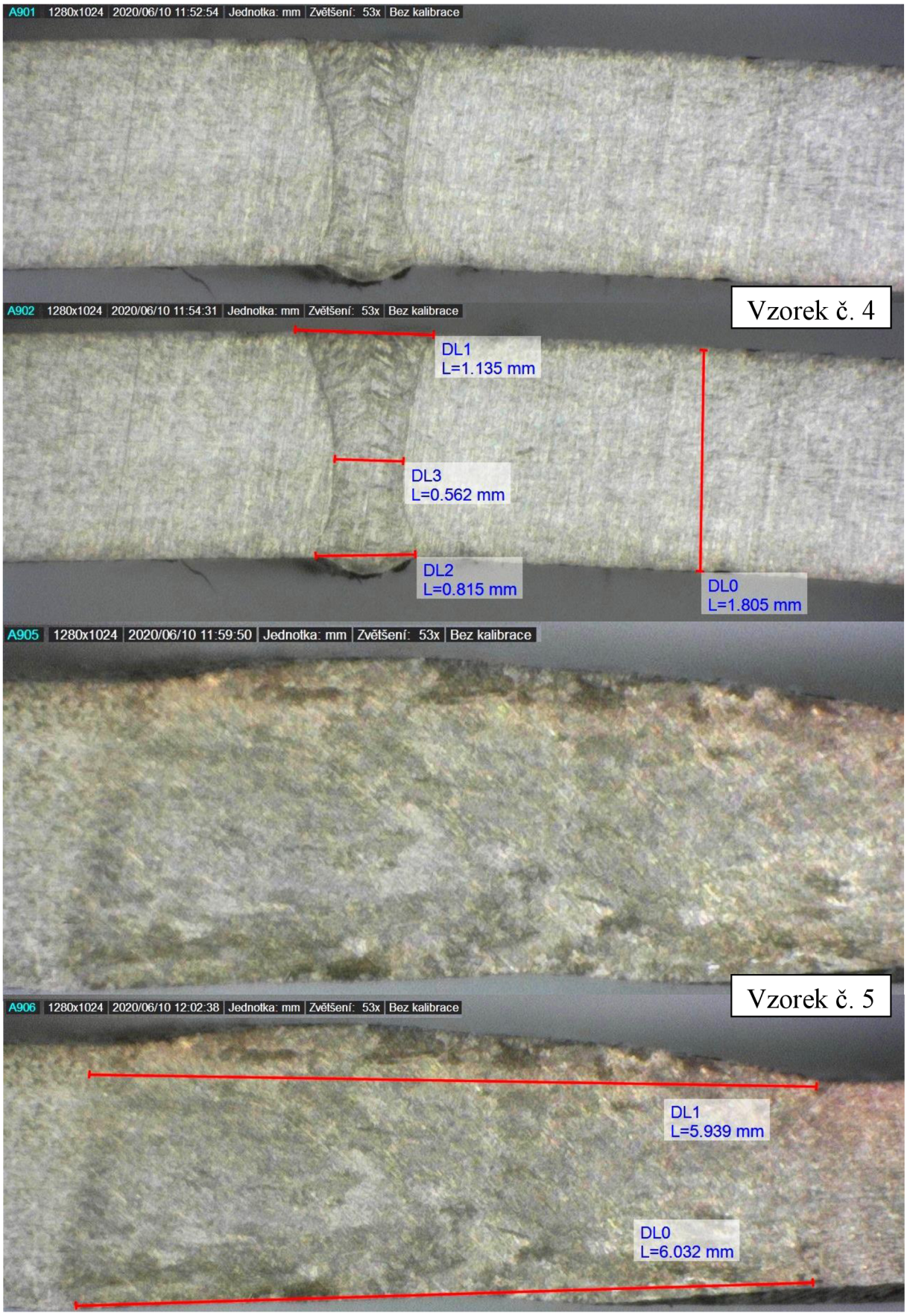


Obr. 29 Vlevo detail svaru vzorku č. 1, vpravo detail svaru vzorku č. 2

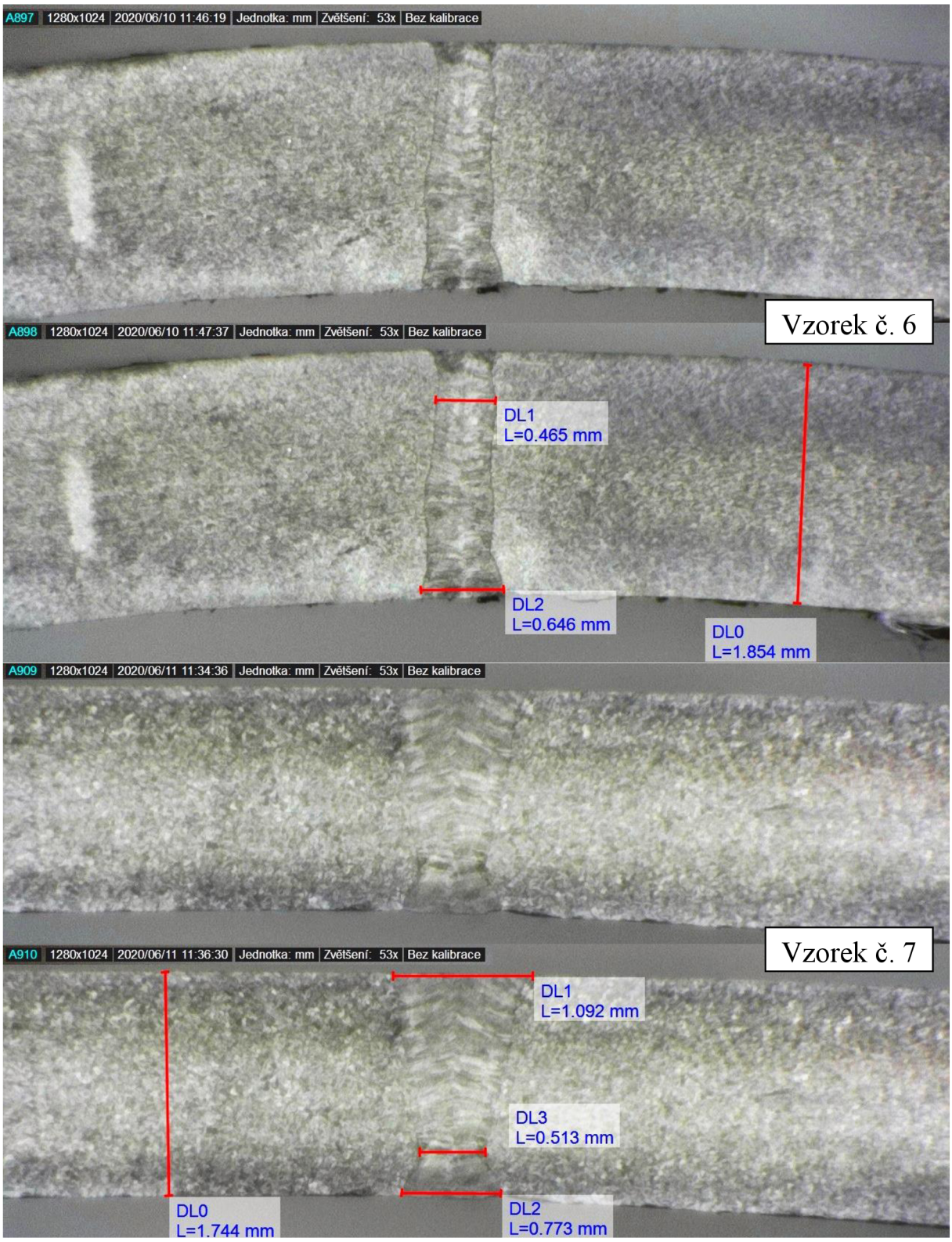
Obr. 30 Detaily svárů vzorků č. 3 až 7



Obr. 31 Detaily řezů svárů vzorků č. 1 až 3



Obr. 32 Detaily řezů svárů vzorků č. 4 až 5



Obr. 33 Detaily řezů svárů vzorků č. 6 až 7

V řezech svárů vzorků číslo 3, 4, 6 a 7 lze pozorovat charakteristický úzký svar s minimální TOO, který byl proveden laserovou technologií.

Vzorky číslo 2 a 5 vykazují větší šířku svaru a větší TOO charakteristickou pro plazmové technologie svařování. Lze pozorovat lehké hrubnutí zrna.

Svar u vzorku číslo 1 je specifický svým trychtýřovým tvarem, který je zřetelně ohraničený (na rozdíl od vzorků č. 2 a 5). Samostatná laserová technologie je vyloučena. Nabízí se i samostatná technologie GTAW, která je ale u svařování tenkostěnného potrubí z korozivzdorné oceli již na ústupu a nedosahuje takové produktivity jako plazmové a laserové technologie, kromě toho šířka svarové housenky 3,5 mm je na tuto technologii dost úzká. Nejpravděpodobnější technologie svařování tohoto vzorku budou hybridní technologie a to LATIG (Laser + TIG) nebo PALW (Laser + Plasma). Makrostruktury svarů zhotovených pomocí technologií LATIG a PALW jsou dost podobné, nicméně technologie LATIG se přímo používá pro podélné svařování trubek z oceli 1.4301. LATIG metoda se tedy jeví jako nepravděpodobnější, ale nelze vyloučit metodu PALW a na posledním místě ani PAW.

Tab. 5 Souhrn výsledků (hodnoty byly zaokrouhleny)

Vzorek č.	Tloušťka [mm]	max. šířka svaru [mm]	min. šířka svaru [mm]	TOO	Rozhraní	Stanovená metoda svařování
1	0,90	3,45	1,80	malá	zřetelné	LATIG > PALW > PAW
2	1,25	4,77	2,35	střední	méně zřetelné	PAW
3	1,37	0,85	0,75	minimální	velmi zřetelné	LBW
4	1,81	1,14	0,57	minimální	velmi zřetelné	LBW
5	1,70	6,03	5,94	střední	méně zřetelné	PAW
6	1,85	0,65	0,47	minimální	velmi zřetelné	LBW
7	1,74	1,09	0,51	minimální	velmi zřetelné	LBW

5 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá svařování tenkostěnného potrubí z korozivzdorné oceli. V rešeršní části je uveden základní popis svařitelnosti materiálu a jsou rozebírány základní vady při svařování. Následuje kapitola věnující se korozivzdorným ocelím. Jejich popis, charakteristika, dělení, označování, legování a jsou popsány vlastnosti. V další kapitole je rozebírána svařitelnost jednotlivých typů korozivzdorných ocelí.

V experimentální části se práce zabývá metodami svařování tenkostěnných trubek z korozivzdorné oceli a je zjišťováno, jakými metodami byly představené vzorky svařeny. Jako metody pro svařování tenkostěnného potrubí z korozivzdorné oceli, které se svařují podélně, se používají převážně metody LBW, PAW a jejich hybridní technologie. LBW je oproti PAW produktivnější a nabízí mnohem tenčí svar s menší TOO. Pro trubky z feritických ocelí se používá metoda HFIW, která je nejproduktivnější ale nelze ji použít pro austenitické oceli, které jsou nemagnetické. Vzorky byly řezány, broušeny, leptány a byly pořízeny snímky pomocí mikroskopu. K vzorkům byly přiděleny nejpravděpodobnější metody svaření (viz. Tab. 5). Nejproblematičtější se jeví vzorek č. 1, u kterého nelze jistě říci, jakou metodou byl svařen. Nejpravděpodobněji se jedná o hybridní metodu LATIG, ale nelze vyloučit metodu PALW a ani PAW.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [46]

[1] BRENNER, Otakar. Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály. *Průmyslové spektrum* [online]. 2003, **2003**(5) [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy-2.html

[2] BRENNER, Otakar. Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály. *Průmyslové spektrum* [online]. 2003, **2003**(7) [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy-2-2-2.html

[3] BRENNER, Otakar. Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály. *Průmyslové spektrum* [online]. 2003, **2003**(6) [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy-2-2.html

[4] BRENNER, Otakar. Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály. *Průmyslové spektrum* [online]. 2003, **2003**(4) [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy.html

[5] Welded Tube & Pipe for Industrial Applications. In: *SMI Steel Market Intelligence* [online]. Kohlplatz [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.steel-intelligence.com/files/slider/Studies/Welded/weldedindustrial.jpg

[6] Remark_exhaust. In: *Instagram* [online]. Irvine, 2020, 2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.instagram.com/p/B_3jLhvHtpO/

[7] METAS DEMİR PROFİL & BORU. In: *METAS DEMİRÇELİK* [online]. Başakşehir [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://lh5.googleusercontent.com/proxy/_YSs9qGa6uTarX6Gq8_bF48f0LyChrt19-NglgkKqI3huZAoqz_k1w0ecjakV2gCny93_vppyp5PTHMVfYDOd3CLn6RYhVE5hgV1-lBv4eV-VYCSZl68kUWmWClH5tlmXlxAU3SAtoP-PqiaPVob

[8] Industrial-plumber. In: *Commercial Plumbing Toronto* [online]. Toronto [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://commercialplumbingtoronto.com/wp-content/uploads/2018/10/indutrial-plumber.jpg

[9] Stainless Steel Welded Tube & Pipe. In: *SMI Steel Market Intelligence* [online]. Kohlplatz [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.steel-intelligence.com/files/slider/Studies/Welded/Welded.jpg

[10] Pipeline transportation storage. In: *MCRSafety* [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.mcrsafety.com/~/media/mcrsafety/industry/hazards/oil-and-gas/pipeline-transportation-and-storage/pipeline-transportation-storage-hero.png?h=380&la=en&mw=1900&w=1200&hash=D1E7D70DC58EE3AAA4A0FB6FAC84ABD7

[11] CUNAT, Pierre-Jean. *Svařování korozivzdorných ocelí* [online]. Lucenbursko: Euro Inox, 2007, 39 s. [cit. 2020-02-17]. ISBN 978-2-87997-177-3. Dostupné z: https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/BrochureWeldability_CZ.pdf

[12] ČÍHAL, Vladimír. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. Praha: Academia, 1999, 437 s. ISBN 8020006710.

[13] KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.

[14] MAYR, Peter. *Evolution of Microstructure and Mechanical Properties of the Heat Affected Zone in B-containing 9%Chromium Steels* [online]. Graz, 2007 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: https://online.tugraz.at/tug_online/voe_main2.getvolltext?pCurrPk=30884. Dizertační práce. Graz Univerzity of Technology.

[15] TOMKÓW, Jacek a Anna JANECZEK. Underwater In Situ Local Heat Treatment by Additional Stitches for Improving the Weldability of Steel. In: *Publisher of Open Access Journals* [online]. Gdańsk, c1996-2020, 2020 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: https://www.mdpi.com/applsci/applsci-10-01823/article_deploy/html/images/applsci-10-01823-g001-550.jpg

[16] FYDRYCH, Dariusz a Grzegorz ROGALSKI. Weldability of high strength steels in wet welding conditions. In: *Research Gate* [online]. 2013 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/268215875_Weldability_of_high_strength_steels_in_wet_welding_conditions

[17] Weld Imperfections : Lamellar Tearing. In: *Piping Engineering* [online]. Maharashtra, 2015 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: https://www.pipingengineer.org/wp-content/uploads/lamellar-tearing-01.jpg

[18] BARTÁK, Jiří. Typy vad, příčiny jejich vzniku a hodnocení. In: *CWS-ANB* [online]. Praha, 2012 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384

[19] HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2009, 492 s. : il., čb. fot. ISBN 978-80-227-3167-6.

[20] FOLDYNA, Václav, Karel HENNHOFER, Věra OLŠAROVÁ, et al. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů.* 2. upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7185-3.

[21] SIGMUND, Marián, *Svařitelnost materiálů* [přednáška]. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT, Technologie svařování 5. 12. 2019.

[22] FOLDYNA, Václav, Karel HENNHOFER, Věra OLŠAROVÁ, et al. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2. upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7185-3.

[23] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.

[24] Korozivzdorné oceli- vlastnosti, [online], vyd. 2002, Euro-inox, , dostupné na : http://www.cedinox.es/opencms901/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/StainlessSteelProperties_CZ.pdf, ISBN 2-87997-082-2

[25] BŘEZINA, Matěj. Vlastnosti korozivzdorných ocelí a jejich využití v interiérových doplňcích – oblasti kontaktu s lidským potem. Brno, 2017. Dostupné také z:https://www.holar.biz/data/editor/image/Certifik%C3%A1ty/Srovnn%20vlastnost%20korozivzdornch%20ocel_rev2.pdf. Výzkumná zpráva. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Fakulta chemická.

[26] KOLAŘÍK, Ladislav. Svařitelnost korozivzdorných ocelí. In: DocPlayer [online]. Praha [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: https://docplayer.cz/106030786-Svaritelnost-korozivzdornych-oceli.html

[27] SALUJA, Rati a Khwaja MOEED. Formation, Quantification and Significance of Delta Ferrite for 300 Series Stainless Steel Weldments. In: ResearchGate [online]. IJETMAS, 2015 [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Rati_Saluja4/publication/329983932/figure/fig4/AS:709127265333248@1546080523035/DeLong-diagram -of-1973-introducing-the-concept-of-Ferrite-Number-13-14-415-WRC-1988.jpg

[28] SALUJA, Rati a Khwaja MOEED. Formation, Quantification and Significance of Delta Ferrite for 300 Series Stainless Steel Weldments. In: ResearchGate [online]. IJETMAS, 2015 [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Rati_Saluja4/publication /329983932/figure/fig5/AS:709127265329152@1546080523065/WRC-1988-diagram-with- solidification-mode-boundaries-Figure-10-The-WRC-1992-diagram-39.jpg

[29] BRESLAVSKY, Dmitry. EUROPEAN STEEL AND ALLOY GRADES. EUROPEAN STEEL AND ALLOY GRADES [online]. Kharkov: National Technical University KhPI, c2001-2020 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/index.php

[30] An Overview of Welded Low Nickel Chrome-Manganese Austenitic and Ferritic Stainless Steel. In: Semantic Scholar [online]. 2016 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: https://d3i71xaburhd42.cloudfront.net/08ee116cd24c3e8a13316e6ad656a7255c6813f2/3-Figure1-1.png

[31] Ferritic Stainless Steel. In: Science Direct [online]. c2020, 2017 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: https://ars.els-cdn.com/content/image/3-s2.0-B9780128035818091906-f09190-23-9780128035818.jpg?_

[32] TOTTEN, George E. Steel heat treatment: metallurgy and technologies. 2nd ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, c2007. ISBN 0849384559.

[33] Sumitomo Metal Industries, Ltd. Sumitomo Metals Developed High Strength and High Corrosion Resistant Alloy, Super 17Cr OCTG for Ultra Deep Well Application. In: *Nippon Steel* [online]. Nippon Steel Corporation, 2011 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: https://www.nipponsteel.com/en/news/old_smi/2011/images/e-news2011-12-07-01-01.jpg

[34] WICKENS, Rupert. INTRODUCTION TO 22% CHROME DUPLEX STAINLESS STEEL. In: *LFF Group* [online]. Basildon: LFF Group, c2018, 2017 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: https://www.lff-group.com/content/images/posts/introduction-to-22-chrome-duplex-stainless-steel/duplex-microstructure_large.jpg

[35] NĚMEC, Karel. Korozivzdorné a žárupevné oceli. In: *Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. Brno: Ústav materiálových věd a inženýrství, FSI VUT v Brně, c2012 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/06%20-%20Korozivzdorne%20a%20zaruvzdorne%20oceli.pdf

[36] AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. : il. ISBN 80-85771-81-0.

[37] SIGMUND, Marián, *Svařování laserem* [přednáška]. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT, Technologie svařování 14. 11. 2019.

[38] SIGMUND, Marián, *Svařování plazmou a svazkem elektronů* [přednáška]. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT, Technologie svařování 7. 11. 2019.

[39] BEZÁK, Ján, Anton KOLENO, Ivan VITÁLOŠ, et al. *Zváracie procesy a zariadenia: učebný text pre vyšší zváračský personál.* Bratislava: Prvá zváračská , a.s, 2011, 287 stran : ilustrace. ISBN 978-80-89421-01-5.

[40] BARTÁK, Jiří, Vladimír BĚLOHUBÝ, Vladimír BUBENÍK, Rudolf KOVAŘÍK, Vladimír KUDĚLKA, Václav PILOUS, Pavel POKORNÝ a Jiří SIKA. *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory*. Ostrava: ZEROSS, 2002, 418 stran : černobílé ilustrace. ISBN 80-85771-97-7.

[41] KOŘÁN, Pavel. Průmyslové lasery (2) - svařovací lasery. Průmyslové spektrum [online]. 2012, 2012(4) [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-2-svarovaci-lasery.html

[42] HF WELDING 60x3 Tube - STE. In: *YouTube* [online]. San Bruno: Google, c2020, 2011 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=FFpHWt9zj_w

[43] MAHRLE, Achim, Michael SCHNICK, Sascha ROSE, Cornelius DEMUTH, Eckhard BEYER a Uwe FÜSSEL. Process characteristics of fibre-laser-assisted plasma arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2011/08/10, **44**, 345502. DOI: 10.1088/0022-3727/44/34/345502.

[44] MAHRLE, Achim, Sascha ROSE, Michael SCHNICK, Thomas PINDER, Eckhard BEYER a Uwe FÜSSEL. Improvements of the welding performance of plasma arcs by a superimposed fibre laser beam. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2012/02/01, **8239**, 8. DOI: 10.1117/12.906678.

[45] KAWAHITO, Yosuke, Yousuke UEMURA, Yuichiro DOI, et al. Elucidation of effect of welding speed on melt flows in high-brightness and high-power laser welding of stainless steel on basis of three-dimensional X-ray transmission in-situ observation. *QUARTERLY JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY*. 2015/02/27, **33**, 13-19. DOI: 10.2207/qjjws.33.13.

[46] *Citace PRO* [online]. Brno: Citace.com, c2015-2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.citacepro.com/

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Tažnost	[%]
Cr_E	Chrom ekvivalent	[%]
GTAW	Gas tungsten arc welding	
HB	Tvrdost dle Brinella	[-]
HFIW	High frequency induction welding	
LAGMAW	Hybridní technologie svařování Laser + MIG/MAG	
LATIG	Hybridní technologie svařování Laser + TIG	
LBW	Laser beam welding	
Ni_E	Nikl ekvivalent	[%]
PALW	Hybridní technologie svařování Laser + Plasma	
PAW	Plasma arc welding	
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	Mez kluzu	[MPa]
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	
111	Ruční svařování obalenou elektrodou	
121	Svařování automatem pod tavidlem	
131	Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu (MIG)	
135	Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu (MAG)	
136	Obloukové svařování plněnou elektrodou v aktivním plynu	
141	Obloukové svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu (TIG)	

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklady využití tenkostěnných trubek z korozivzdorné oceli [5], [6], [7], [8], [9], [10]
Obr. 2 Příklad průběhu teplotních cyklů v závislosti na čase a místě posuzovaném svarového spoje pro svařování jedné vrstvy housenky [13]
Obr. 3 Vliv teplotního účinku na strukturu svarového spoje v oceli 1.4903 [14]
Obr. 4 Vlevo příklad trhliny za horka, vpravo zkouška Transvarestraint [18] [20]
Obr. 5 Vlevo schéma zkoušky Tekken, studená trhlina ve vzorku při zkoušce Tekken [16] [15]
Obr. 6 Lamelární prasklina [17]
Obr. 7 Schaefflerův diagram [26]
Obr. 8 De Longův diagram [27]
Obr. 9 WRC diagram [28]
Obr. 10 Austenitická struktura v oceli 1.4372 [30]
Obr. 11 Feritická struktura v oceli 1.4512 [31]
Obr. 12 Martenzitická struktura v oceli 1.4545 [32]
Obr. 13 Vlevo martenziticko-feritická struktura, vpravo austeniticko-feritická struktura (světle austenit, tmavě ferit) v duplexních ocelích [33] [34]
Obr. 14 Závislost obsahu titanu a teploty vytvrzování na tvrdost HRC v precipitačně vytvrditelných korozivzdorných ocelí [35]
Obr. 15 Schéma plazmového svařování [11]
Obr. 16 Vlevo kondukční režim, vpravo penetrační režim [41]
Obr. 17 Schéma CO_2 laseru [11]
Obr. 18 HFIW svařování v praxi [42]
Obr. 19 Schéma HIFW svařování [11]
Obr. 20 Vynesené hodnoty Cr_E a Ni_E dle Schaefflera (červeně) a dle Hulla (zeleně) oceli 1.4301 v Schaefflerově diagramu [26]
Obr. 21 Vlevo detail svaru laserem, vpravo detail svaru plazmou v oceli 1.4301 [43]
Obr. 22 Vlevo detail řezu svaru plazmou při svařovacím proudu 100 A, vpravo detail řezu svaru laserem o výkonu 600 W při svařovací rychlosti 1,5 m/min v oceli 1.4301 [44]
Obr. 23 Srovnání svarů a parametrů svařování laserem o výkonu 6 kW v oceli 1.4301 [44]
Obr. 24 Vlevo vzorky určené ke studiu, uprostřed detail na svar PAW vpravo vnitřní část svaru PAW
Obr. 25 Detail svaru LBW
Obr. 26 Vlevo dělení vzorků pomocí ruční úhlové brusky, vpravo dělení vzorků na metalografické pile
Obr. 27 Vzorky po dělení pomocí ruční úhlové brusky
Obr. 28 Vlevo broušení na metalografické brusce, uprostřed použitá zrnitost brusných kotoučů, vpravo mikroskop pomocí
Obr. 29 Vlevo detail svaru vzorku č. 1, vpravo detail svaru vzorku č. 2
Obr. 30 Detaily svarů vzorků č. 3 až č. 7
Obr. 31 Detaily řezů svarů vzorků č. 1 až 3
Obr. 32 Detaily řezů svarů vzorků č. 4 až 5
Obr. 33 Detaily řezů svarů vzorků č. 6 až 7

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Příklady značení korozivzdorných ocelí a jejich chemické složení [29]
Tab. 2 Mechanické vlastnosti vybraných austenitických ocelí [29]
Tab. 3 Mechanické vlastnosti vybraných duplexních ocelí [29]
Tab. 4 Chemické složení oceli 1.4301 [29]
Tab. 5 Souhrn výsledků