



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# VYUŽITÍ ROZKYVU HOŘÁKU PRO SVAŘOVÁNÍ TUPÉHO SVARU METODOU MAG KOROZIVZDORNÉ OCELI

USE OF TORCH SWING FOR BUTT WELD WELDING OF STAINLESS STEEL MAG METHOD

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Matúš Gago**

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Jaroslav Kubíček, IWE**

**BRNO 2022**

## Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Matúš Gago</b>
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jaroslav Kubiček, IWE</b>
Akademický rok:	2021/22

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

### **Využití rozkvyv hořáku pro svařování tupého svaru metodou MAG korozi vzdorné oceli**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Korozi vzdorné austenitické oceli se dnes využívají pro široké spektrum aplikací především v chemickém, potravinářském a energetickém průmyslu. Při svařování je požadováno snížení tepelného příkonu z důvodu degradace svarového spoje. Diplomová práce je zaměřena na možnost svařovat tupý svarový spoj s rozkvyvem hořáku, který ovšem vede k vyššímu tepelnému příkonu. Vhodnost technologie rozkvyv hořáku je ověřena zkouškami vlastností svarů.

#### **Cíle diplomové práce:**

Vypracovat literární studii svařování metodou MAG a svařitelnosti korozi vzdorných ocelí.  
Posoudit parametry svařování a vliv rychlosti svařování na chování austenitické korozi vzdorné oceli a její vlastnosti.  
Navrhnout a experimentem ověřit rozdílnost mechanických vlastností při svařování nízkým a vysokým tepelným příkonem .  
Provést a vyhodnotit experiment.  
Vypracovat postupy svařování – WPS.

#### **Seznam doporučené literatury:**

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

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

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

---

## ABSTRAKT

Práca so zameraním na oblúkové zvarovanie korozivzdorných ocelí zamerané na metódu MAG, s literárnou štúdiou o danej problematike. Boli vybrané geometrie tupého zvaru s prípravou úkosom „Y“ a hrúbky materiálov, ktoré sú často využívané na konštrukciách využívaných v energetike a potravinárskom priemysle (6, 8 a 12mm). Bola vypracovaná experimentálna štúdia vplyvu zvarovania metódou MAG, s rozkyvom a bez rozkyvu zvarovacieho horáku pre „Y“ zvar. Experimentálne overované vzorové zvary jednotlivých typov boli doplnené o zhodnotenie výsledkov s kútovým zvarom a zvarom pod tavidlom pre porovnanie dôsledkov zvarovania s veľkým tepelným príkonom. V práci boli teoreticky zhodnotené použité materiály, analyticky vypočítaná možná výsledná teoretická materiálová štruktúra a zaradenie výsledkov do Scheafflerovho a WRC 1992 diagramu. Posúdená bola vzájomná zvariteľnosť materiálov pomocou ekvivalentov chromu a niklu. A vyhodnotená makroštruktúra zvarových vzorov, vypracované ťahové skúšky a skúšky tvrdosti pre posúdenie vplyvu mechanických vlastností. V závere bolo stanovené odporúčanie pre prax a odporúčanie na prevenciu chýb, ktoré boli pozorované na experimentálnych vzorkách.

### Kľúčová slova

Zvarovanie metódou MAG, využitie rozkyvu horáku, zvarovanie tupého zvaru, korozivzdorné oceli

## ABSTRACT

Diploma thesis of arc welding of stainless steels focused on the MAG method, with a literature study on the issue. The geometries of the butt weld with the preparation of the bevel "Y" and the thickness of materials that are often used on structures used in the energy and food industries (6, 8 and 12 mm) were selected. An experimental study of the effect of MAG welding was performed, with and without oscillation of the welding torch for the "Y" weld. Experimentally verified sample welds of individual types were supplemented by the evaluation of results with fillet welds and submerged arc welds for comparing the consequences of welding with high heat input. The materials used were theoretically evaluated, the possible resulting theoretical material structure was analytically calculated and the results were included in the Scheaffler and WRC 1992 diagram. The mutual weldability of the materials with the equivalent of Crom and Nickel was assessed. And evaluated macrostructure of weld patterns, developed tensile tests and hardness tests to assess the impact of mechanical properties. In the end, recommendations for practice and recommendations for the prevention of errors, which were observed on experimental samples, were set.

### Key words

MAG welding, advantage and use of mag torch oscillation, torch moving with swing, welded butt weld, stainless steel

---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

GAGO, Matúš. *Využití rozkvyu hořáku pro svařování tupého svaru metodou MAG korozivzdorné oceli* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140066>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

---

## PREHLASENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému vypracoval sám s využitím uvedenej literatúry a podkladov, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho práce.

---

místo, datum

---

Bc. Matúš Gago

---

## **POĎAKOVANIE**

Ďakujem týmto Romanovi Kratochvílovi za pomoc pri pripravovaní vzorového materiálu, p. Vojtěchovi Řiháčkovi za ochotu a pomoc pri meraní tvrdosti vzorov a pánom Ing. Kamilovi Podanému Ph. D a Ing. Jaroslavovi Kubíčkovi, IWE za odborné vedenie práce, za cenné pripomienky a rady, ktoré mi poskytli pri vypracovaní diplomovej práce.

---

**OBSAH**

ÚVOD .....	7
1 ZÁKLADNÝ ROZBOR PROBLEMATIKY .....	8
2 KOROZIVZDORNÉ OCELI .....	9
2.1.1 Vlastnosti legujúcich prvkov v súvislosti s korozivzdornými oceľami .....	12
2.2 Korózia .....	13
3 TEÓRIA VZNIKU ZVAROVÉHO SPOJA .....	16
3.1 Zvarovanie elektrickým oblúkom metódou MIG/MAG – 135 .....	17
3.1.1 Metódy prenosu zvarového kovu .....	17
3.1.2 Zvarovacie plyny pre korozivzdorné oceli .....	20
3.1.3 Polohy pri zvarovaní .....	21
3.1.4 Zvarové spoje .....	22
3.2 Zvariteľnosť korozivzdorných ocelí .....	22
3.2.1 Schaefflerov diagram .....	23
3.2.2 De Longov diagram .....	24
3.2.3 Diagram WRC -1992 .....	25
3.2.4 Vnesené teplo .....	25
3.2.5 Trhliny za tepla .....	26
3.3 Tepelný cyklus .....	27
3.4 Mechanika roztavenej tavnej vane .....	29
3.5 Metódy rozkyvu horáku .....	30
3.6 Kontrola akosti zvarovaných spojov .....	30
3.6.1 Deštruktívna skúška ťahom, ktorú upravuje norma ČSN EN ISO 5178 .....	31
3.6.2 Deštruktívna skúška tvrdosti podľa ČSN EN ISO 9015-1 .....	32
3.7 pWPS – Špecifikácia postupu zvarovania .....	33
4 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ .....	35
4.1 Príprava materiálu .....	36
4.2 Teoretický odhad zloženia zvarovaných vzorov .....	36
4.2.1 Výpočet Schaefflerov diagram .....	37
4.2.2 Diagram WRC -1992 .....	38
4.2.3 Trhliny za tepla pre oceľ 1.4541 .....	38
4.3 Popis experimentu. ....	38
4.3.1 Popis priebehu experimentu vzoru A a B .....	39
4.3.2 Kontrola povrchu vzoru C .....	40
4.3.3 Kontrola povrchu vzoru D .....	41
4.4 Metalografické hodnotenie vybraných vzorkov .....	42
4.4.1 Vzorka B1 (8mm ROZKYV) .....	43
4.4.2 Vzorka B4 (8mm ROZKYV) .....	44
4.4.3 Vzorka C1 (6mm LINEAR) .....	45
4.4.4 Vzorka C3 (6mm ROZKYV) .....	46
4.4.5 Vzorka D2 (12mm - 6 VRSTIEV LINEAR) .....	47
4.4.6 Vzorka D3 (12mm - 3 VRSTVY ROZKYV) .....	49
4.4.7 Vzorka D4 (12mm - 2 VRSTVY ROZKYV) .....	50

---

4.4.8 Vzorka D5-T (12mm – 5 VRSTIEV LINEÁRNE) .....	51
4.5 Experimentála skúška ťahom .....	53
4.6 Skúšky tvrdosti podľa Vickersa .....	54
4.6.1 Vzorka C3 .....	54
4.6.2 Vzorka D3 .....	55
4.6.3 Vzorka D2 .....	56
4.6.4 Vzorka D-T .....	58
ZÁVER .....	59
ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	61
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATIEK .....	63
ZOZNAM PŘÍLOH .....	64
ZOZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKOV .....	65

---

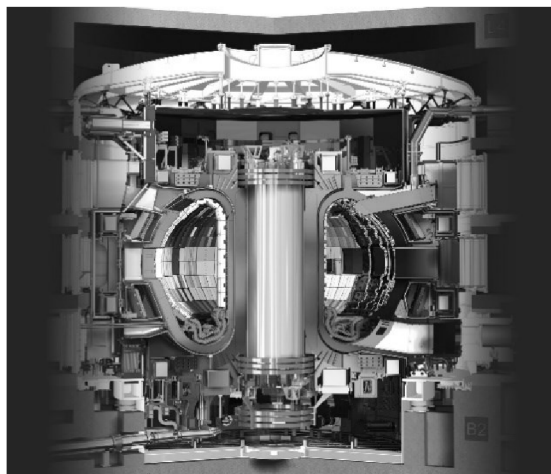


## ÚVOD

Zvarovanie, ako jedna z nosných technológií súčasnej strojárenskej výroby, je veľmi osobitá a všestranná metóda strojárenskej technológie, okrajovo zasahuje takmer do všetkých častí strojárstva a každý si v nej vie nájsť to svoje, čo môže skúmať, či už prúdenie roztaveného kovu, deformácie, vnútorné napätie, ale aj statické zaťaženie nosníkov, pomerne širokú časť tvorí metalografia. V dnešnom svete moderných technológií sa veľká časť strojárenského priemyslu orientuje na zvyšovanie efektívnosti, postupne nahradzujeme masívne, ale pomerne drahé odliatky laserovými výpalkami z plechu, ktoré následne opracovávame do požadovaných presností a používame rovnako ako odliatky. Širokou časťou strojárenskej výroby, ktorá zamestnáva podstatnú časť produkcie je energetický a potravinársky priemysel. Aj samotný fúzny reaktor budúcnosti je jeden veľký zvarenec. Zvarovanie dáva priemyslu možnosti a silu, akú žiadna iná technológia neponúka - spájať súčasti aj gigantických rozmerov Obr. 1. Potravinárske výrobky obrovskej dennej spotreby, alebo pochutiny ako pivo, víno a iné by sa nezaobišli bez technologického spracovania, ktorej jadro tvoria z dôvodu vysokých požiadavkou na kvalitu a hygienu veľké časti z nehrdzavejúcej ocele.

Nehrdzavejúca oceľ je jedna z ušľachtilých materiálov a človeka s nízkymi vedomosťami alebo domáceho kutila dokáže pri spracovaní či už zvarovaní, vŕtaní alebo brúsení a rezaní nepekne potrápiť, keď sa však na ňu človek dobre pripraví najmä teoreticky a pochopí všetky jej úskalia, prináša esteticky veľmi príťažlivý výsledok často hraničiaci s umením. A nie len z hľadiska strojárenského priemyslu, ale aj toho umeleckého. Podobne ako umelecký kováč spracováva kov do umeleckých diel, dobrý zvarač s citom pre umenie a veľmi dobre zvládnutou technológiou zvarovania dokáže vytvárať veľmi príťažlivé umelecké celky, ale aj veľmi esteticky pôsobiace pekné zvary, napríklad na potrubí alebo na častiach súčastí. Hra farieb oxidov na povrchovej vrstve nehrdzavejúcej ocele prináša neobmedzené množstvo kreatívnych možností ako ich poňať za príležitosť, nie za prekážku pri zvarovaní.

Ďalšou motiváciou použitia nehrdzavejúcej ocele sú veľké možnosti povrchových úprav, napríklad kartáčovanie, brúsenie a otláčovanie. Pri potravinárskych strojoch sa z jednej strany kladie dôraz na maximálnu hygienu a dokonale hladký povrch, ktorý zabraňuje usadzovaniu patogénov a je ľahký na čistenie, ale z druhej strany potravinárskych zariadení je požiadavka na príťažlivý vzhľad v prevádzkach, alebo výrobniach ktoré sú čoraz častejšie vystavované ako pýcha samotnej firmy, slúžiacim na propagáciu samých seba, firmy tiež často predávajú svoje pracovné miesta na náborových videách, kde ukazujú ako to u nich vo firme chodí a príjemné pracovné prostredie v obklopení pekných strojov priaznivo ovplyvňuje myslenie v prospech spoločnosti a dáva firme istý druh výhody.



Obr. 1 Použitie zvarovania nerezovej ocele v TOKAMAK [1]

---

## 1 ZÁKLADNÝ ROZBOR PROBLEMATIKY

Rozborom jednotlivých zvarových spojov zvarovanej zostavy a ich následnou analýzou sa na zostavu zvarovaného dielu môžeme pozerat' z hľadiska nárokov na zaťaženie ako na sústavu jednotkových zvarových spojov, naprieč rôznymi geometriami zvarov, či už preplátavaných tupých alebo kútových zvarov. Vieme zostavu dimenzovať ako celok, ale v konečnom dôsledku dimenzujeme a špecifikujeme každý zvar samostatne. Cieľom práce je analýza takéhoto čiastkového zvaru, ktorá nemá za úlohu konkrétne riešenie zložitej priemyselnej aplikácie, ale má byť inšpiráciou a načrtnutím riešenia pre jednotlivé zvarové spoje.

Hlavným cieľom bolo skúškami overiť možnosť zvarovania zvarových spojov s rozkyvom zvarovacieho horáku pre koroziivzdorné oceli. Vzhľadom k nízkemu požadovanému tepelnému príkonu v rozmedzí 0,5 až 1,5 kJ.mm<sup>-1</sup> existuje všeobecné odporúčanie zvarovať iba priamymi zvarovými húsenicami bez rozkyvu. Samotný rozkyv oblúku vytvára rovnomernú zvarovú húsenicu s priaznivým prechodom zvarového kovu do základného materiálu.

Cieľom práce je tiež porovnať jednotlivé funkčné parametre zvarovania na vybranom užšom množstve vybraných vzorových druhov spojov, nahliadnutie do ich pevnostných a štrukturálnych charakteristík a zhodnotenie výsledkov v uvedenom užšom rozsahu skúmaných vzorov, ktorý sa dá rozšíriť na širšie spektrum aproximáciou alebo prepočtom parametrov na základe požadovaných podmienok.

Vhodným výberom základného materiálu v rozmedzí hrúbok 3-20mm, ktoré sa používajú v energetike a v potravinárstve, pri nižších hrúbkach cca 3-6 na pivné alebo mliekarenské tanky, v prípade hrubších plechov môže ísť o mnohé časti turbín alebo rozvádzačov a podobne.

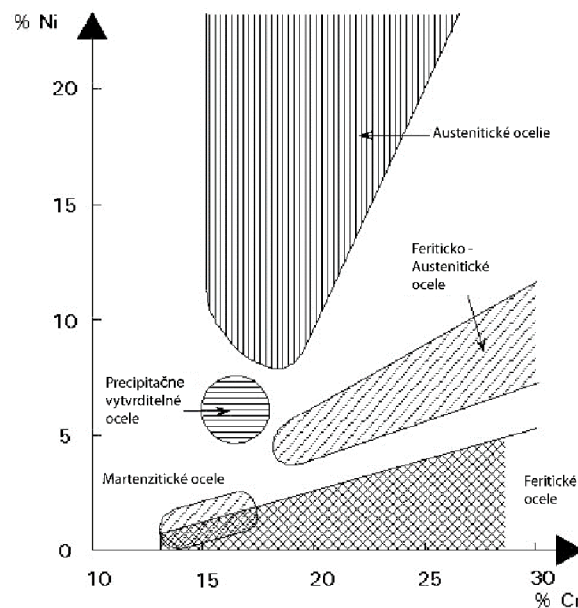
Problémami pri zvarovaní môže byť zlá kvalita krycej vrstvy zvaru, alebo defekty spôsobené zvarovaním, ale tieto by mali byť odstránené pred použitím zvarovanej súčasti kontrolami zvarov, preto je cieľom navrhnuť zvar tak, aby vyhovoval z hľadiska funkčnosti, ale aj hygieny zvarovanej súčasti.

## 2 KOROZIVZDORNÉ OCELI

Schopnosť korozivzdorných ocelí a tiež aj iných zliatin chrániť svoje štruktúry pred koróziou je daná ich schopnosťou sa pasivovať rozhraní medzi kovom a okolným prostredím. Pasivácia je zložitý dej, ktorý sa odohráva na povrchu korozivzdorných ocelí, obmedzuje chemickú reaktivnosť povrchu. Pasiváciou vzniká veľmi tenká (cca 1,5-2 nm) neviditeľná vrstva oxidov na povrchu telesa, čím je táto vrstva hrubšia, tým je teleso viacej schopné odolať chemicky agresívnemu prostrediu v okolí. A čím viac obsahuje chrómu, tým je rýchlejšia tvorba oxidovej vrstvy. Vzniká postupne a vôbec nemusí odpovedať zloženiu, stechiometrickému pomeru ani pôsobeniu kyslíka na povrchu a často je priamoúmerne hrubá s teplotou pri ktorej vniká. [2]

Nerezové oceli sa vyznačujú svojimi jedinečnými charakteristickými vlastnosťami, ich systematické označenie vzhľadom na ich len nedávno oslávenú 100 ročnú históriu (približne začiatky tej formy, ako ich poznáme dnes) označuje niekoľko noriem, ktoré sa často vo výklade ich chemického zloženia vzájomne prekrývajú. V Českej republike podlieha označovanie norme ČSN 42 0002-76, kde sú značené triedou 17 XXX, Nemeckou normou DIN 1.4XXX alebo normou Amerického Inštitútu pre Oceli a Liatiny – AISI 3XX existujú však oceli, ktoré majú korozivzdorné vlastnosti, a sú označené vyššími triedami začlenená v normatíve. [2]

V zliatine Fe-C určuje charakteristiky materiálu – tepelnú vodivosť, tepelnú rozťažnosť, pevnosť v ťahu, modul pružnosti, elektrický odpor, štruktúru zŕn ich zveriteľnosť najmä pomer uhlíka a jeho alotropická premena. Vysoká miera legovania v rôznom pomere chrómom, niklom, niobom, molybdenom, doplnkovo titanom a ďalšími, pridáva ďalšie rôznorodé vlastnosti a tiež ovplyvňuje chemickú odolnosť, zvariteľnosť, obrobitelnosť, vrubovú húževnatosť, teplotnú stabilitu, a dokáže vylúčiť a aj rozšíriť oblasť austenitu, prípadne iné vlastnosti. [3]



Obr. 2 - Diagram základných typov nehrdzavejúcej oceli na základe obsahu chrómu a niklu. [3]

Za nehrdzavejúce oceli Obr. 2 považujeme také oceli, ktoré majú vo svojom zložení alespoň 12 % až 30 % podiel chrómu, do 30 % niklu (viac ako prechodové do zliatin niklu) alebo 24 % mangánu a môžu byť ďalej legované, ale nemusia. Sú charakteristické vysokým pomerom hmotnosti k pevnosti, nízkou magnetickou permeabilitou, esteticko-hygienickým výzorom, odolnosťou voči korózií a vysokým teplotám. [4]

Rozdeľujeme ich do základných skupín podľa chemického rozloženia a štruktúry na martenzitické, feritické, austenitické a prechodové, ktoré sú prienikom jednotlivých skupín.

A podľa chemického zloženia – na chrómové, chrómo niklové, chrómo mangánové, ktoré môžu byť dodatočne legované prvkami molybdénu, medi, kremíku, titanu, nióbu, hliníku, dusíku a ďalšie. [2]

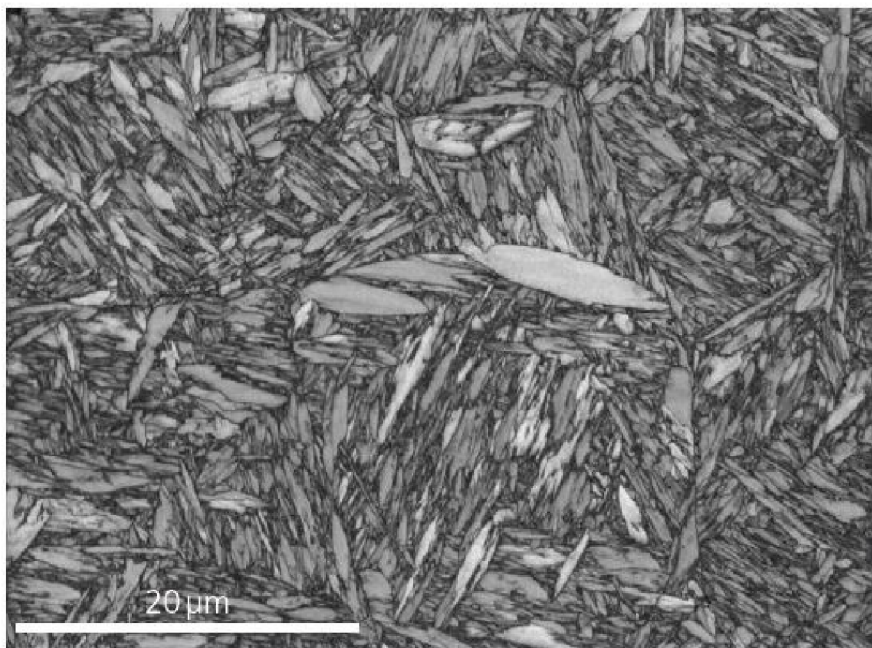
Aj keď sú v korozivzdorných oceliach vo veľkom zastúpení legujúce prvky, stále sa vo väčšej miere jedná o zliatinu železa a uhlíka - oceľ, ktorej legúry iba zvyšujú korozívnu odolnosť, ale nezabezpečujú ju úplne. Preto treba druh a chemické zloženie veľmi starostlivo voliť podľa konkrétneho druhu použitia pre styk s konkrétnymi látkami. [2]

Zliatinový účinok jednotlivých prvkov môžeme rozdeliť do dvoch hlavných skupín:

– Legujúce prvky, ktoré zväčšujú oblasť feritu. Nazývame ich feritotvorné a patrí medzi ne chróm, molybdén, kremík, titan, hliník, niób a berýlium, vanád, wolfrám. Ich rozpustnosť má výrazne širokú škálu, takže pri ich vyššom obsahu je veľké riziko vzniku intermediálnych fáz. Predstaviteľom tohoto javu je fáza sigma. [2]

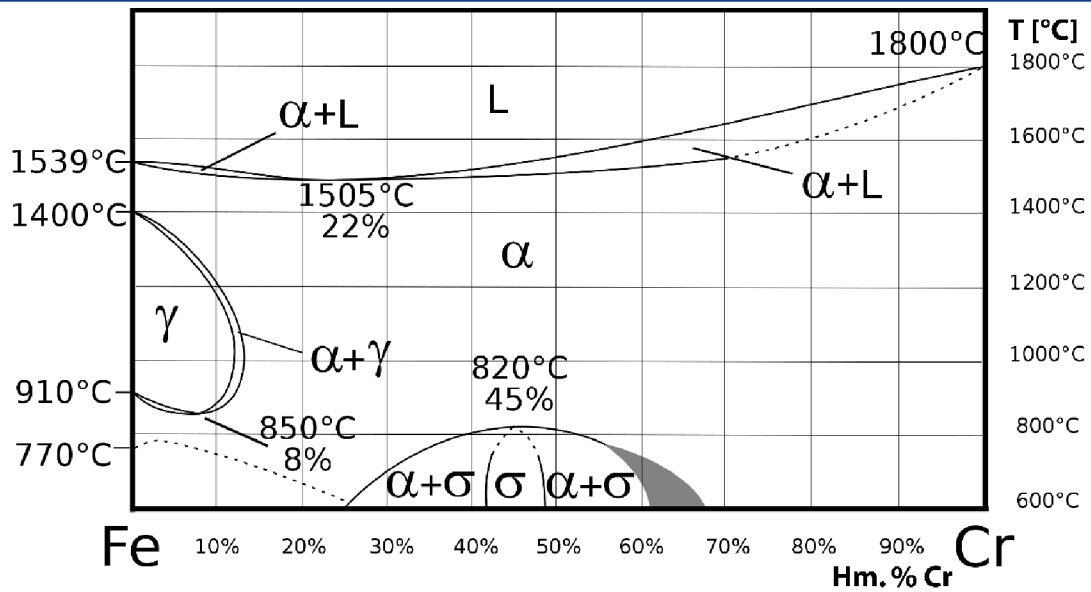
– Prvky, ktoré obohacujú rozvoj oblasti austenitu voláme austenitotvorné, ich hlavným predstaviteľom je nikel, a ďalšími prvkami sú uhlík, dusík, tiež mangán, meď, ktoré ale tvoria významnejšie intermediálne fázy a obsah austenitu rozširujú iba obmedzene. [2]

Uhlík na druhej strane s legujúcimi prvkami nevytvára odolné zliatiny, ale vytvára stabilné karbidy - Mn, Cr, W, Mo, V, Zr, Nb, Ta, Ti. Niektoré prvky netvorí jeden, ale tvoria viac druhov karbidov. Ďalšia skupina legujúcich prvkov naopak karbidy nevytvára – Ni, Si, Co, Al, N. Obsah uhlíku v nerezových oceliach však nestihne naviazať všetky prvky na karbidy, preto vznikajú prednostne tie, ktoré majú k uhlíku najväčšiu afinitu. [2]



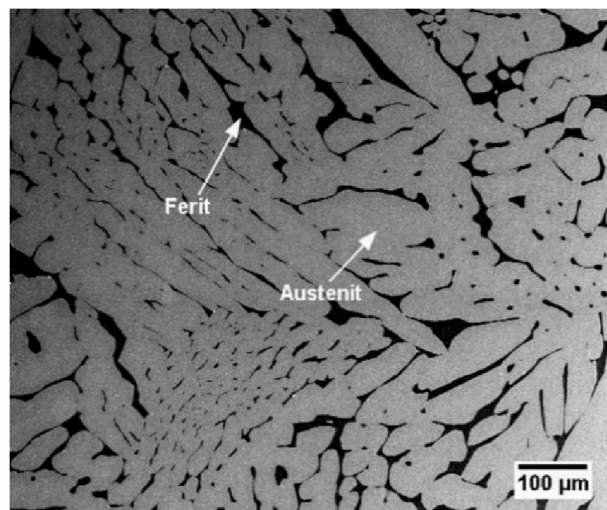
Obr. 3 - Mikroštruktúra martenzitickej nerezovej ocele [5]

Kaliteľné chrómové oceli Obr. 3 sú magnetické a môžu byť tepelne spracované do vysokej pevnosti, čo závisí od obsahu uhlíku. Zakaľovanie prebieha z teploty ohrevu okolo 1000°C vedúcemu k fázovej premene z austenitickej na martenzitickú štruktúru. Ich korozívna odolnosť je nižšia ako ocelí austenitických. Najväčšiu korozívnu odolnosť dosiahneme ich zakalením a popustením pri 200 – 300°C. Ich hlavne použitie je pre styk s koncentrovanými kyselinami - octovou, benzoovou, boritou, pikrovou, olejovou a ďalej s uhličitanmi, dusičnanmi, lúhmi, a síranom sodným a draselným. Ich korozivzdorná odolnosť pri znečistenom ovzduší nie je dobrá.



Obr. 4 - rovnovážny diagram železo – chróm [6]

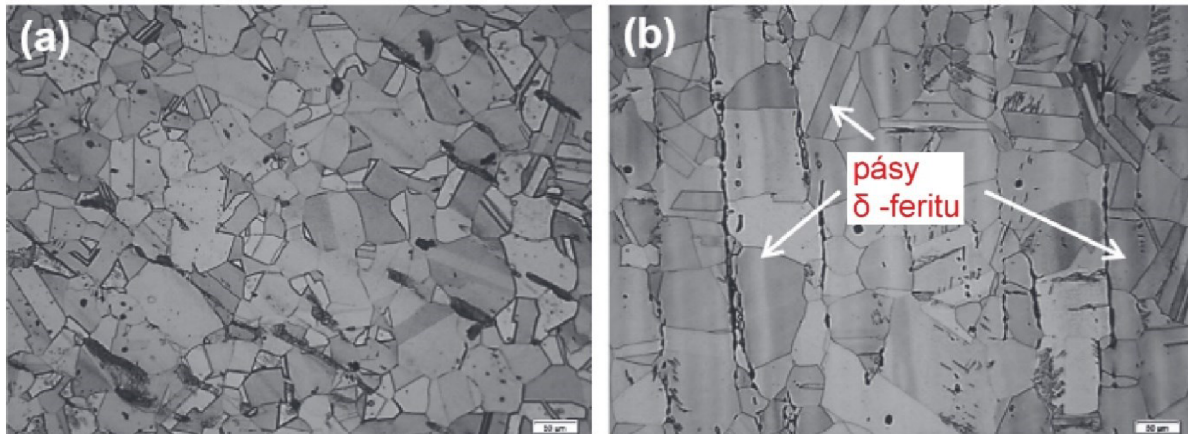
V zliatinách Fe-Cr, ktoré majú veľmi nízke koncentrácie uhlíku, hovoríme o feritických korozivzdorných oceliach, ktoré majú obmedzenú austenitickú fázu Obr. 5 asi na 12 % chrómu, Feritické korozivzdorné oceli preto obsahujú 12-30 % chrómu a nízky obsah uhlíku. Majú priestorovo strednú mriežku, sú ťažné, magnetické a ich pevnosť sa dá zvyšovať tvárnením za studena. Uplatňované sú v prostrediach s kyselinou dusičnou, ale aj v doprave, architektúre a vzduchotechnike. Nevyhovujú v prímorských oblastiach (dá sa riešiť pridaním molybdénu) navzdory tomu odolávajú riečnej a prúdiacej morskej vode, ale bez prítomnosti morských organizmov. Používajú sa v potravinárstve všade tam, kde je použitie chróm niklových ocelí zbytočne drahé, sú nevhodné pre zvarovanie, nad teplotou 1000 °C sa rapídne zvyšuje krehkosť na riziko vzniku medzikryštickej korózie, čo sa dá čiastočne eliminovať prísadou titanu alebo nióbu. Pri zložení nad 18% chrómu sú tieto oceli náchylné na zaťaženie vrubového charakteru a krehké pri bežných spôsoboch spracovania. [2]



Obr. 5 - Mikroštruktúra duplexnej oceli [7]

Po pridaní výrazného množstva niklu rozšírime oblasť austenitickej fázy a odstránime premenu na ferit alebo martenzit, vznikne tak stabilná alebo metastabilná austenitická fáza. Čím vyšší obsah niklu v oceli je, tým viac stabilný austenit dosiahneme. Pri obsahu pod 7% sa austenit ľahko premieňa na martenzit, najmä pri použití za nízkych teplôt alebo pri tvárnení za studena.

Pri obsahu nad 14% austenit pokladáme za úplne stabilný pre široké spektrum aplikácií. V prechodovom pásme od 9 do 14% ma na martenzitickú premenu výrazný vplyv obsah uhlíku a chrómu, pripadne ďalšie prídavné legúry. Nikel tiež prispieva k zvýšeniu korozivzdornosti v neoxidačných prostrediach. Austenitické oceli Obr. 6 majú z pomedzi ostatných druhov najlepšie korozivzdorné vlastnosti a je možné ich ešte zvyšovať pridávaním ďalších legúr, najmä molybdénu, medi alebo kremíku. Medzikryštalickú koróziu je možné ovplyvniť titanom a niobom. Dusík v rozmedzí 0.1- 0.2% má zasa na svedomí zvýšenie pevnosti a odolnosti proti bodovej a štrbinovej korózií. Síra, selén a meď vylepšujú obrobiteľnosť. [2]



Obr. 6 Rozdielna austenitická štruktúra oceli (a)1.4301 304 X5CrNi18-10, (b)1.4541 X6CrNiTi18-10 [8]

Široké spektrum typov austenitických ocelí vieme podľa zloženia rozdeliť na:

- Chróm-niklové – obsah 12 – 25% chrómu, 8 - 38% niklu, 0,01 – 0,15% uhlíku. Prídavné legúry: dusík, molybdén, meď a kremík. Stabilizácia: titan a niób. [2]
- Chróm-mangán-niklové – 12-22% chrómu, 5-12% mangánu, 3-8% niklu, 0,02-0,15% uhlíku. prídavné legúry: dusík, molybdén, meď, Stabilizácia: titan a niób. [2]
- Chróm-mangánové – 10-18% chrómu, 14-25% mangánu, 0,02-0,08% uhlíku. Prídavné legúry: dusík, molybdén, meď a kremík. Stabilizácia: titan a niób. [2]

Znižovaním obsahu niklu a zvyšovaním chrómu môžeme dosiahnuť prímies feritu pri chladnutí, čím vytvoríme austeniticko-feritickú štruktúru, ktorá ma za následok lepšie mechanické vlastnosti, zlepšenie odolnosti proti medzikryštalickej korózií. Výraze sa tým ovplyvni aj tvorba trhlín u liatych súčastí a zvarov. Zvarovanie je objektívne náročnejšie ako u austenitických ocelí, ale nie je nutné ich po zvarovaní dodatočne tepelne opracovávať. [2]

### 2.1.1 Vlastnosti legujúcich prvkov v súvislosti s korozivzdornými ocel'ami.

Chróm – Pôsobí ako feritotvorný prvok, je základnou zložkou všetkých korozivzdorných ocelí, znižuje oblasť Gama a stabilizuje fázu alfa. Zvyšuje odolnosť voči korózií v oxidačných prostrediach. [3]

Uhlík - Má vplyv na náchylnosť k medzikryštalickej korózií, je silne austenitotvorný prvok, ktorý austenit stabilizuje po tvárnení za studena. [3]

Dusík – silný austenitotvorný prvok, znižujúci odolnosť medzikryštalickej koróziie pri obsahu do 0.2%, zvyšuje pevnostné charakteristiky, má stabilizačný účinok na austenit pri tvárnení za studena. Zlepšuje odolnosť voči bodovej a štrbinovej korózií. [3]

Kremík – feritotvorný prvok, znižuje odolnosť voči vriacej 65% kyseline dusičnej a zvyšuje odolnosť voči koncentrácii viac ako 80% kyseliny dusičnej, v množstve 3- 4% odstraňuje medzikryštalickú koróziu, vyvoláva praskavosť zvarov. [3]

Molybdén – feritotvorný prvok, vo všetkých prostrediach výrazne zvyšujúci korozívnu odolnosť aj voči bodovej a štrbinovej korózii, podporuje tvorbu intermediálnych fáz. [3]

Meď – slabo austenitotvorný prvok, zlepšujúci obrobitelnosť, pri 3-4% zlepšuje odolnosť voči kyseline sírovej. [3]

Titan, niób – Karbidotvorný prvok, obmedzuje medzikryštalickú koróziu zvyšuje žiarupevnosť, niób zvyšuje praskavosť zvaru. [3]

Hliník – feritotvorný prvok, zvyšujúci žiarovú pevnosť [3]

Síra, selén, fosfor, olovo znižujú korozivzdornosť a zlepšujú obrobitelnosť [3]

Bór sa pridáva v malých množstvách, zlepšuje tvárnosť a zvyšuje žiarupevnosť. [3]

## 2.2 Korózia

Korózia je spôsob pôsobenia chemického alebo elektro-chemického porušenia materiálu, prevažne kontaktom plynými alebo kvapalnými látkami, pričom dochádza k oxidácií. Väčšina kovov je termodynamicky nestabilných, čo znamená, že sú reaktívne na podnety niektorých látok. Samovoľný proces korózie je proces prechodu do nižšej entalpie sústavy (termodynamického alebo chemického potenciálu). Stabilné sú naopak oxidy alebo sulfidy, vznikajúce na povrchu kovov, ktoré ako rudy v prvotnej forme získavania kovov nachádzame voľne v prírode. A vynaložením energie z nich získavame čistú formu kovov, čo má za následok energeticky bohatý stav kovu, ktorý nazývame metastabilný a má prirodzenú tendenciu sa dostať späť do stavu nižšej energie. [3]

Kovy ako zlato, striebro, platina nekorodujú a nemajú snahu reagovať s okolitým prostredím, alebo iba v obmedzenom množstve za agresívnych podmienok, preto sa udržiavajú v prírode po veľmi dlhú dobu v ich pôvodnej forme. Naproti tomu kovy vytvorené umelo v huti sú náchylné na koróziu. [2] [9]

Korózia postupuje vždy od povrchu do vnútra látky v závislosti na čase a koncentrácii kontaktu reaktívneho prostredia. Obmedziť koróziu teda môžeme voľbou materiálu, vytvorením ochranných povlakov, alebo úpravou korozívneho prostredia. [2] [9]

Celková korózia – je korózia prebiehajúca rovnomerne po celom povrchu materiálu, často je materiál vystavený elektrolytu a vplyvom prúdenia, alebo vplyvom rozdielneho elektrického potenciálu, môže byť korozívna rýchlosť vysoká. Jedná sa o menej nebezpečný druh korózie vzhľadom na mechanizmus korozívneho zaťaženia celej súčasti a je možné predpovedať jej vývoj. Často sa jedná o zaťaženie nerezových ocelí samotným médiom, pre ktoré je nádoba alebo zariadenie vyrobené. V danom prípade hovoríme o korozívnej rýchlosti, ktorú je možné experimentálne určiť a na základe toho predikovať trvanlivosť alebo životnosť daného zariadenia. [2] [9]

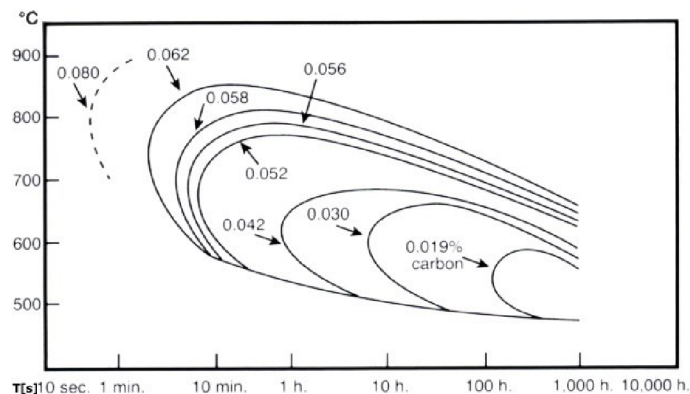
Jamková korózia – je rovnomerná korózia, ktorá čiastkovo vzniká na menších častiach povrchov a preniká do hĺbky, vzniká najmä u uhlíkových ocelí. [2] [9]

Bodová korózia – Je menší alebo väčší počet ojedinelých bodov, pre jej vznik musí byť dostatočná koncentrácia agresívnych aniónov a oxidačných činidiel. Dochádza k nej najmä v roztokoch obsahujúcich chlór, bróm, flór, jód alebo ich soli. Ku korózii primárne dochádza v mieste kontaktu s bodovo porušenou pasívnou vrstvou a postupne sa šíri do hĺbky. Môže to byť miesto vady materiálu, alebo nekovových vmiešanin vyúsťujúcich na povrch. Vplyvom takéhoto porušenia vzniká priestor pre zárodok, ktorý môže dlhú dobu za pohybov meniť svoj

stav iba nevýznamne, no napríklad za prerušenia prevádzky stroja sa podmienky v takto vzniknutej štrbine ustália a tento bod začne rásť autokatalytickým pochodom. Kde vznikne osamotená koróziívna sústava, ktorej deje napomáhajú k agresívnemu rastu korózie zvyčajne tesne pod vrstvou pasivovaných povrchových oxidov. [2] [9]

Štrbinová korózia – korózia prebieha v kapilárach alebo v miestach so zlým obehom okolitého prostredia. Štrbina je geometrický činiteľ, kde sa zdržiavajú agresívne roztoky. Vznikajú koncentračné články, ktoré v aktívnom stave urýchľujú koróziu. Mechanizmus sa od bodovej korózie líši v tom, že pri štrbinovej korózii záleží na akosti pasívneho filmu v štrbine. Koncentrácia korózneho prostredia vzniká aj na hladine, teda na okraji rozhraní kvapalina vzduch, alebo na okraji kvapky. Maximálne korózne napadnutie je badateľné bezprostredne za okrajom. Čím je štrbina viac otvorená a menej hlboká, tým klesá aj korózný potenciál danej lokality. Doba prejavu sa štrbinovej korózie je pomerne vysoká. [2] [9]

Medzikryštalická korózia – nerovnomerná, typicky prebieha v nevhodne tepelne ovplyvnených častiach pozdĺž hracie kryštálov, materiál preniká do hĺbky. Nekoroduje samotný materiál, ale rozhranie jednotlivých zŕn, ktoré sa najskôr popraskajú a neskôr dôjde k odlomeniu celých kusov kryštálu. Najčastejšie je napadnuté okolie zvarov, v ktorom došlo k zníženiu obsahu chrómu. Podliehajú jej najmä zliatiny u ktorých môžeme pozorovať starnutie pri ohreve, alebo pri spracovaní. Je možné jej predchádzať správnym tepelným spracovaním, vhodným zložením zliatin, alebo znížením obsahu uhlíku a v prípade korozivzdorných ocelí získaním dvojfázovej oceli. Oproti ostatným druhom ju pozorujeme iba lokálne na miestach, ktoré splňajú podmienky pre jej rast vplyvom štruktúrnych zmien a nešíri sa voľne ďalej po celom objeme, preniká do hĺbky a je schopná porušiť celý objem porušenej časti, na konci korozívneho procesu vzniká kryštalický prach, ktorý bol jedným z prvých zdrojov materiálu pre práškovú metalurgiu. Špeciálne náchylné na medzikryštalickú odolnosť sú austenitické nerezové oceli, ktoré môžeme pre zvarovanie popísať ako výdrž nad teplotou po určitú dobu, a je priamo ovplyvnená obsahom uhlíku. Závislosť na rôznych zloženiach uhlíku popisuje Obr. 7 **Chyba! Odkaz na záložku nie je platný.** pomocou C kriviek.



Obr. 7 Vplyv uhlíku na dobu vyvolania citlivosti na medzikryštalickú koróziu [10]

Ochranu pred medzikryštalickou koróziou môžeme zabezpečiť pridaním stabilizačných prvkov, ako titan, niób a znížením obsahu uhlíku, alebo dvojfázovou austeniticko-feritickou štruktúrou. [2] [9]

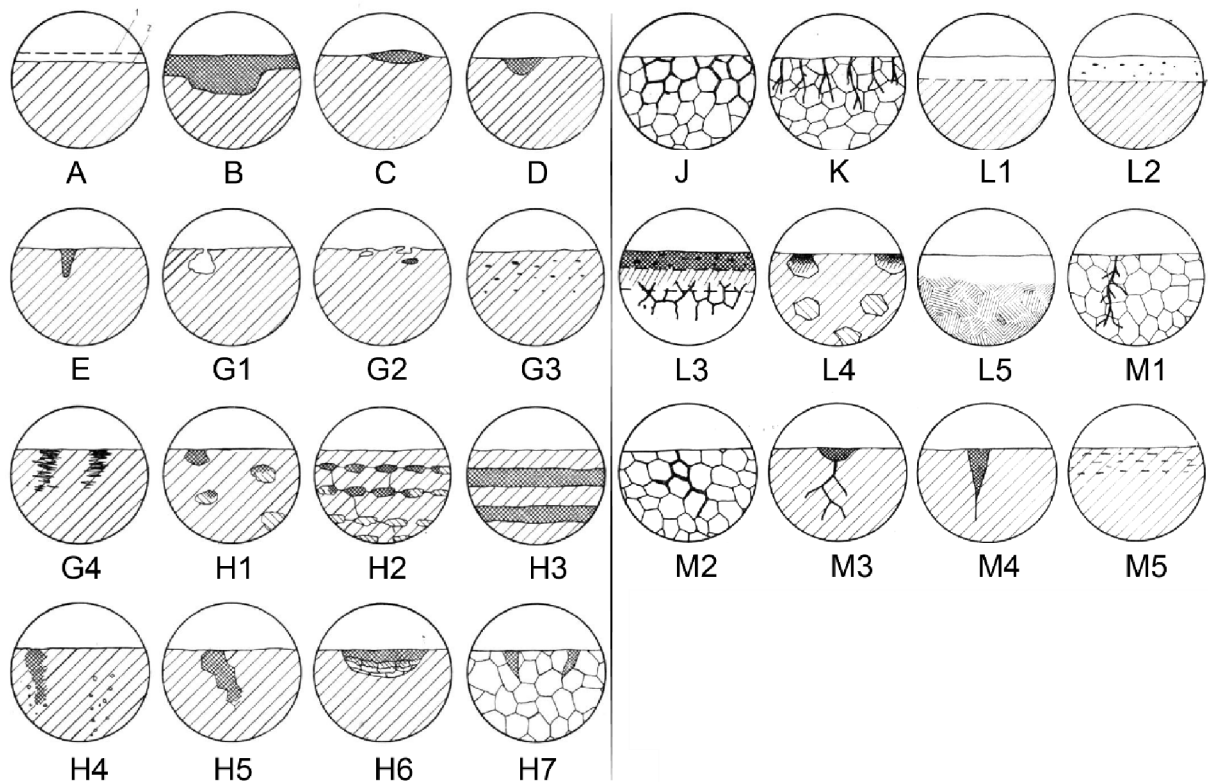
Korózia spôsobená napätím – veľmi nebezpečný druh korózie, ktorý prebieha aj v málo agresívnom prostredí. Je nepredvídateľný a často veľmi rýchly, jedná sa o súčasne chemické a silové pôsobenie, ktoré niekoľko násobne urýchľuje proces poškodenia, ktoré by samostatne prebiehalo veľmi dlhú dobu. Súčasne pozorujeme korozívne praskanie, ku ktorému dochádza medzikryštalicky, transkryštalicky alebo kombináciou oboch za stavu pôsobenia ťahového napätia. Napätia nemusia byť iba od vonkajších síl, ale spôsobuje ich aj vnútorné napätie po zvarovaní, tvárnení za studena alebo tepelného spracovania. Tiež je dokázané, že čisté kovy



odolávajú tejto korózii lepšie ako zliatiny a rovnako tak sú na túto koróziu náchylnejšie FCC mriežky kovov ako BCC, ktoré sú odolnejšie. Tiež platí, že rastúcou veľkosťou zrna materiálu rastie aj náchylnosť voči korozívnemu praskaniu. [2] [9]

Vibračná korózia – dochádza k nej pri styku dvoch plôch, ktoré sú budene voči sebe harmonickým kmitaním za prevádzky. Mechanizmus korózie má mechanický aj chemický charakter. Nastáva jak u súčiastok s voľným uložením, ale aj u súčiastok, kde je pevné uloženie s presahom. Na inicializáciu postačuje aj vzájomný mikro pohyb. V prvotnej fázy dochádza k tretiu medzi plochami (napríklad ložiska, plochami šroubov alebo matíc, čapov atď.) Najväčší chemický vplyv na vznik vibračnej korózie ma kyslík a vodná para. So zvyšovaním relatívnej vlhkosti je paradoxne vibračné opotrebenie znižované. Mechanizmus vzniku je predpoklad vzniku studených zvarov styčných plôch, ktoré sú vibráciou spôsobené, narušené a na základe narušenia vylomené z povrchu. Oxidácii napomáha aj lokálne zvýšená teplota vplyvom trenia. Proces takto pokračuje za vzniku ďalších oxidov, čo napomáha ďalšej korózii. [2] [9]

Druhý mechanizmus je pôsobením príľnavého oxidového filmu, ktorý sa vplyvom trenia na povrchu porušuje a oxidy sa usadzujú v priehlbínach. Vibračná korózia sa prejavuje u zlata aj u skla.



Obr. 8 Vzory základného korózneho napadnutia podľa typu: [11]

A – Celkové rovnomerné napadnutie; B – nerovnomerné napadnutie; C – flákové napadnutie;  
 D – jamkové napadnutie; E – bodové napadnutie; G – povrchové napadnutie; H – selektívne  
 napadnutie; J – medzikryštalové napadnutie; K – transkryštalové napadnutie; L – extrakčné  
 napadnutie; M – korózne trhliny a lomy

### 3 TEÓRIA VZNIKU ZVAROVÉHO SPOJA

Zváraním nazývame nerozoberateľné spojenie materiálu, vytvorené pomocou sústredeného tepla alebo tlaku. Spojenie nastáva na medziatomárnej úrovni pôsobením medziatomových síl jednotlivých atómov aktivovaných teplom, tlakom do roztavenej fáze alebo do plastického stavu. [4]

Základný princíp zvárania tiež môžeme popísať ako zmenu skupenstva tuhej fázy látky na kvapalnú fázu, premiešaním a následným ochladnutím naspať do tuhej fázy vznikne jedno kontinuálne teleso, ktoré nazývame zvarenec.

V pôvodnom slova zmysle bolo možné zvarovať najmä kovy, no z odstupom času a príchodom novej technológie môžeme hovoriť aj o zváraní dreva a plastu. V tomto prípade hovoríme o definícii zvarovania, ako o molekulárnej väzbe medzi jedným a druhým materiálom vzniknutej trením, alebo vysokým tlakom. Tomuto typu zvarovania sa v práci nebudeme zaoberať a je spomenutá pre úplnosť. [4]

Ďalšou odnožou zvarovania je navarovanie, čo je tiež istá forma zvarovania, kedy sa na určitú časť súčasti cielene pridáva materiál formou zvaru, slúžiaceho na doplnenie chýbajúceho objemu spôsobeného opotrebením, koróziou alebo inou formou poškodenia východzej súčasti. Ďalšou možnosťou je požadovanie iného chemického zloženia na niektorých plochách súčasti z dôvodu znižovania nákladov. [4]

Zvarovanie je považované za nosnú technológiu súčasnej strojárenskej výroby. Zvarované súčasti čiastočne nahrádzajú odlievané súčasti a urýchľujú proces výroby, vďaka normalizovaným polotovarom najmä plechom, ktoré môžu substituovať značnú časť odliatkov. Ďalším využitím je vytváranie veľkých výrobných technologických konštrukcií chemického a potravinárskeho priemyslu, potrubí, tlakových nádob v stavebníctve. A veľká časť zvarových spojov sa zameriava na opravy, čo je z pohľadu ostatných metód strojárenskej technológie výnimočné. [4]

Poznáme niekoľko mechanizmov vytvorenia zvarovaného spojenia, a to formou vznikajúceho tepla, tlaku alebo trenia. Najdokonalejšou teoretickou metódou zvarovania je priblíženie dvoch kovových plôch vzájomne k sebe na medziatomárnu vzdialenosť, na asi  $5 \cdot 10^{-8}$  cm, kedy by vznikol spoj takmer bez akéhokoľvek ovplyvnenia vlastností pôvodného materiálu. A styková plocha by úplne zmizla. [3]

Keďže najväčšie vyrobiteľne rovinatosti opracovanej plochy sú v rozmedzí  $10^{-4}$  až  $10^{-6}$ , je týmto spôsobom možné vytvoriť iba čiastočné prilnutie s množstvom nedostatočne prepojených miest, ktoré nevedú k dokonalému spojeniu. [3]

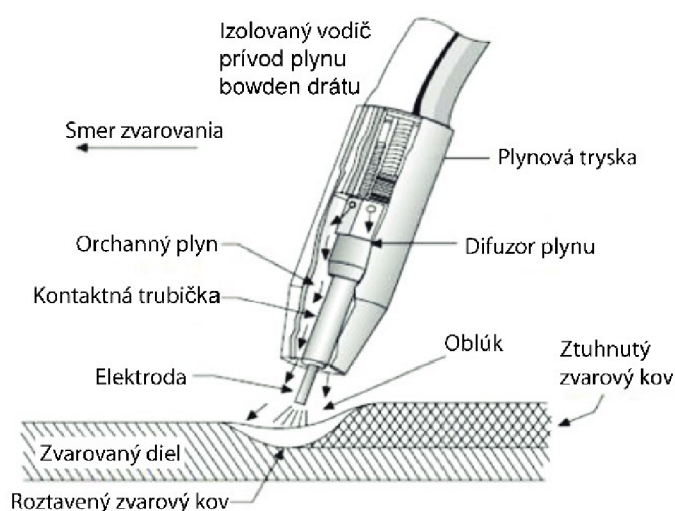
Pre zváranie je preto nevyhnutné zvarovému spojeniu dodať aktivačnú energiu, ktorá má za úlohu prekonať bariéru potenciálnej energie, ktorá je spôsobená napríklad znečistením a vzdialenosťou medzi zvarovanými plochami. Existujú 3 možnosti ako toho dosiahnuť :

- **Termicky - tavné zvarovanie** [4]  
K spojeniu dochádza prostredníctvom roztaveného kovu. Medzi metódy termického zvarovania patrí: zvarovanie plameňom, plazmou, laserom, zväzkom elektrónov a elektrickým oblúkom.
- **Termomechanicky – tlakom** [4]  
Plastickou deformáciou teplom zmäkčeného kovu.
- **Mechanicky - tlakom za studena** [4]  
Spojenie deformáciou v tuhom stave.

### 3.1 Zvarovanie elektrickým oblúkom metódou MIG/MAG – 135

Zvarovanie metódou MIG/MAG je jedna z najproduktívnejších metód zvarovania elektrickým oblúkom v inertnej alebo aktívnej atmosfére plynov. Patrí jednoznačne k najpoužívanejším metódam na zvarovanie ocelových konštrukcií a jedná sa o jednu z najproduktívnejších metód, je možné ňou zvarovať takmer všetky druhy materiálov. [4]

Princíp metódy spočíva v horení elektrického oblúku medzi taviacou sa elektródou a základným zvarovaným materiálom. Celý proces prebieha v ochrannej atmosfére aktívneho alebo inertného plynu. Elektródu tvorí drôt, ktorý je navinutý na cievke umiestnenej vnútri alebo mimo zvarovacieho zdroja. Drôt je podávaný 2-4 kladkovým mechanizmom s profilovanou drážkou, ktorý vytvára rovnomerný pohyb drôtu von z horáku zváračky. Prídavné materiály sa predávajú v cievkach s hmotnosťou o 5, 15 až do 50kg drôtu pre vysoko produktívne robotizované pracoviská. [4]



Obr. 9 Schéma horáku metódy MIG [12]

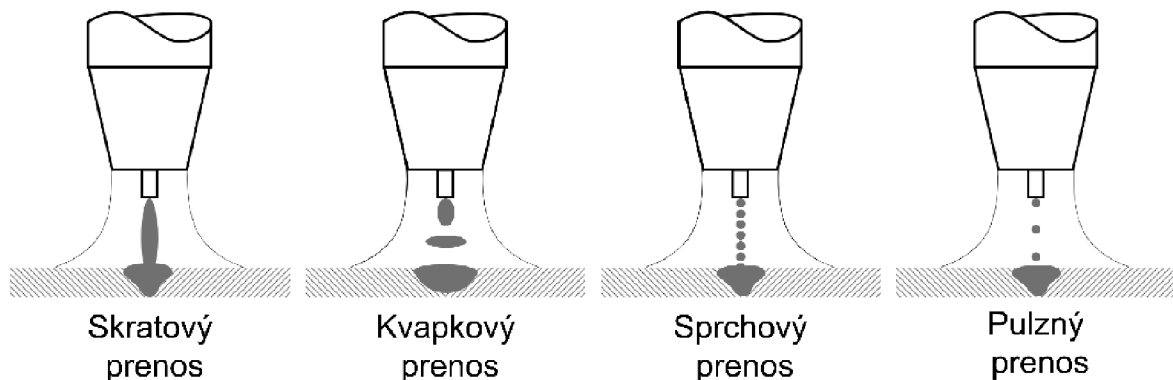
#### 3.1.1 Metódy prenosu zvarového kovu

Pri zvaraní MIG rozoznávame štyri základné metódy prenosu zvarového kovu. - skratový, kvapkový, sprchový a pulzný. Pri zvaraní MIG cez zvarovací horák vedieme elektródu z drôtu a spolu s ochranným plynom - zvyčajne je to zmes argónu prípadne CO<sub>2</sub>. Materiály sa začnú spájať, keď sa medzi drôtom (elektródou) a zvarovým rozdielnym elektrickým potenciálom kovu a základným materiálom vytvorí oblúk. Rôzne spôsoby prenosu spočívajú v tom, že sa zvarový kov z odtavovanej elektródy cez oblúk prenáša na základný materiál. Na zváračke však nie sú žiadne nastavenia na výber spôsobu prenosu, pretože každý osobitý spôsob sa dosahuje nastavením napätia a prúdu (rýchlosti podávania drôtu) a použitím vhodnej zmesi ochranného plynu. Pulzný prenos je jedinou výnimkou, pretože sa jedná o pokročilú metódu riadenia a nie o jednoduchý čistý zvarový oblúk. Je potrebné mať zdroj, ktorý umožňuje použiť túto metódu a tiež aj správny podávač drôtu, spolu so zmesou ochranného plynu s obsahom argónu aspoň 80% [4]

Najbežnejším typom prenosu je **skratový prenos** kovu, ktorý používame na bežné aplikácie, ktoré nevyžadujú zvláštne kvalitatívne opatrenia, pretože je prirodzene najjednoduchší na kvalitu zvarovacieho zdroja. Stabilný proces zvarovania dosiahneme, keď bude rýchlosť podávania prídavného drôtu v rovnováhe s rýchlosťou jeho skratového odtavovania, ak je táto rovnováha porušená, môže dôjsť k rýchlemu podaniu drôtu a k vytvoreniu skratu v kontakte s tavnou vaňou za vzniku širokého rozstriečnutia roztaveného kovového materiálu. [4]

Mechanika skratového prenosu spočíva v prvotnom zapálení oblúku blízkym kontaktom kladného a záporného pólu, kedy sa za prítomnosti ochrannej atmosféry vznikne horiaci prúd elektrónov v ochrannej plynnej atmosfére, v priebehu horenia oblúku je aktivovaný posuv drôtu, kedy za miernej tvorby kvapky kovu na konci drôtu (elektrody), ktorá sa vplyvom posuvu približuje roztavenej zvarovej vane až do stavu, kedy sa kvapka dotkne zvarovej vane a nastane skratový prenos kvapky za prudkého nárastu zvarovacieho prúdu a odtavenie ďalšej časti drôtu za vzniku novej kvapky na jeho konci a takto proces pokračuje ďalšou tvorbou kvapky vyústenej do skratového prenosu. Tento druh prenosu spoľahlivo funguje za širokého spektra parametrov [4]

Skratový prenos môžeme ďalej rozšíriť na skratový prenos s krátkym oblúkom a zrýchlený skratový prenos s krátkym oblúkom, princíp je rovnaký ale zmenou parametrov napätia na hodnotu 14-25V dosahujeme rýchlejšej tvorby kvapiek, ktoré sú menšie, oblúk horí bližšie k zvarovému kovu, čiže sa vytvára väčší počet menších kvapiek v rádoch stoviek za sekundu oproti bežnému skratovému prenosu. [4]



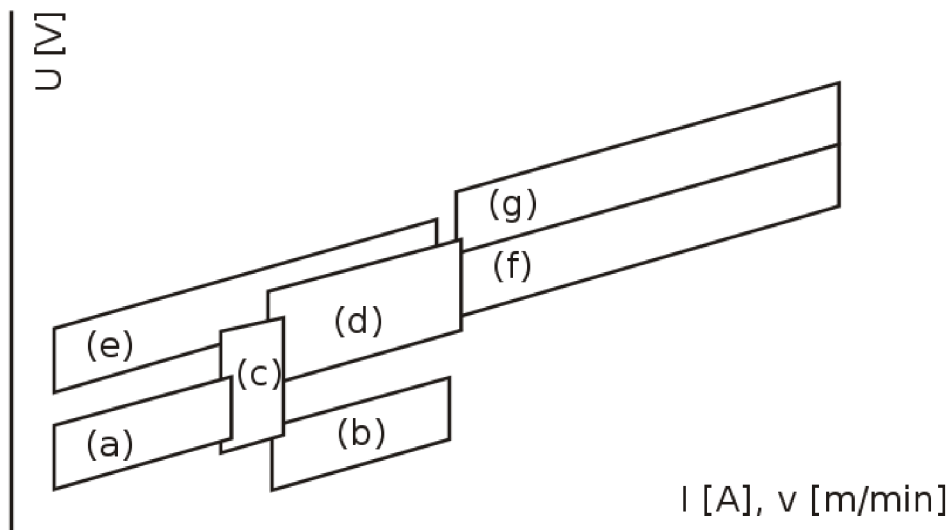
Obr. 10 schémy prenosu zvarového kovu. [13]

Bezskratový prenos je spôsob prenosu zvarového kovu, v ktorom sa zamedzuje alebo aspoň výrazným spôsobom obmedzuje vznik skratu. Patrí medzi nich kvapkový prenos, sprchový prenos, pulzný prenos, rotačný prenos a moderovaný prenos. Spôsob k akému typu prenosu dochádza je stanovený tranzitným prúdom, ktorý pre rôzne zmesi plynu a priemery elektród naberá rozdielnych hodnôt. Tieto hodnoty sú empiricky overené. [4]

**Kvapkový prenos** je pozorovaný pri vyšších hodnotách napätia v rozsahu 22 – 28V. Prúd sa pohybuje na úrovni 190 – 300A, kvapky majú väčší priemer ako samotná zvarovacia elektróda a pri zvarovaní nižším prúdom, sa kvapky oddeľujú pomocou gravitácie. Čím je ale prúd väčší, veľkosť kvapiek sa úmerne znižuje a zrýchľuje sa aj frekvencia oddeľovania kvapiek od elektródy. Kvapka je vychyľovaná z osy zvarovej elektródy a je vymrštená k zvarovej vane, frekvencia vymrštenia je približne 5-40 kvapiek za sekundu. Kvapky nezaručujú 100% bezskratový prenos zvarového kovu. Keď už k samotnému skratu dôjde, dochádza k masívnemu vymršteniu materiálu zo zvarovej vane do okolia. [14]

**Sprchový prenos** zvarového kovu pozorujeme pri prúdových hodnotách 200 až 500A a pri napätí 28-40V. Na zvarovanie týmto spôsobom je nevyhnutné použiť argón a jeho zmesi s CO<sub>2</sub> alebo s O<sub>2</sub>. Použitím samotného CO<sub>2</sub> je tento prenos nerealizovateľný, vysoké povrchové napätie kvapiek neumožňuje vznik malých kvapiek krátko za sebou. Vďaka použitiu argónu je elektrický oblúk zapálený vo veľmi blízkom okolí zvarovej elektródy, ktorú natavuje postupne tak, že dochádza k jej postupnému zúženiu z plného priemeru, zúženie vyúsťuje do malých rýchlo oddeľujúcich sa kvapiek. Sprchový prenos generuje vďaka vysokým prúdom hlboké závary a dobre prehriaty materiál, ktorého prievar rastie lineárne s nárastom hodnoty prúdu. Priebeh prúdu je konštantný, iba v prípade porušenia horenia dochádza k jeho krátkemu

navýšení a podporuje ďalšie horenie oblúku, oblúk horí kľudne a prejavuje sa jemným syčaním s občasným prerušením. Jedna sa o vysokovýkonnú metódu zvarovania v spotrebe materiálu 3- 15 kg/hod. Prednosťou je, že húsenica ma čistý a hladký povrch s plynulým prechodom do základného materiálu. A v jej okolí sú minimálne stopy od rozstriku materiálu. Obmedzením je najvhodnejšia poloha zvarovania PA, pretože sprchový prenos vytvára pomerne masívnu zvarovú kúpeľ. A len výnimočne sa dá použiť v iných polohách. [4]



Obr. 11 Pracovné oblasti jednotlivých metód prenosu v závislosti prúdu na napätí a rýchlosti [4] podávania drôtu, (a) skratový prenos, (b) zrýchlený skratový prenos, (c) prechodový – kvapkový prenos, (d) sprchový prenos, (e) impulzný prenos, (f) moderovaný prenos, (g) rotujúci sprchový prenos

**Impulzný prenos** - oblasť parametrov a použitia sa prekrýva so skratovým, bezskratovým a kvapkovým prenosom, je to zvláštna forma bezskratového prenosu. Jedná sa o riadený proces prenosu kovu, ktorý sa pravidelne opakuje po dobu jedného impulzu, t.j v prípade skratového prenosu by sa jednalo o časový úsek od skratu po ďalší skrat. Oblúk je zvarovacím zdrojom udržiavaný tak, aby bola zabezpečená stabilná ionizácia oblúku v rozmedzí prúdu 20-50A. Pri následnom pravidelnom zvýšení prúdu nad kritickú hranicu dochádza k prenosu kvapky kovu do zvarovacej vaňe, prúd následne klesá na hranicu udržiavania elektrického oblúku, čím sa výrazne znižuje energia vnesená do zvarovanej súčasti. Celý proces sa riadiacim mechanizmom opakuje v cykloch. Dosiahnutím ideálnych parametrov sa dosiahne pri oddelení rovnakej kvapky prídavného materiálu pri každom impulze, rovnako tu platí pravidlo, že rýchlosť podávania drôtu musí byť rovnaká, ako rýchlosť tavenia elektródy, metóda je náročná na stabilitu dĺžky vysunutia elektródy, ktorá v prípade nedodržania konštantných parametrov nesedí do frekvencie zvarovacích impulzov. Ďalším dôležitým aspektom je udržiavanie konštantnej veľkosti kvapky, ktorá je závislá na frekvencii impulzov a na veľkosti prúdu, čím menší je zvarovací prúd, tým musí byť nižšia aj frekvencia a naopak. [4]

Hodnoty šírky impulzu sa vo všeobecnosti pohybujú v rozmedzí od 0,2 do 5ms a frekvencia impulzov v rozmedzí 25- 500 Hz. S príchodom priemyselného zavedenia mikroprocesorového riadenia, impulzne zvarovanie umožňuje nastavenie iba jedného východzieho parametra zvarovania, na základe ktorého potom systém nastaví prípadne dynamicky upravuje parametre prúdu a napätia, rýchlosť podávania drôtu a všetky ostatné parametre impulzacie prúdu. Dôležitú úlohu pri takto riadenom zvarovacom stroji sú správne výrobcom nastavené parametre, čo uľahčuje prácu zvaračovi, ale kladie dôraz na kvalitu štatistického výpočtu výrobcu. [4]

Medzi hlavné prednosti impulzného zvarovania patri zvarovanie tenkých plechov a zvarovanie v polohách, ktoré napríklad sprchový prenos nepodporuje. Je možné použiť aj vysoké prúdy pre hrubé materiály s vysokou produktivitou s veľkými priermi prídavného drôtu, zatiaľ čo povrch zvaru stále zostáva jemný. Produktivita tohoto modelu zvarovania je v rozmedzí 2-5 kg/hod. [4]

**Moderovaný prenos** kovu môžeme pozorovať pri hodnotách zvarovacieho prúdu 450-750A a napätie v rozmedzí 40-50V. Závar zvarovej húsenice je pomerne hlboký voči jeho šírke. Pri takto energeticky vysokom výkone zvarovania musí byť rýchlosť podávaného drôtu a rýchlosť zvarovania tiež na pomerne vysokých hodnotách. Produktivita pri tejto metóde dosahuje 25kg/hod [4]

**Rotujúci prenos** používa parametre v rozmedzí prúdu 450-750A, ale vyššie napätie na úrovni 65V Drôt je z hubice vysunutý viac ako 20mm, rotujúci oblúk je možné imitovať rotáciou zvarovacej hubice. Mechanizmus rotácie spočíva v pôsobení vysokého prúdu a dlhého vysadenia elektródy, ktorá je zahriata takmer na teplotu tavenia, zatiaľ čo magnetické pole pôsobiace na plastický koniec drôtu spôsobuje rotáciu a spôsobuje kužeľovú plochu vrchnej vrstvy zvaru. Vytvára sa tak veľmi pozvoľný nábeh na základný materiál so širokým a hlbokým závarom. [4]

**STT, CMT, ColdArc® RMD™** Prenos riadeným povrchovým napätím je riadený proces skratového prenosu zvarovania inšpirovaného impulzným prenosom, vyvinula ho firma Lincoln Electric Company, pri tomto princípe nie je nastavované napätie ani prúd, ktoré sú závislé na dĺžke horiaceho oblúku, ale na zariadení sa nastavuje iba rýchlosť posuvu drôtu a vnesené teplo. Základný prúd oblúku sa drží na udržiavacích 50-100A a voltamperova charakteristika sa mení na základe aktuálnych zvarovacích parametrov, zvarovanie prebieha v uzavretej slučke so spätnou väzbou, ktorá zvarovaciemu stroju umožňuje rozpoznať, čo sa v reálnom čase deje. Výhoda zvarovania pomocou metódy STT je výrazné zníženie vneseného tepla, ktoré môže nepriaznivo ovplyvňovať mikroštruktúru materiálu a spôsobovať zhrubnutie zrna. [15]

### 3.1.2 Zvarovacie plyny pre korozivzdorné oceli

Úlohou ochranných plynov pri zvarovaní je zabrániť kontaktu roztaveného materiálu s okolnou atmosférou, ktorá by ihneď reagovala pre prírodu prirodzeným spôsobom - tvorbou oxidov, karbidov a bujarou tvorbou pórovitosti, prepaľov a naplynením.

Pre zvarovanie korozivzdorných oceli metódou MAG/MIG sa používa argón s aspoň 2 % zmesou inertného plynu CO<sub>2</sub> (maximálne do 20 % zvyšujúca hodnota CO<sub>2</sub> spôsobuje stabilizáciu oblúku) alebo aktívneho O<sub>2</sub>, oblúk horí pokojným oblúkom a čiastočne obmedzuje rozstrik, ich obchodné názvy sú STARGON C2 a STARGON O2

Na ochranu zvarového koreňa sa používajú keramické alebo meďenné príp. hliníkové podložky, ktoré chránia koreň zvaru. Ďalej sa koreň zvaru ochraňuje argónom, alebo argónom s prídavkom vodíka, prípadne ekonomická varianta dusíka s pridaním vodíka.

Ochranné plyny sa predávajú v zmesiach, alebo pokiaľ to je možné tak čisté, ale častokrát čistý plyn nemá tak dobré požadované vlastnosti, ako plyn zmesný. Najčastejšími predávanými zmesami sú : CO<sub>2</sub>(čisté), argón (čistý), hélium Ar + CO<sub>2</sub> (až do 25 % CO<sub>2</sub>), Ar + CO (až do 3 % CO), Ar + O<sub>2</sub> (až do 8 % O<sub>2</sub>), Ar + O<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub> (až do 15 % CO<sub>2</sub>, 5 % O<sub>2</sub>), 65 % Ar + 26,5 % He + 8 % O<sub>2</sub> + 0,05 % O<sub>2</sub>, Ar + 8 % CO<sub>2</sub> + 0,03 % NO.

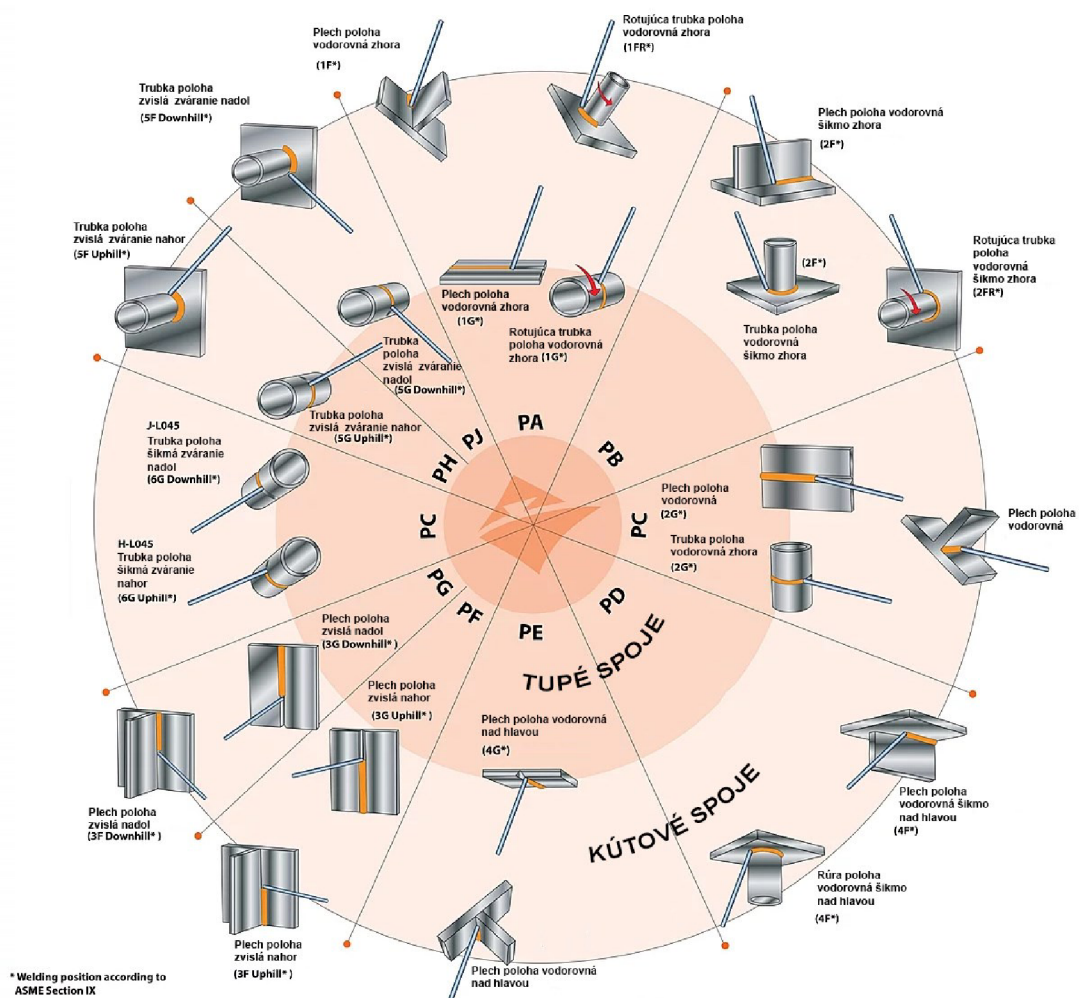
Argón – Je chemicky inertný, nehorľavý netoxický inertný plyn, vyznačuje sa dobrou tepelnou vodivosťou a nízkou ionizačnou energiou (15.76 eV), vďaka čomu sa v ňom veľmi dobre zapája elektrický oblúk. Je 1,4x ťažší ako vzduch, čo treba zohľadňovať pri použití ochrany koreňa, jeho hustota je 1,784 kg/m<sup>3</sup> [4]

Hélium – Je inertný plyn ľahší ako vzduch s hustotou  $0,178 \text{ kg/m}^3$ , oproti argónu má nízku hmotnosť a je ľahší ako vzduch, tiež má aj nízku hustotu. Z pomedzi zvarovacích plynov má najväčšiu ionizačnú energiu (24.56 eV), vďaka čomu sa používa na stabilizáciu oblúku, zvýšenie závaru alebo zvýšenie rýchlosti zvarovania. [4]

Kyslík – Je nehorľavý plyn podporujúci oxidáciu, ťažší ako vzduch s hustotou  $1,429 \text{ kg/m}^3$ , množstvo pridávané do zmesi plynov nepresahuje 8%, kyslík zlepšuje tekutosť zvarovej vane, vďaka tomu zlepšuje odplynenie a zlepšuje prechod do základného materiálu a profil zvarovej húsenice. [4]

Oxid uhličitý - je nehorľavý bezfarebný plyn bez chuti a zápachu, hustota je  $1.976 \text{ kg/m}^3$  je ťažší ako vzduch, pri jeho koncentráciách nad 15 % je nebezpečný. Vyznačuje sa výbornou teplotou vodivosti a vysokým prenosom tepla do zvarovej vane. [4]

### 3.1.3 Polohy pri zvarovaní



Obr. 12 Základné polohy pri zvarovaní podľa EN ISO 6947:2011 [16]

Zvarovanie v jednotlivých polohách popisuje norma ČSN EN ISO 6947, ktorá rozlišuje zvarové spoje podľa dostupnosti a náročnosti prevedenia, ktoré ovplyvňujú kvalitu zvaru nezávisle na kvalite zvarača, t.j keď je zvarač kvalifikovaný na zváranie v polohe PA, PB na najlepšej nožnej úrovni, nemusí to znamenať, že rovnaký zvar je schopný dosiahnuť v polohe PD alebo PE, kde pôsobia voči tavnej vane presne opačné sily, ako v prípade zvarovania v polohe PA a stabilita zvarovacieho procesu sa rapídne zhoršuje. [4]

### 3.1.4 Zvarové spoje

Zvarové spoje zvyčajne volí konštruktér na základe zaťaženia a technolog na základe možnosti zvariteľnosti materiálu a vybavenia dielne navrhne technologický postup, ktorý zaväzuje zvárača ho dodržať. V prípade výroby súčastí, ktoré neupravuje norma - zväčša hobby aplikácie alebo výroba nízkej úrovne odbornosti, môže tieto tri pohľady na zvar uplatniť samotný človek, ktorý zvaruje (nehovoríme priamo o zváračovi, ktorého označenie upravuje norma ako o osobe, ktorá musí splniť aspoň základný zváračský kurz.), často na základe pocitu alebo nejakých predchádzajúcich empirických skúsenosti rôznej úrovne. Z hľadiska zvarovania sa pozeráme na prevedenie zvarového spoja, nie na definovanie jeho zaťaženia. [9]

Zvárač, ktorý je oprávnený zvarať danú súčasť, pokiaľ názorne podľa výkresu určí o aký tvar zvarovaného spoja sa jedná, nastaví parametre zvarovania odporúčané podľa WPS alebo empiricky, prípadne skúšobným vzorom. Jednotlivé typy zvarových spojov a typy ich prípravy určuje norma ČSN EN ISO 9692-1. [17]

Tupý zvar – je veľmi výhodný pre dynamické aj statické konštrukcie, je v ňom zachovaný plynulý silový tok. Spoj vzniká priložením na tupo dvoch dielov k sebe s možnosťou použitia úpravy úkosom, osadením alebo lemom v prípade tenkého plechu. Zvar je možné vytvoriť jednostranne s úkosom 1/2V, 1/2Y, 1/2U alebo obojstranne na tupo I a s úkosmi V, X na oboch stranách [4] [9]

Kútový a rohový zvar – je menej pevný zvar z hľadiska osového zaťaženia, zvarové dielce sa prikladajú kolmo k sebe a zvarové plochy sa často neupravujú, špeciálne aplikácie si vyžadujú výbrus koreňa zvaru a prevarenie z druhej strany, prípadne sa upravuje tupá časť zvaru s úkosom do U alebo V. Pokiaľ to aplikácia umožňuje, odporúča sa zvarovať z oboch strán na obmedzenie vplyvu ohybového momentu. [9]

Preplátované typy zvaru sú špeciálnym použitím kútového zvaru, kedy sa vytvorí podobný zvar tupému, ale zvar je umiestnený na čele jednej platne z jednej, prípadne z oboch strán. [9]

Dierové alebo žliabkové zvary vzniknú použitím preplátovaného spoju, ktorý je zvarový z valcového otvoru alebo z kapsy, nie z bočnice, ako je tomu u preplátovaného zvaru. [9]

Bodový a švový zvar je špecifický, nie pre oblúkové, ale odporové zvarovanie, kedy dochádza k spojeniu a premieseniu materiálu dvoch súčastí prostredníctvom tepla a tlaku. Tlak je vyvinutý buď roľnou alebo prítlačným kolíkom, teplo je vytvorené prechodom elektrického prúdu a vplyvom veľkého odporu v mieste kontaktu. Často je vo veľkom používaný v karosárstve v automobilnom priemysle. [9]

## 3.2 Zvariteľnosť korozivzdorných ocelí

Zvariteľnosť martenzitických ocelí je pomerne obťažná z dôvodu vysokého obsahu uhlíka a kvôli bohatej tvorbe karbidov a zakaliteľnosťou martenzitickej štruktúry, ktorej dôsledok môže byť studené praskanie. [3] [2]

Feritické nehrdzavejúce oceli majú pomerne úzku húževnatosť, čo je dôsledok hrubnutia zrn v podhúsenicovej zóne. Tiež v nich neprebíha premena železa Alfa -> Gama -> Alfa takže nie je možné tepelnou úpravou ani čiastočne meniť veľkosť zrne príp. štruktúru materiálu.

Zvarovanie austenitických a austeniticko-feritických ocelí nepredstavuje špecifické problémy, ako vplyv krehnutia čepele ovplyvneného základného materiálu. Je potrebné dávať zvýšený pozor na náchylnosť k medzikryštalickej korózii a praskanie zvarových spojov pri vysokej teplote viac ako 1200 °C. [3] [2]

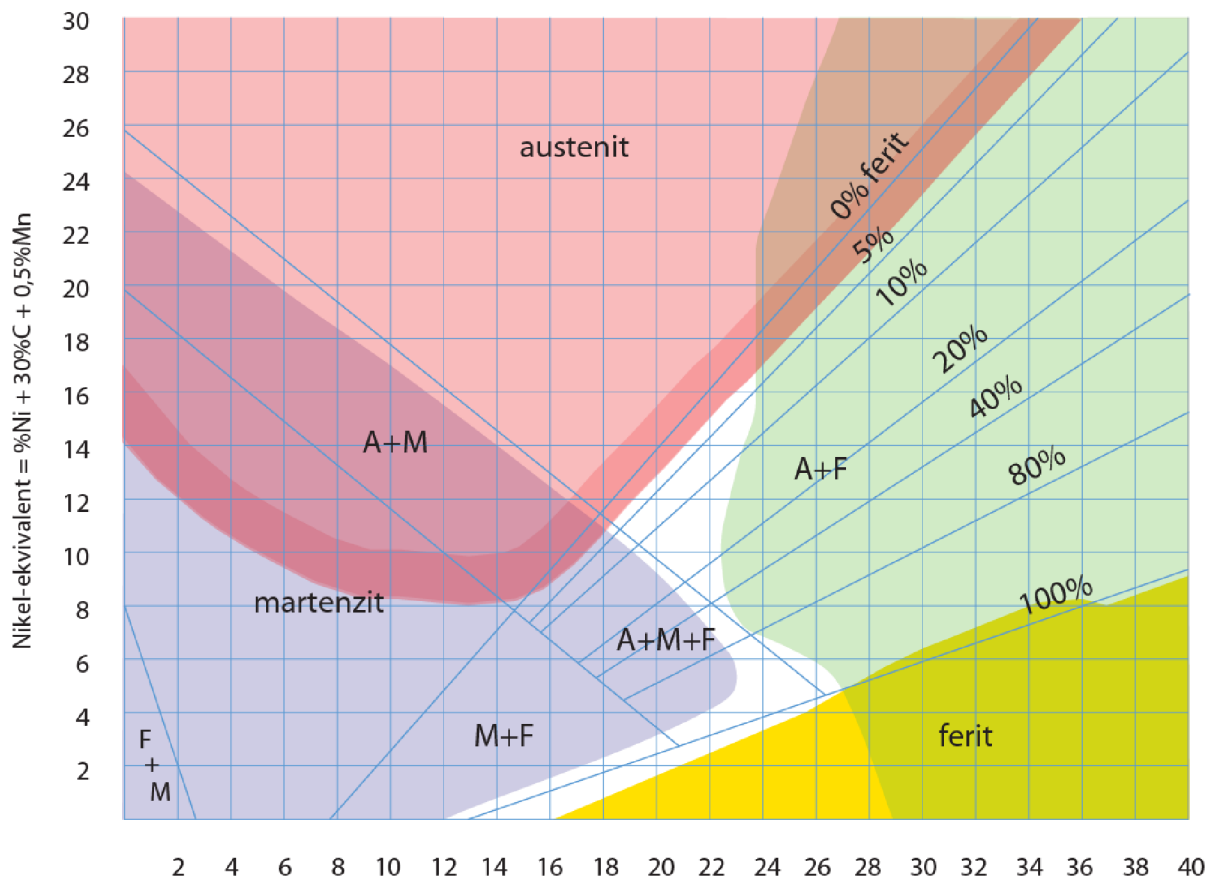
Nerezové oceli zvaráme takmer všetkými oblúkovými procesmi zvarovania, ale aj elektrónovým a laserovým lúčom, prípadne trením. [3] [2]



Odstraňovanie okují, strusky a oxidových farieb spracovávame mechanicky, alebo chemicky, mechanicky je vhodné ho vykonávať medzi každou operáciou či už pri viacvrstvovom zvaru alebo po dokončení zvarovania. Odporúča sa tiež odstrániť malá povrchová vrstva, ktorá sa vplyvom zverovania ochudobní o legujúce prvky (špeciálne chróm pod úroveň 12 %) za vzniku povrchových oxidových vrstiev legujúcich prvkov, čo tiež môžeme vnímať ako indikátor, ako moc prehriaty zvar bol. [18]

### 3.2.1 Schaefflerov diagram

Pre objektívne posúdenie množstva a dopadu použitia austenitotvorných a feritotvorných prvkov na výslednú štruktúru ocelí, hodnotíme graficky prepočtom legujúcich prvkov, ktoré vzťahujeme na ekvivalentný objem ich základných predstaviteľov - obsahu chrómu (pre ferit) a niklu (pre austenit) a odhadom vyhodnocujeme množstvo feritu na základe predchádzajúcej znalosti chemického zloženia. [19]



Schaeffler-ov diagram Chrom-ekvivalent = %Cr + %Mo + 1,5%Si + 0,5%Nb

Obr. 13 - Schaefflerov diagram znázorňujúci štruktúru zvarovaného kovu korozivzdorné oceli podľa obsahu chrómu a niklu [19]

Žltou farbou je vyznačená oblasť spektra rastu zrna nad 1150 °C, Zelená – oblasť fázy delta, modrá - oblasť vzniku trhlín pod 400 °C, tmavá červená je oblasť austenitu so zvýšeným rizikom trhlín za tepla nad 1250 °C [19]

### Vyjadrenie vplyvu chemického zloženia Schaefflerovho

#### Chrómový ekvivalent pre Schaefflerov diagram

$$Cr_{Es} = Cr + Mo + 1,5 Si + 0,5 Nb + 2 Ti \quad [hm \ %] \quad (3.1)$$

### Niklový ekvivalent pre Schaefflerov diagram

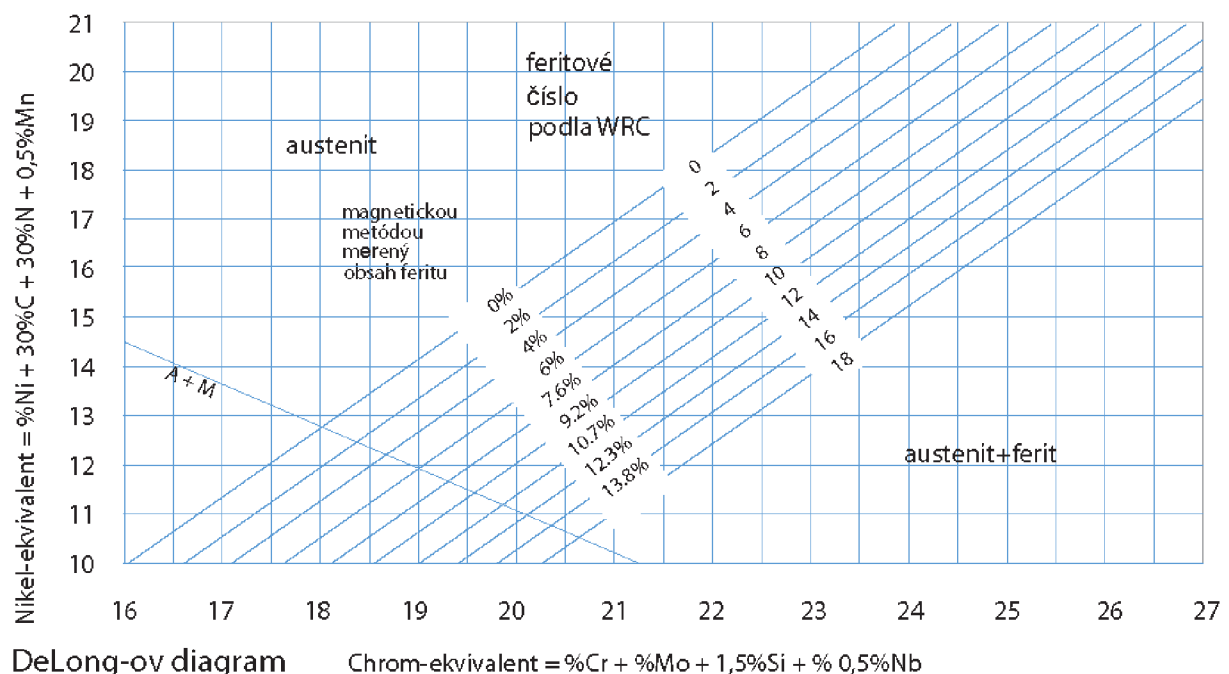
$$Ni_{ES} = Ni + 30C + 0,5Mn \text{ [hm \%]} \quad (3.2)$$

Diagram nie je obmedzený iba na austenitické korozivzdorné oceli, je možné s ním predpovedať ekvivalenty do 40 % chromu a 33 % Niklu. Jeho význam je veľký, najmä pri zvarovaní, ale aj liatí ocele a valcovaní kovani, pretlačovaní a pod. A s úspechom sa používa pre oceli s nízkym obsahom dusíku. Z diagramu vychádza aj Séfériaov vzťah pre výpočet obsahu feritu.

$$\delta Ferit = 3 (Cr_{ES} - 0,93 * Ni_{ES} - 6,7) \text{ [hm \%]} \quad (3.3)$$

### 3.2.2 De Longov diagram

Diagram rozširuje Schaefflerov diagram v oblasti austenitu s ohľadom na pôsobenie dusíkových legúr, je možné s ním so spoľahlivou presnosťou určovať mikroštruktúru pre korozivzdorné oceli do obsahu feritu 15% a nie je vhodný pre oceli s vysokým obsahom mangánu. [19]



Obr. 14 – Deongov diagram pre obsah feritu [19]

### Chrómový ekvivalent pre De Longov diagram

$$Cr_{ED} = Cr + Mo + 1,5 Si + 0,5 Nb + 2 Ti \text{ [hm \%]} \quad (3.4)$$

### Niklový ekvivalent De Longov diagram

$$Ni_{ED} = Ni + 30C + 30N + 0,5Mn \text{ [hm \%]} \quad (3.5)$$

K rozdielu u Delongovmu diagramu dochádza zavedením dusíku, ako významného austenitotvorného diagramu, je vhodné ho použiť pre oceli s obsahom feritu 0-15 %, jeho použitie ale nie je vhodné pre oceli s obsahom mangánu [19]

### 3.2.3 Diagram WRC -1992

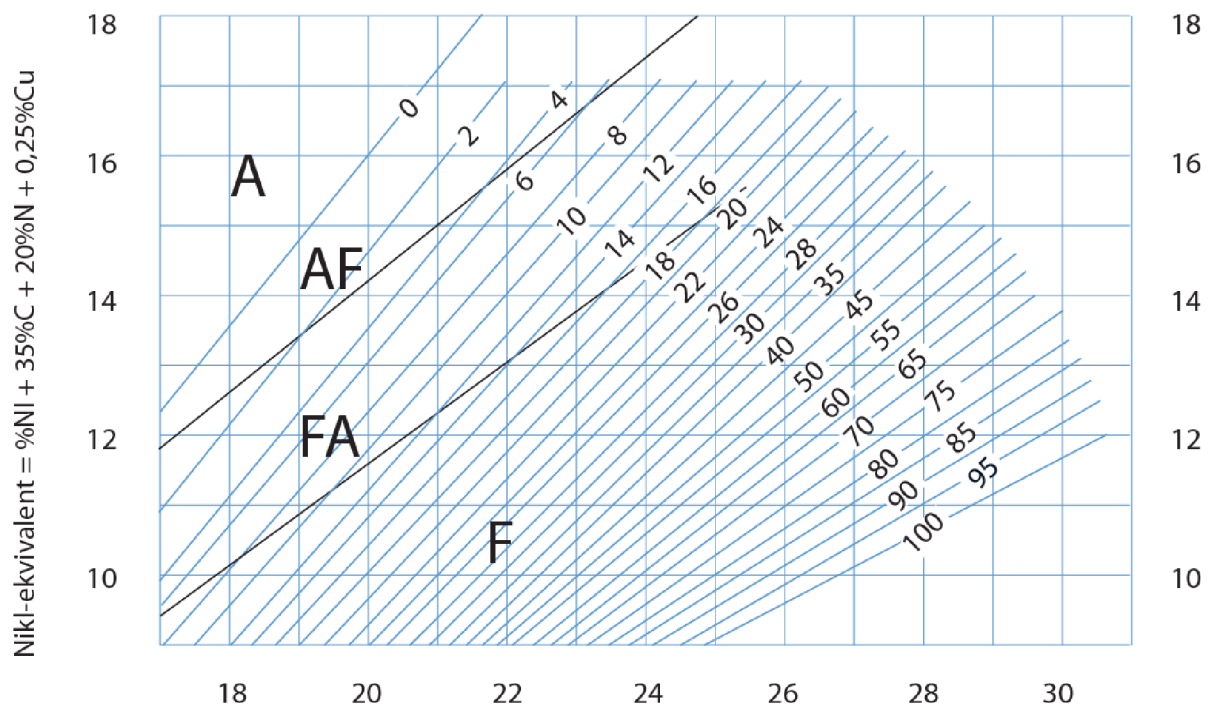
Diagram bol vytvorený za účelom väčšej miery zohľadnenia feritickej štruktúry, najmä u duplexných ocelí. Diagram WRC umožňuje spoľahlivé určenie feritu v štruktúre Cr – Ni v rozsahu 0-100 % Zároveň diagram pristupuje k oceli s rozdielnymi Cr, a Ni ekvivalentami. [19]

#### Chrómový ekvivalent pre WRC-1992 diagram

$$Cr_{EW} = Cr + Mo + 1,5 Si + 0,5 Nb [hm \ %] \quad (3.6)$$

#### Niklový ekvivalent pre WRC-1992 diagram

$$Ni_{EW} = Ni + 30C + 0,5Mn [hm \ %] \quad (3.7)$$



WRC-1992 diagram Chrom-ekvivalent  $\%Cr + \%Mo + 0,7\%Nb$

Obr. 15 Diagram WRC-1992 [19]

### 3.2.4 Vnesené teplo

Výpočet špecifického vneseného tepla  $Q_s$

$$Q_s = \frac{\mu \cdot U \cdot I}{v_s \cdot 1000} \quad [kJ \cdot cm^{-1}] \quad (3.8)$$

- kde:  $\mu$  - koeficient účinnosti [-]  
 $U$  - zvarovacie napätie [V]  
 $I$  - zvarovací prúd [I]  
 $v_s$  - rýchlosť zvarovania [ $mm \cdot s^{-1}$ ]

Koeficient účinnosti zvarovania upravuje norma ČSN EN 1011-1, pre metódu 135/131 je jej hodnota stanovená na hodnotu  $\mu = 0,8$  [-]

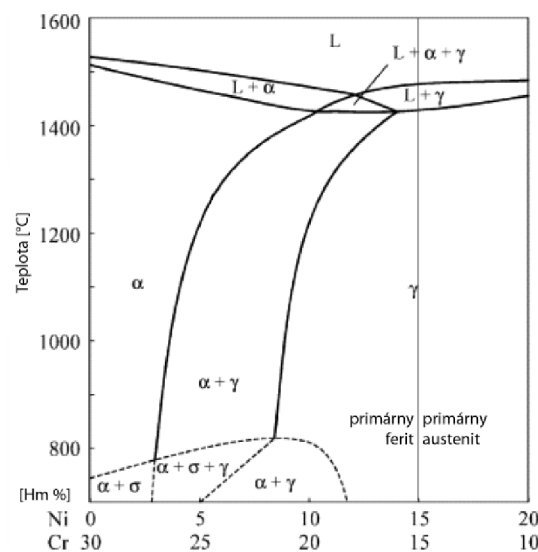
### 3.2.5 Trhliny za tepla

Hraničná časť austenitických ocelí je náchylná na teplé trhliny, ktoré spôsobuje zmrštenie a zníženie plasticity kovu tuhnuceho v medzidendritickom priestore. Na praskanie za tepla majú vplyv najmä prvky ako S, P, Trhliny môžu vzniknúť v TOO alebo pozdĺžne zvarovou húsenicou. Preto sú doporučené obsahy týchto legujúcich prvkov obmedzované iba na obsah potrebný pre stabilizáciu oceli. Najväčším faktorom na vznik trhlín v austenitických oceliach má delta ferit, preto je táto štruktúra obmedzená v základnom materiáli na 3 hm. % pretože vyššie obsahy podporujú vznik fáze sigma a znižujú antikoročné vlastnosti. [18]

$$L = 299C + 8Ni + 142Nb - 5,5\delta^2 - 105 \quad (3.9)$$

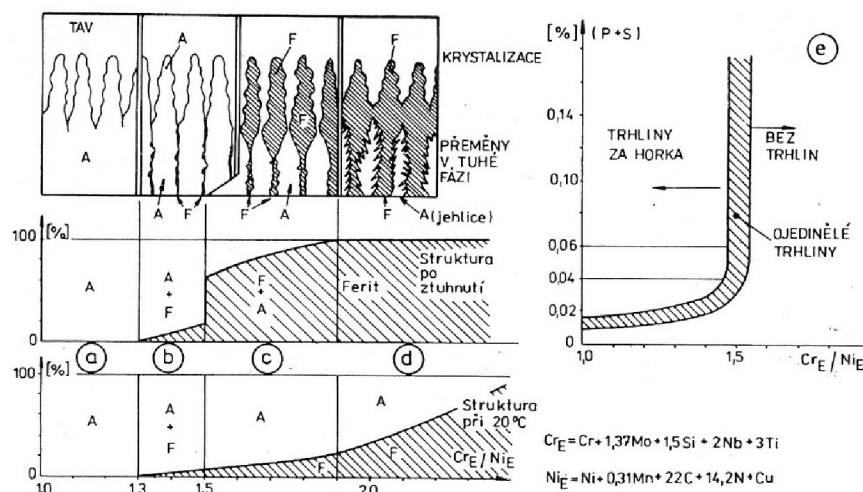
kde:  $\delta$  -  $\delta$  - Ferit [hm. %]

$$\Delta H = -700C + 17Cr - 37Ni - 117Nb + 29Mo + 188 \quad (3.10)$$



Obr. 16 - pseudobinary rovnovážny diagram, Cr-Ni pre 70 hm. % Fe [18]

Pre hodnotenie rizika trhlín za tepla austenitických ocelí používame kritéria L a  $\Delta H$  Do vzťahov dosadzujem hmotnostné obsahy jednotlivých prvkov a tiež obsah delta feritu. Ak pre koeficienty platí podmienka  $L > 0$  a  $\Delta H < 100$  je vysoké riziko vzniku trhlín za tepla. [18]

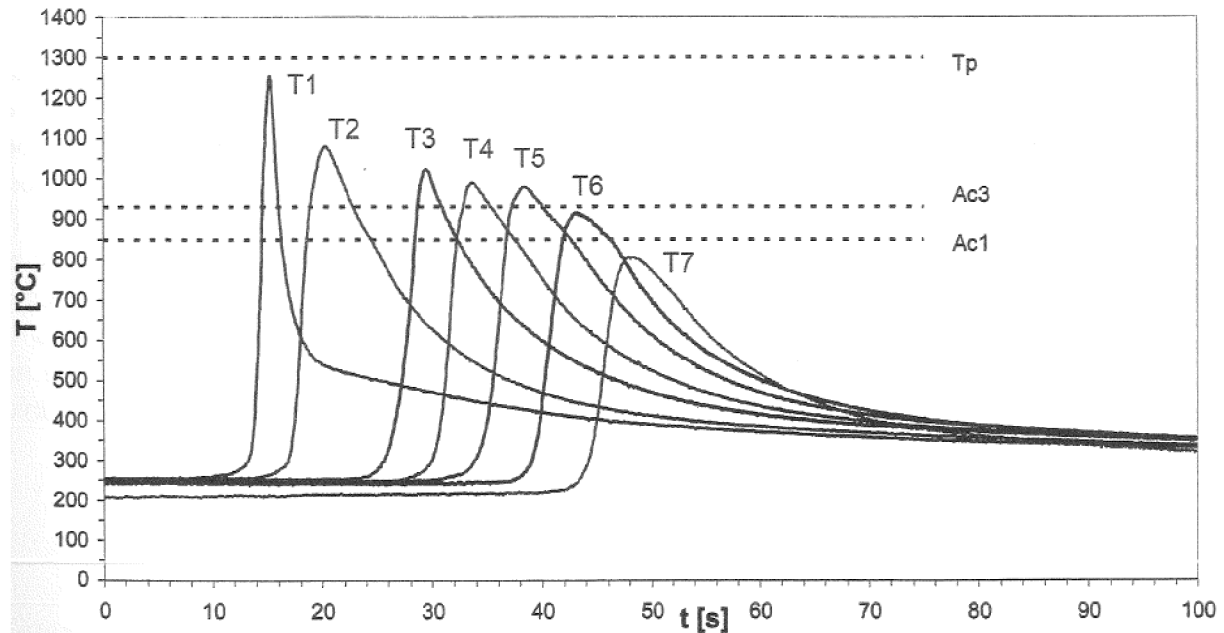


Obr. 17 Sutalov diagram fázových premien a vplyv S a P na vznik trhlín za tepla [20]

### 3.3 Tepelný cyklus

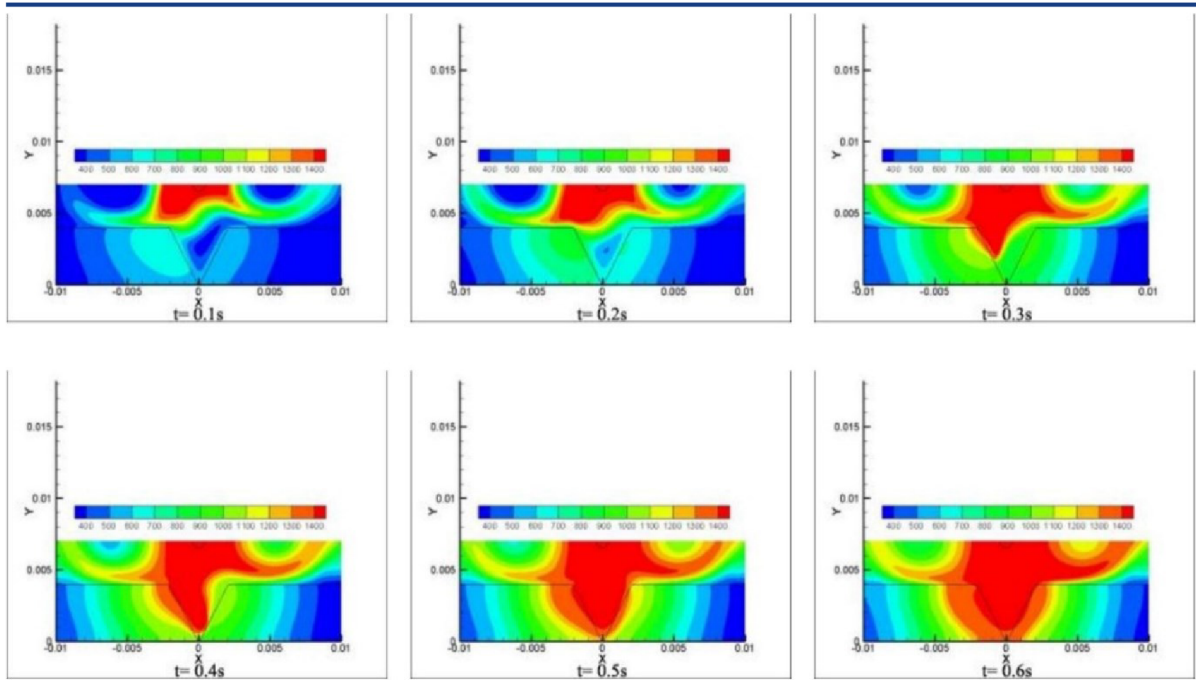
Zvarovaním dochádza k roztavovaniu základného materiálu za procesu lokálneho vkladania tepla prostredníctvom externého zdroja tepla, ktorý vytvára zvarovú kúpeľ v ktorej dochádza k premieseniu zvarového kovu s prídavným materiálom a tiež k čiastočnému odparu. [3]

Tento tepelný zdroj musí pôsobiť v okolí zvarovaných plôch, kde má vzniknúť budúci zvar. Popisované prídavné teplo je príčinou vzniku teplotných cyklov, ktoré sa dajú vyjadriť závislosťou teploty na čase a dajú sa merať termočlánkom zavedeným v blízkom okolí zvarového kovu alebo priamo zavariť do zvarovaného kovu.

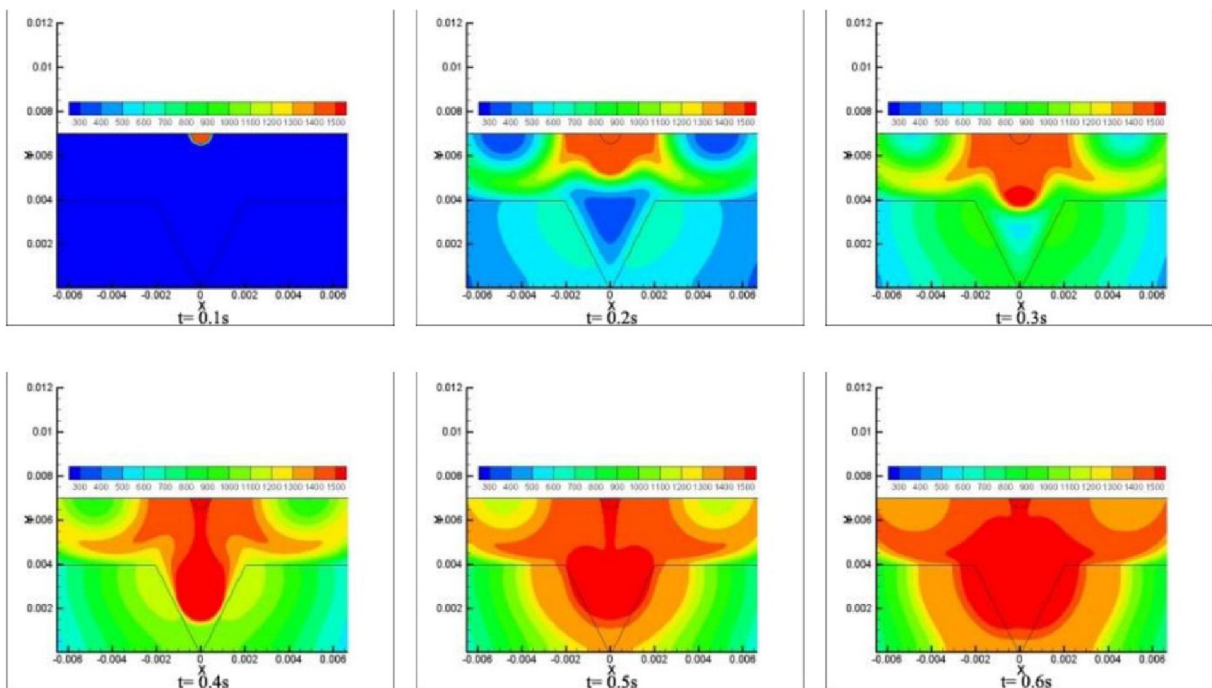


Obr. 18 Všeobecný priebeh tepelného cyklu zloženého zvarového spoja [21]

Lokálne vnesené teplo spôsobuje štruktúrne zmeny v oblasti zvarového kovu, ktoré nazývame Tepelne ovplyvnená oblasť. Je to oblasť v okolí ktorej tesnej blízkosti došlo k fázovej zmene z pôvodného tuhého materiálu na kvapalnú fázu, následnému premieseniu, čiastočnou zmenou chemického zloženia pridaním prídavného materiálu a opätovným chladením rôznou rýchlosťou ochladenia za vzniku rôznych štruktúr závisiacich na konkrétnom materiálovom zložení. Od hranice tavenia dochádza k zhrubnutiu zrna, ďalej pozorujeme pásmo normalizácie a potom čiastočné natavenie. Šírka tepelne ovplyvnenej oblasti je závislá na rýchlosti šírenia tepla materiálu a na množstve vneseného tepla do základného materiálu a stupeň prehriatia okolia zvaru. Metódy znižovania TOO môžu byť - Pulzné zvarovanie alebo používanie metódy STT alebo obdobnej metódy zvarovania.



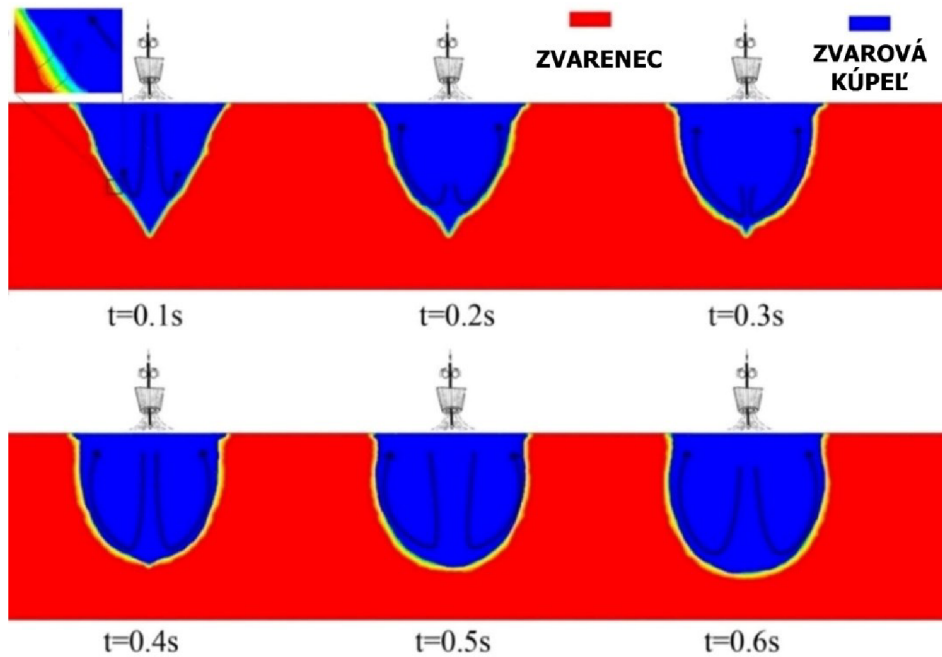
Obr. 19 Tepelné pole s šířením tepla TOO v čase pre lineárne zvarovanie [22]



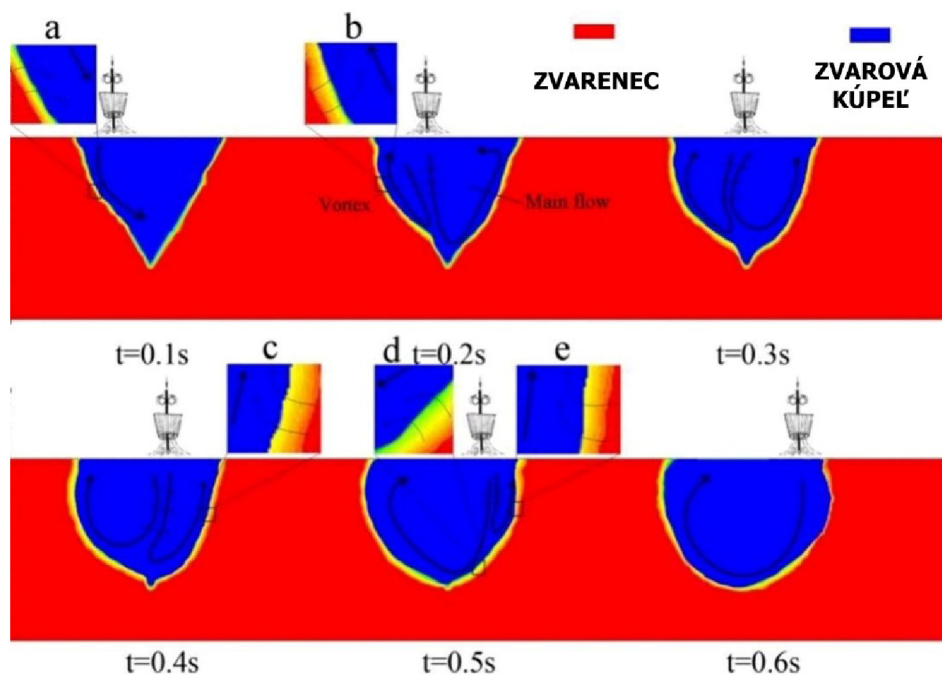
Obr. 20 Tepelné pole s šířením tepla TOO v čase pre zvarovanie s rozkyvom horáku [22]

### 3.4 Mechanika roztavenej tavnej vane

Znázornenie a výpočet mechaniky tekutého kovu pri zvarovaní v tavnom kúpeli je možno CFD, analýza zobrazuje fázovú zmenu a prúdenie tekutiny vo zvarovom kúpeli so stopou pohybu horáka bez rozkyvu.  $t$  je čas zvarovania v danej oblasti. Červená oblasť znázorňuje základný materiál v oblasti zvaru a modrá oblasť je zvarovú vaňu, žltá je práve natavovaná kontaktná plocha na rozhraní s prebiehajúcou difúziou. Hrubá šípka ukazuje smer prúdenia tekutiny a tenká šípka v priblíženom pohľade je smer difúzie. Na obrázku Obr. 22 je znázornená CFD analýza zvarovania s rozkyvom zvaru [22]



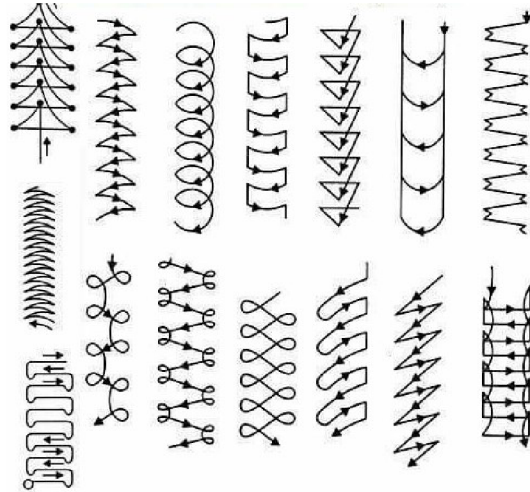
Obr. 21 Mechanika roztaveného materiálu pri lineárom zvarovaní [22]



Obr. 22 Mechanika roztaveného materiálu pri rozkyve horáku [22]

### 3.5 Metódy rozkvyu horáku

Pri rozkvyu zvarovacieho horáku treba brať zvláštnu pozornosť na skladanie zvarových pohybov a rýchlostí [22]. Zvarovací pohyb sa skladá podľa pohybu zvarovania a použitého zvarovacieho vzoru, zvarovacie vzory môžu byť



Obr. 23 Niektoré z možných vzorov rozkvyu horáku [23]

### 3.6 Kontrola akosti zvarovaných spojov

Pre zachovanie stabilnej kvality naprieč celej škály zvarových spojení v rámci výroby zavádzame skúšky zvarov, na základe ktorých posudzujeme kvalitu zvarových spojení, či je zvarovaný spoj v takej kvalite, akú predpísal konštruktér alebo akú vyžaduje konkrétna aplikácia. Skúšky zvarov vykonávame pre každý typ zvaru z menších vzorových kusov materiálu, ktorý budeme zvarovať ešte pred sériovou výrobou, ale pre trvale udržateľné výrobné systémy sa vyžaduje priebežná skúška materiálov každých 1,10, 100,1000 kusov podľa sériovosti výroby a možnosti výroby zŕžtkov. [9]

Skúšky zvarov rozdeľujeme na deštruktívne a nedeštruktívne, spravidla platí že nedeštruktívne skúšky robíme na každom kuse v prípade tlakových nádob, deštruktívne robíme napríklad každý 10-50ks (napríklad svorníky mostových konštrukcií) tak, aby nám v rámci štatistických výpočtov vychádzali hodnoty na základe ktorých môžeme preukázať, s akou pravdepodobnosťou sú všetky zvary vykonané v požadovanej kvalite a či boli podmienky zvarovania dodržané, alebo došlo v priebehu zvarovania k zmene podmienok a k zlej kvalite vyhotovenia. [9]

Vady v zvarových spojoch môžu predstavovať veľké riziko, pri ich neodhalení v rámci kvalifikácie použitia konkrétneho zvarového spojenia. Medzi charakteristické vady patria trhliny, bubliny, póry, v miešaniiny, studené spoje, neprevarený koreň, vruby, zápaly, kvaple, presadený koreň zvaru. Vady upravuje norma ČSN EN ISO 6520 [9]

Kvalita zvarových húseníc sa posudzuje podľa vyžadovanej kvality, t.j kvalita úmerná vhodnosti použitia, nie je za každých okolností o najväčšiu akosť, aká sa dá dosiahnuť, je na to hneď niekoľko dôvodov, ten najväčší je ekonomický. Každý úkon navyiac či už formovanie koreňa alebo dokonale prevarený koreň pre aplikácie pri ktorých to nie je nevyhnutné, iba zvyšujú spotrebu prostriedkov jak časových tak materiálnych. Zároveň je ale nutné zaistiť takú akosť, aby zariadenie bolo schopné plniť úcel po celú dobu svojej životnosti. Za daných prevádzkových podmienok. Podľa normy sú zavedené tri stupne akosti, D = nízky, C stredný, B – Vysoký. Označenie nie je záväzné pre celý zvarovaný celok, ale pre každý zvarový spoj



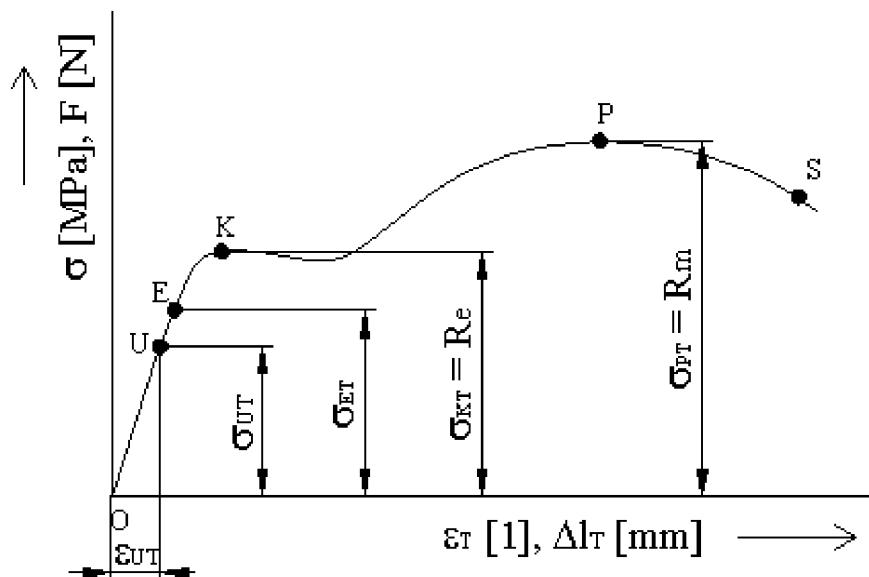
samostatne. Označenie a prípustnosť chýb je uvedené v norme ČSN EN ISO 5817, aktuálna norma prípustnosť vád jednoznačne v tabuľke, ale nepojednáva o skúške ťahom.

### 3.6.1 Deštruktívna skúška ťahom, ktorú upravuje norma ČSN EN ISO 5178

Deštruktívna skúška ťahom je základná skúška, ktorou objektívne popisujeme pevnostne elastické charakteristiky materiálu, naprieč celým spektrom materiálov – kovov, keramiky, plastov, skla a popisujeme materiál a jeho základné vlastnosti, ktoré sú ako vstupné hodnoty pre konštruktérov, ktorý definujú súčasti.

Princípom je postupné statické zaťaženie skúšobného vzoru až do jeho prerušenia. Merané veličiny pri skúške sú sila na dráhe, ktoré sú následne prepočítané na medzu sklzu, medzu pevnosti, pomerné súženie a ťažnosť.

Pracovný diagram je rozdelený do 3 hlavných častí – 1. oblasť elastických deformácií, táto časť je z väčšej časti lineárna a je zakončená medzou pružnosti. 2. oblasť rovnomerných plastických deformácií, je to oblasť, ktorú využívame pre tvárnenie materiálu za studena. K deformácií dochádza globálne 3. oblasť nerovnomerných plastických deformácií, je oblasť v ktorej sa vzorka začína deformovať lokálne a začína sa vytvárať kĺčok, kde dochádza k porušeniu. [18]



Obr. 24 Pracovný diagram ťahovej skúšky [18]

Výpočet Hookova zákona

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \text{ [MPa]} \quad (3.11)$$

kde:  $\sigma$  - napätie [MPa]  
 $E$  - modul pružnosti v ťahu [MPa]  
 $\varepsilon$  - deformácia

Výpočet medze pevnosti  $R_m$  je oblasť, v ktorej je daný materiál namáhaný najväčším napätím. Pri uvoľnení napätia v bode, kde dochádza k maximálnej hodnote  $R_m$  dochádza, k trvalej plastickej deformácii. Ďalšie zaťaženie vedie k porušeniu skúšobného vzoru.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (3.12)$$

kde:  $F_m$  - Sila na medzi pevnosti [N]  
 $S_0$  - začiatočná plocha prierezu skúšobnej tyče [mm<sup>2</sup>]

Ťažnosť A je maximálne pomerné trvalé predĺženie meraného vzoru a predstavuje schopnosť materiálu sa plasticky deformovať.

$$A = 100 \frac{\Delta L_u}{L_0} [\%] \quad (3.13)$$

kde:  $L_0$  - Pôvodná dĺžka meranej tyče [mm]  
 $L_u$  - Dĺžka meranej tyče po pretrhnutí [mm]  
 $\Delta L_u = (L_u - L_0)$  - absolutny prirastok dĺžky pôvodnej tyče [mm]

Kontrakcia (zúženie) Z charakterizuje úbytok polomeru z prierezu plochy v krčku pôvodnej skúšobnej tyče (3.14)

$$Z = 100 \frac{\Delta s_u}{s_0} [\%]$$

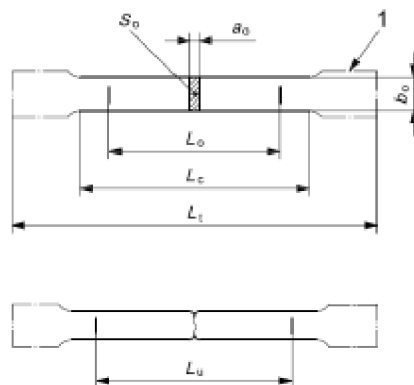
kde:  $s_0$  - Pôvodný prierez meranej tyče [mm]  
 $s_u$  - Prierez meranej tyče po pretrhnutí [mm]  
 $\Delta s_u = (s_u - s_0)$  - absolutny prirastok dĺžky pôvodnej tyče [mm]

Medza sklzu  $Re$  sa nachádza v oblasti namáhania materiálu, v jeho maximálnej elastickej deformácii, ktorá je stále vratná, po uvoľnení zaťažujúceho napätia sa vzor vráti do pôvodnej veľkosti bez zmeny. Pre niektoré materiály, ktoré vykazujú sklzové chovanie na rozhraní plastickej deformácie sa uvádza tiež pojem horná medza sklu  $Re_H$  a dolná medza sklzu  $Re_L$  a jej prejavom je charakteristické zníženie napätia vplyvom začínajúcej plastickej deformácie. Alebo tiež pojem výrazná a nevýrazná medza sklzu.

$$Re = \frac{Fe}{S_0} [\text{MPa}] \quad (3.15)$$

kde:  $Fe$  - Sila na medzi sklzu [N]  
 $S_0$  - začiatočná plocha prierezu skúšobnej tyče [mm<sup>2</sup>]

Pre vytvorenie testu je nevyhnutné skúšobný vzor pripraviť do takej formy, aby boli výsledky viacerých pokusov vzájomne porovnateľné, z hľadiska zaťaženia musí byť zvar umiestnený v strede, v určitej vzdialenosti  $L_0$  sa vyznačia čiary a zanesie sa táto hodnota do zápisu, po pretrhnutí vzoru sa znova zmeria táto vzdialenosť, ktorá je ale väčšia a vieme pomocou nej určiť, ako moc sa nám skúšobný vzor natiahol.

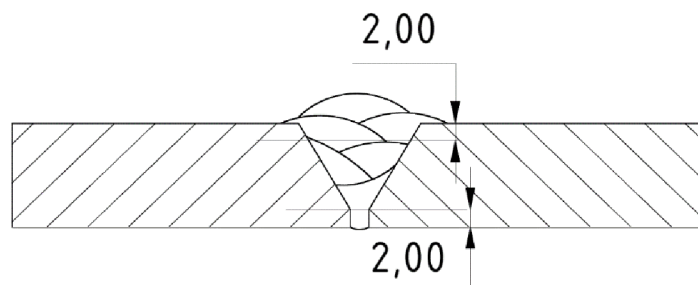


Obr. 25 pripravený vzor skúšobnej tyče pred a po skúške ťahom [18]

### 3.6.2 Deštruktívna skúška tvrdosti podľa ČSN EN ISO 9015-1

Norma hovorí o možnostiach testovania vzorkov a odkazuje na ďalšie metódy skúšania tvrdosti podľa Brinella z normy ISO 6506-1 a Vickersa podľa normy ISO 6507-1. Stupnica Brinella je

cca o 9 stupňov tvrdosti posunutá nižšie oproti Vickersovy, t.j tvrdosť 165 HV je cca 156 HB, čo zodpovedá približne 530N/mm<sup>2</sup> a 121HB je približne 127 HV, čo je ekvivalent približne Rm 431 N/mm<sup>2</sup>. Norma určuje rovnako rozsah vrypov, ktoré je nevyhnutné vytvoriť vo viacerých líniách, v okolí zvarového spoja v určenom rozstupe minimálne v dvoch rovinách 2mm od hrany povrchu materiálu. V oblasti vrchu zvarovej húsenice a v oblasti koreňa zvaru, ďalej norma odporúča vytvorenie ďalších meraní na rozhraní tepelne ovplyvnenej oblasti a v mieste prechodovej fázy zo základného materiálu do zvarového kovu.



Obr. 26 určenie miesta skúšania tvrdosti pre jednostranný jedno, a viac húsenkový tvar zvaru podľa ČSN EN ISO 9015-1

### Skúška podľa Vickersa - HV

Skúška prebieha vtláčovaním diamantovým štvorbokým ihlanom o vrcholovom uhle 136°. Tvrdosť sa potom vyhodnocuje na základe rozmeru strednej uhlopriečky vtláčenia. Výpočet sily sa hodnotí podľa vzorca:

$$HV = 0,189 \frac{F}{u^2} \quad (3.16)$$

kde:  $F$  - zaťažovacia sila [N]  
 $u$  - stredná uhlopriečka otláčku [mm]

### 3.7 pWPS – Špecifikácia postupu zvarovania

Z hľadiska dodržania bezpečnosti, predchádzaniu rizik a dodržania všetkých pevnostných a akostných charakteristík zvarov je nevyhnutné zabezpečiť odborné posúdenie zvarovanej súčasti, nie iba v štádiu zvarovania zväračom. Pre zabezpečenie konzistentných výsledkov naprieč celým odvetvím sa v rámci normalizácie zavádzame pojem pWPS, ktorý je zodpovedný za presné stanovenie priebehu činností, ktoré sú vykonávané pred zvarovaním, počas a po skončení procesu zvarovania zvarového spoja a je upravený normou ČSN EN ISO 15609. Je nevyhnutné, aby obsahoval a jednoznačne špecifikoval metódu zvarovania, základný materiál, prídavný materiál a ďalšie doplnky, ktoré napomáhajú tvorbe zvarového spoja, ako ochranný plyn, druh elektródy, teplotné charakteristiky ako predohrev, teplotu interpass alebo T8/5, skladbu húseníc, a ďalej očistenie alebo tepelné spracovanie po zvarovaní. Na základe WPS zvärač vykonáva činnosť a je pre neho záväzná pre dosiahnutie porovnateľných výsledkov medzi rôznymi zväračmi. Tvorbu WPS a jej dodržanie je vyžadované príslušnou normou, ktorá upravuje výrobu alebo prevádzku konkrétneho druhu zariadenia. Ak takáto norma neexistuje, sa odporúča pred začatím zväracích prác na všetkých typoch výrobkov a zvarov odskúšať navrhnutý postup zvarovania a nechať ho schváliť inšpekčnou organizáciou. Schvaľovanie a stanovenie postupov upravuje norma ČSN EN ISO 15607. [14]

Postup vytvárania WPS podľa ČSN EN ISO 15614-1 [14]

- Výkresová dokumentácia – predchádza zväraciemu procesu, na základe určenia súčasti konštruktér určuje polohy zvarov a definuje ich nosnosť a predpisuje alebo mal by predpisovať aj ich veľkosť.

- 
- Rozpis materiálu - Na základe výkresu sa vytvorí zoznam materiálu a množstvo potrebné k zvaraniu.
  - Zoznam zvarových spojov – Na základe zoznamu zvarových spojov sa vytvárajú jednotlivé pWPS, zoznam obsahuje číslo zvaru, typ a rozmer zvaru, materiál a číslo pWPS
  - Stanovenie skúšobného kusu – kus sa stanovuje s ohľadom k zverovanému kusu, alebo podľa normy, musí sa jednať o reprezentatívnu vzorku.
  - Určí sa rozsah kvalifikácie - podľa zvarovaného kusu a hrúbky materiálu príp. priemeru trubky
  - Stanovi sa predbežná špecifikácia zvarovacieho postupu - tzv. pWPS
  - Určí sa dostatočne skúsený zvarač s požadovanou kvalifikáciou.
  - Príprava a zvarovanie skúšobného kusu – na základe pWPS sa za dodržania všeobecných podmienok vo výrobe, ktoré musí skúšobný kus reprezentovať. Samotné zvarovanie prebieha pod kontrolou skúšobného orgánu, prípadne je doložený záznam konkrétneho zvarovania.
  - Po príprave zvarovacieho postupu sa postup kvalifikuje protokolom WPQR – pre túto kvalifikáciu nutné doložiť dokumenty : 1. Atest základného materiálu EN 10 204 – 3.1 2. Atest prídavného materiálu EN 10 204 – 3.1, 3. Atest pomocného materiálu EN 10 204 – 3.1, 4. Kópiu osvedčenia zvarača dle ČSN EN 287 – 1 5. Vyplnenú Predbežnú špecifikáciu postupu pWPS 6. Kópiu výpisu so živnostenského registra. 7. Písomné pomenovanie zvaracieho technológa. 8. Písomné pomenovanie zvaracieho dozoru
  - Kontrola a skúšanie vzoru :
  - Nedeštruktívne skúšky – Vizuálna kontrola, skúška na povrchové trhliny, a RTG alebo UT všetky na 100%
  - Deštruktívne skúšky – Priečna skúška ťahom (2 vzory), priečna skúška lámavosti (4 vzory), skúška makroštruktúry (1 vzor), kontrola makroštruktúry – (1 vzor)
  - Doplňujúce skúšky podľa výrobných noriem – , chemický rozbor, korózne skúšky, mikroskopická kontrola, skúška ťahom krížových spojov a podobne.

## 4 EXPERIMENTÁLNÁ ČASŤ

Pre tvorbu experimentu boli vybrané tri materiály, ktoré boli podľa hrúbky rozdelené do 3 skupín a jednej testovacej vzorky, ktorá slúžila na empirické stanovenie východziech parametrov zvarovania. Zvarovanie prebiehalo na profesionálnej zostave pozostávajúcej zo zvaracieho zdroja Fronius TRANS PULS SYNERGIC 4000 s externým podávačom drôtu Fronius VR 4000 4R/G/W/F++. Pre zachovanie konštantných parametrov zvarovania bol použitý zvarovací podvozok pre mechanické pozdĺžne zvarovanie Fronius FRC-4, vďaka ktorému je možné nastaviť presnú dĺžku zvaru a konštantnú rýchlosť posuvu. K podvozku bol primontovaný mechanický oscilátor, ktorý slúžil na konštantný rozkyv zvarovacieho horáku. Pre vytvorenie zvarových húsieníc bol vybraný materiál ESAB OK Autrod 16.95 s priemerom 1.2mm a ochranný plyn STARGON C2 so zložením argón 98% a oxid uhličitý 2%.



Obr. 27 Zostava zvarovacieho vzorku a lineárneho podvozku s oscilátorom

Tab. 1 Chemické zloženie vybraných vzorových materiálov [%]

Trieda ocele (číslo ocele)	C, ≤	Si, ≤	Mn, ≤	P, ≤	S, ≤	Cr	Ni	Mo	N	Ti
X2CrNiMoN22-5 (1.4462)	0,03	1,00	2,00	0,035	0,015	21,0-23,0	4,5-6,5	3,00-3,50	0,14-0,20	-
X6CrNiTi18-10 (1.4541)	0,08	1,00	2,00	0,045	0,015	17,0-19,0	9,0-12,0	-	-	5xC-0,70
X5CrNi18-10 (1.4301)	0,03	0,75	2,00	0,045	0,030	17,5-19,5	8,0-12,0	-	0,1	-
OK AUTROD 16.95(1.4370)	<0,2	1	6.5	<0,03	<0,03	18.5	8.5	0.20	-	-

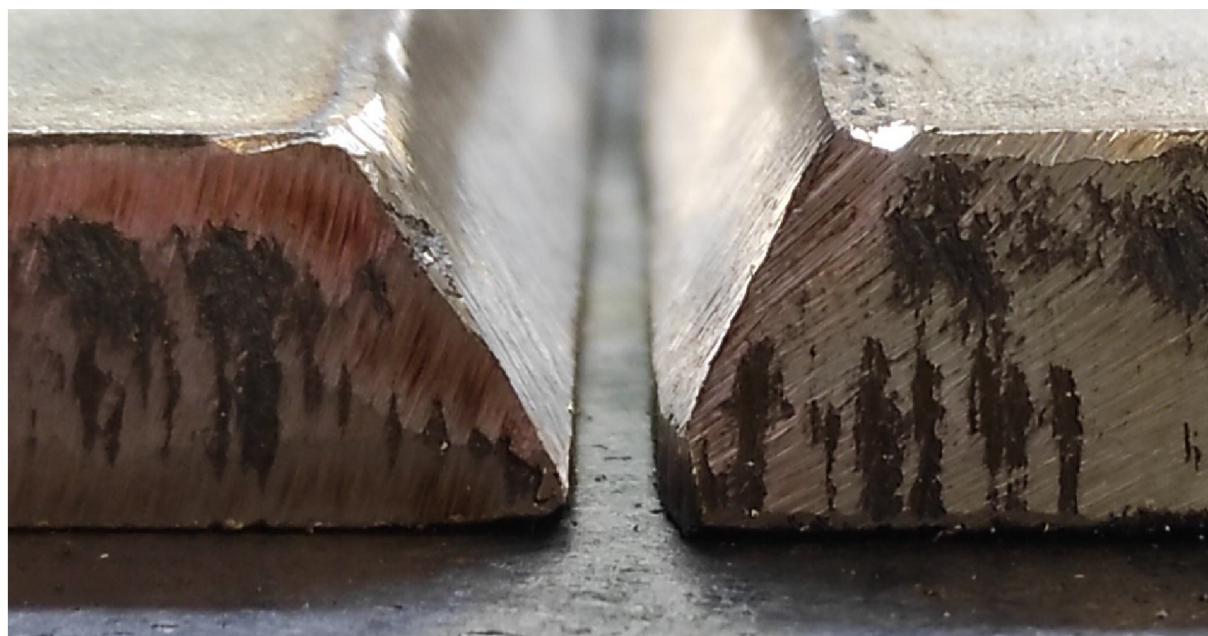
Tab. 2 Fyzikálne vlastnosti vybraných vzorových materiálov

Trieda ocele (číslo ocele)	Hustota	Magnetický	Elektrický odpor	Špecifická tepelná kapacita	Tepelná vodivosť	Medza pevnosti	Mez sklzu	Tvrdosť	Ťažnosť
jednotka	g/cm <sup>3</sup>	-	μΩ·m	J/(kg·K)	W/m·K	Mpa	N/mm <sup>2</sup>	HB	%
X2CrNiMoN22-5-3 (1.4462)	7,8	ano	0,80 (20 °C)	500 (20 °C)	15,0 (20 °C)	650-880	≥460	270≤	25
X6CrNiTi18-10 (1.4541)		nie	0,73 (20 °C)			520-720	≥220	<210	40
X5CrNi18-10 (1.4301)		nie	0,72 (20 °C)			520-750	≥230	<200	45
OK AUTROD 16.95(1.4370)		nie	-	-	-	640	450	-	41

Vybrané vzorčky boli špecifikované podľa pomerne bežne používaných hrúbok materiálu a bola zohľadnená aj dostupnosť vzorového materiálu. Vybraný materiál bol v hrúbke 6, 8 a 12 mm, 6 a 12mm, materiál bol použitý na tupý zvar a 8mm vzor bol použitý na prvotné otestovanie parametrov a rýchlosti rozkyvu horáku.

#### 4.1 Príprava materiálu

Testované vzorčky vybraného materiálu boli nadelené plazmovou rezačkou na rozmer, ktorý zodpovedal rozsahu testovaných zvarov. Materiáli boli uhlovou brúskou očistené od okují dostatočnej časti tepelne Obr 28 ovplyvneného a nataveného materiálu približne 2-3mm a ďalej upravené na geometriu stanovenú normou pre úpravu zvarových plôch podľa ČSN EN 9692 - 1 s názvom „V-zvar s výrazným otupením“ so značkou Y, ktorý je doporučený pre hrúbky materiálov od 5 do 40mm s vrcholovým uhlom úkosu približne 60°, medzerou medzi materiálom 1 až 4mm a výškou otupenia 2 až 4mm.



Obr. 28 Úprava zvarových plôch Y úkos pred zavarením

#### 4.2 Teoretický odhad zloženia zvarovaných vzorov

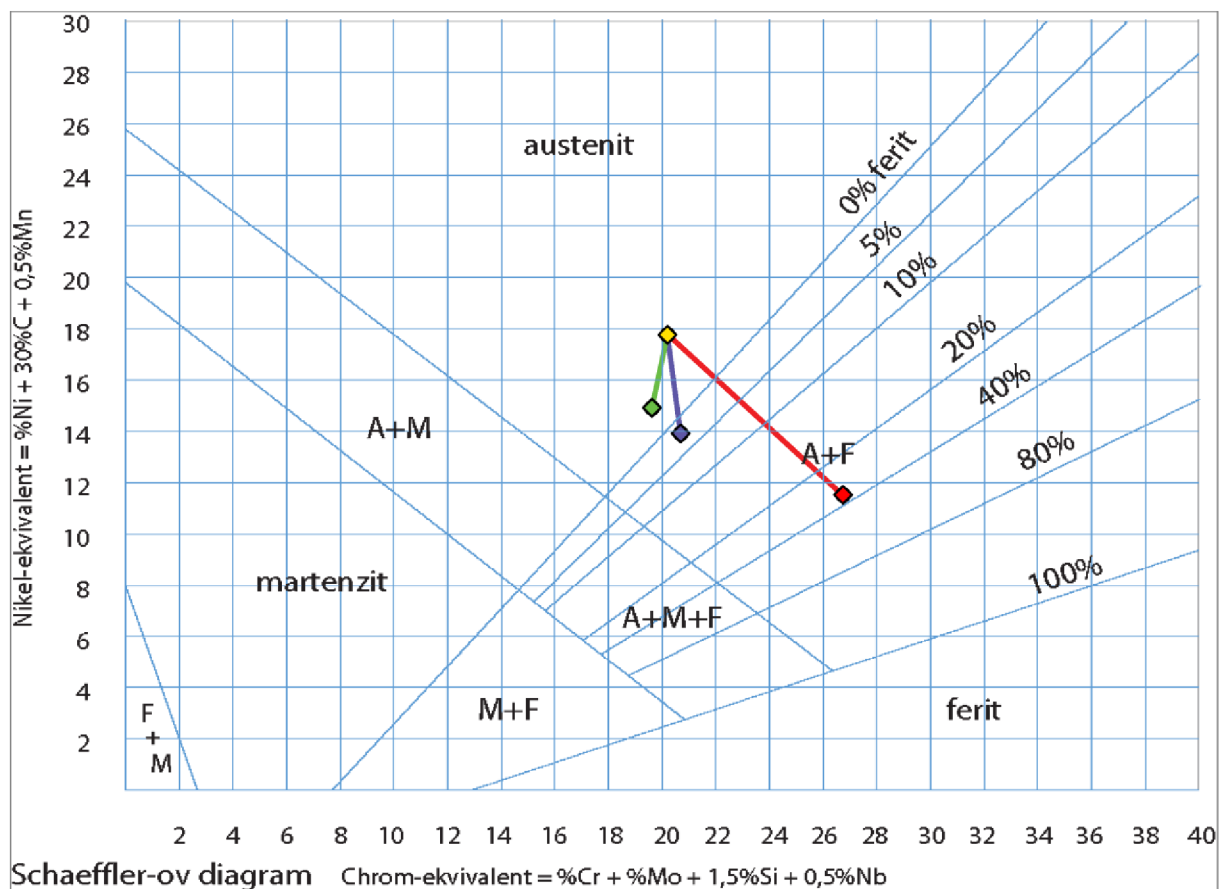
Zanesením chemického zloženia vzorových materiálov do rovnovážneho binárneho diagramu diagram ukazuje, že všetky 4 oceli majú veľmi príbuzné chemické zloženie z hľadiska

chrómu. Vzhľadom na fakt, že pri vypracovaní práce nebol k žiadnemu vzorku dostupný materiálový atest, ktorý by stanovoval konkrétne množstvá a zloženie skúšaných vzorov, bola pre výpočet diagramov a stanovovania odhadov zloženia použitá stredná hodnota pre chemické zložky uvedené s rozsahom od – do (napr. rozsah 8-12, použitá 10), a pre hodnoty max 0,03 použitá najhoršia prípustná hodnota minima alebo maxima.

Tab. 3 Výsledky prepočtov jednotlivých materiálov do diagramov

Trieda ocele (číslo ocele)	SHAFFLER		WRC		Teplé trhliny		
	Cr <sub>ES</sub>	Ni <sub>ES</sub>	Cr <sub>ew</sub>	Ni <sub>EW</sub>	L	dH	-
X2CrNiMoN22-5 (1.4462)	26,75	7,4	25,25	9,75	-610,97	431,75	bez rizika
X6CrNiTi18-10 (1.4541)	20,7	13,4	18	12,8	-30,42	68	riziko
X5CrNi18-10 (1.4301)	19,625	11,9	18,5	13,05	-30,47	111,5	limit
OK AUTROD 16.95(1.4370)	20.1	17,75	18,7	15,5	-36,8	53,8	riziko

#### 4.2.1 Výpočet Schaefflerov diagram



Obr. 29 Chemické zloženie experimentálnych materiálov prepočítané na ekvivalent chrómu a niklu zavedené do Schaefflerovho diagramu pre odhad štruktúry

Chrómový ekvivalent – vzorový výpočet pre ocel' 1.4462

$$Cr_{ES} = 22 + 3,25 + 1,5 * 1 + 0,5 * 0 + 2 * 0 = 26,75 [hm \ %]$$

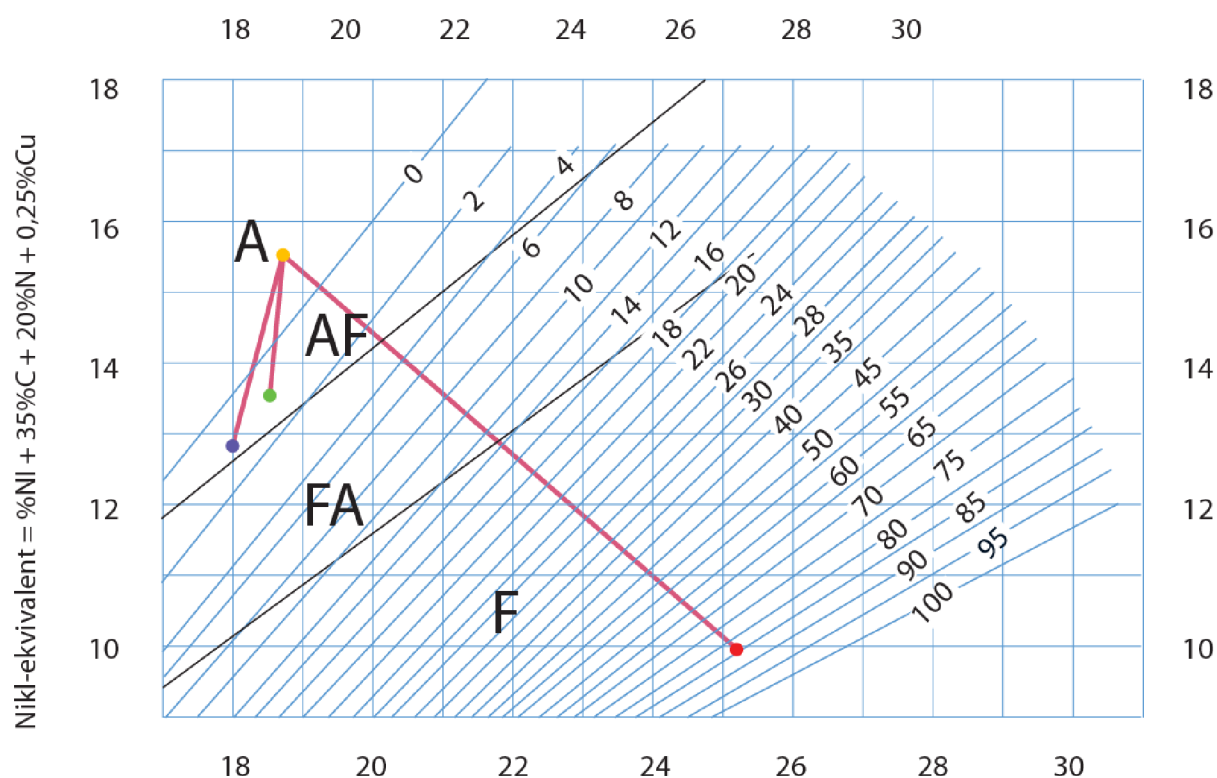
Niklový ekvivalent – vzorový výpočet pre ocel' 1.4462

$$Ni_{ES} = 5,5 + 30 * 0,03 + 0,5 * 2 = 7,4 [hm \ %]$$

Jednotlivé zloženia ocelí boli zanesené do Schaefflerovho diagramu, kde sa jednotlivé body zobrazili v pomerne úzkom pásme, v okolí blízkom pásme feritických ocelí. Čo predpovedá o

vhodnosti zaniest' hodnoty ekvivalentného zloženia s potrebnou metodikou aj do diagramu WRC - 1992

#### 4.2.2 Diagram WRC -1992



WRC-1992 diagram Chrom-ekvivalent  $\%Cr + \%Mo + 0,7\%Nb$  ■ 1.4541 ■ 1.4301 ■ 1.4370 ■ 1.4462

Obr. 30 Chemické zloženie experimentálnych materiálov prepočítané na ekvivalent chrómu a niklu zavedené do WRC - 1992 diagramu pre odhad štruktúry

Chrómový ekvivalent pre WRC-1992 diagram pre oceľ 1.4462

$$Cr_{EW} = Cr + Mo + 1,5 Si + 0,5 Nb [hm \ %]$$

Niklový ekvivalent pre WRC-1992 diagram pre oceľ 1.4462

$$Ni_{EW} = Ni + 30C + 0,5Mn [hm \ %]$$

#### 4.2.3 Trhliny za tepla pre oceľ 1.4541

$$L = 299C + 8Ni + 142Nb - 5,5\delta^2 - 105 = -30,42$$

$$\Delta H = -700C + 17Cr - 37Ni - 117Nb + 29Mo + 188 = 68$$

Podmienka  $L > 0$  a  $\Delta H < 100$  t.j podmienka  $-30,42 > 0$  a  $68 < 100$  pre riziko trhlín za tepla je pri oceli 1.4541 splnená.

### 4.3 Popis experimentu.

Vzorčky boli rozdelené do 4 skupín :

- VZORKA A – 8mm kútový zvar materiál X5CrNi18-10 (1.4301)TESTOVACÍ SÚBOR
- VZORKA B – 8mm kútový zvar materiál X5CrNi18-10 (1.4301)
- VZORKA C – 6mm tupý zvar – materiál X2CrNiMoN (1.4462) duplex



- VZORKA D – 12mm tupý zvar – materiál X6CrNiTi18-10 (1.4541)

Tab. 4 Tabuľka experimentálnych meraní, Os – oscilácia, Pu – pulz, 2Am – amplitúda, Pr-Prejazdov, Ge-geometria, <sup>(1)</sup> - pre 2. zvarovú húsenicu, St – posúdenie vizuálneho stavu (ok=prijateľného/x=neprijateľného/k=chyba koreňa), f<sub>r</sub>- frekvencia rozkvyvu. Vz. – vzor

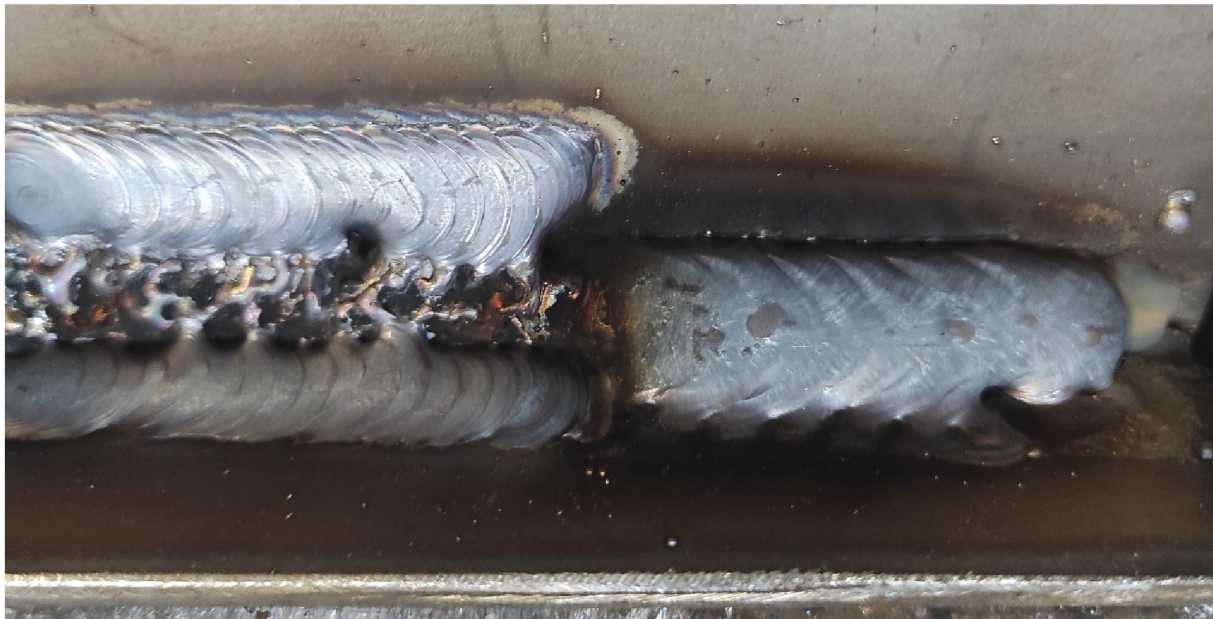
mat.	vz.	č. m.	T	Ge	I <sup>(1)</sup>	U	v <sub>s</sub>	Pu	Os	f <sub>r</sub>	Am	Pr	St	Q <sub>s</sub> <sup>(1)</sup>
jedn.	-	-	mm	-	A	V	cm/min	-	-	Hz	mm	-	-	kJ.mm <sup>-1</sup>
DIN 1.4301 X5CrNi18-10	A	6	1	⊥	151	21	42	on	-	-	-	3	ok	0,36
			2	⊥	151	21	30	on	5	1,4	9	2	ok	0,51
			3	⊥	151	21	30	on	6	1,8	14	2	x	0,51
			4	⊥	180	21	30	on	6	1,8	14	2	x	0,60
			5	⊥	180	21	30	on	4	1	11	2	ok	0,60
			6	⊥	180	21	30	on	7	2	18	2	x	0,60
			7	⊥	180	21	25	on	4	1	18	2	x	0,73
			8	⊥	180	21	20	on	6	1,8	8	2	ok	0,91
			9	⊥	180	21	20	on	6	1,8	11,5	2	ok	0,91
DIN 1.4301 X5CrNi18-10	B	8	4	⊥	181	21	20	on	4	1	11	2	ok	0,91
			3	⊥	181	21	20	on	4	1	17	2	x	0,91
			2	⊥	181	21	20	on	4	1	10	2	ok	0,91
			1	⊥	181	21	20	on	4	1	8	2	ok	0,91
DIN 1.4462 X2CrNiMoN duplex	C	6	1	Y	147	21	40	on	-	-	-	2	k	0,37
			2	Y	180	21	40	on	-	-	-	2	ok	0,45
			3	Y	180	21	40	on	4	1	6	2	k	0,45
			4	Y	180	21	40	on	-	-	-	2	ok	0,45
			5	Y	180	21	40	on	6	1,8	6	2	k	0,45
			6	Y	200	21	40	on	6	1,8	6	2	ok	0,50
			7	Y	200	21	40	on	6	1,8	6	2	k	0,50
DIN 1.4541 X6CrNiTi18-10	D	12	1	Y	200	22	20	on	-	-	-	4	ok	1,03
			2	Y	176	22	20	on	-	-	-	6	ok	0,91
			3	Y	190	22	32	on	6	1,8	7	3	ok	0,61
			4	Y	182	22	35	on	6	1,8	7	2	ok	0,54
			T5	Y	530	32	32	-	-	-	-	-	-	2,54

V Tab. 4 je uvedený súbor meraní a základných použitých parametrov, ktoré boli v experimente použité. Parametre ako Rýchlosť podávania drôtu (hodnota zo zvarovacieho zdroja 6.2 m/min) a zvarovacie napätie (nastavené na I=20V) považujeme za konštantné. Vzor A bol použitý na empirické stanovenie parametrov zvarovania, ktorému predchádzalo zhodnotenie parametrov odporúčaným výrobcom drôtu, zvarovacieho zdroja a výpočtu. No vzhľadom na množstvo premenných bolo nevyhnutné tieto parametre empiricky upraviť.

#### 4.3.1 Popis priebehu experimentu vzoru A a B

V priebehu zvarovacieho procesu prvého stanovovania parametrov vnikalo množstvo zaujímavých chýb, ktoré súviseli s absolútnou nevedomosťou predvídania parametrov nevyhnutných pre správnu rýchlosť a amplitúdu rozkvyvu horáku. Na Obr. 31 môžeme pozorovať krásny príklad veľmi zle zvolených parametrov, ktoré ale vytvárali konštantný výsledok s podobne chaotickou chybou v strednom pásme zvarového procesu. Chybný výsledok nastal pri zvarovaní druhej zvarovej húsenice, kde prvá bola zvarovaná bez rozkvyvu po celej dĺžke zvarovaného materiálu. Chybu si môžeme odôvodniť vysokou rýchlosťou rozkvyvu, kde môžeme lokálne pozorovať takmer ideálne parametre zvarovania vo vrchnej a

spodnej úvrati a celkom nedostatočné parametre v strednom pásme v okolí neutrálnej osy, kde dodaná energia pôsobiaca v krátkom časovom úseku nebola schopná nataviť základný materiál a vznikol studený spoj pozostávajúci iba z prídavného materiálu a na okraji vnikli dve samostatné zvarové húsenice. Túto chybu by sme mohli pripísať aj mechanike mechanického oscilátora, ktorý vykonáva rovnomerný pohyb po kružnici, kedy pri použití veľkej šírky rozkvyvu a vyššej frekvencii je väčšia časť pohybu v čase sústredená do hornej a spodnej časti, kde sa privedie energia dostatočná pre natavenie a vytvorenie zvarovej húsenice. Riešením pre tak veľký rozkvyv by mohlo byť použitie iného kinematického modelu oscilátora, ktorý by bol závislý nie na konštantnej uhlovej rýchlosti, ale na konštantnom vnesenom teple t.j napríklad použitie oscilátora riadeného servo pohonom. Tento fenomén zdanlivo negatívneho väčšieho privedeného výkonu limitne na okraji, t.j v hornej a spodnej úvrati pohybu sa ale naopak ukázal ako možná výhoda pri rozkvyve na tupých zvaroch, kde sa prirodzene dosahoval väčší prievár základného materiálu v porovnaní s kútovým zvarom.



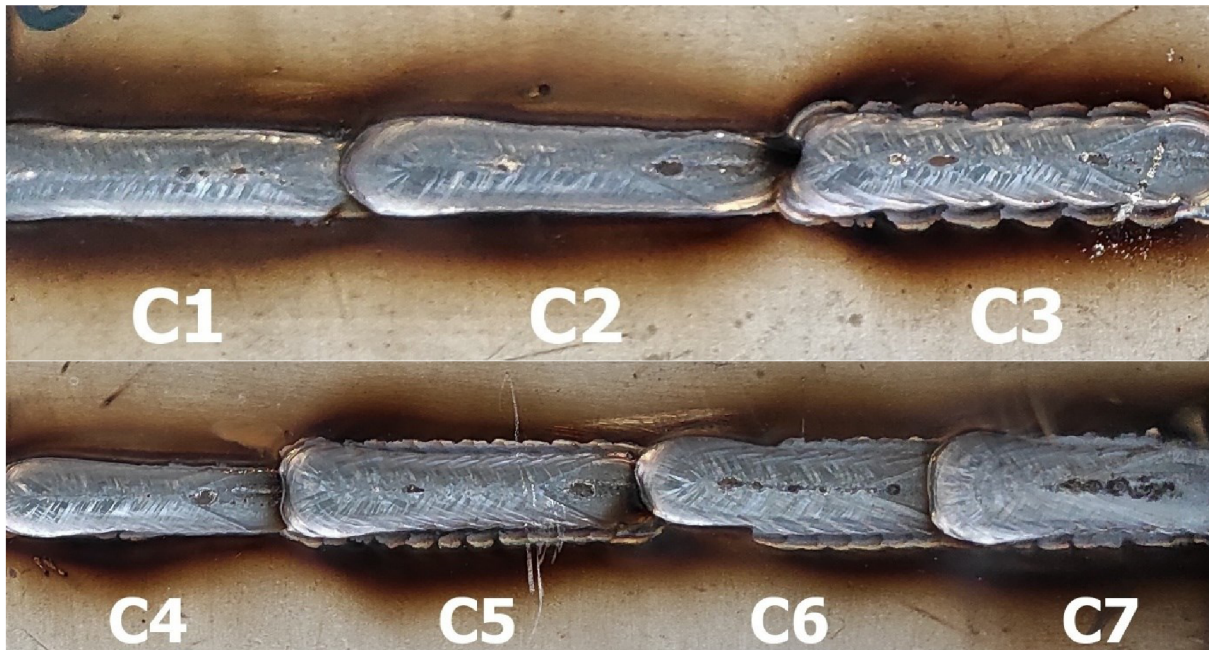
Obr. 31 - Zvar vľavo veľká rýchlosť oscilácie a široká amplitúda rozkvyvu, vpravo nerovnomerný návar.

Ďalšou chybou, ktorá bola pozorovaná je výrazné alebo menej výrazné nerovnomerné rozloženie zvarovaného kovu spôsobené posunom dvoch rovín, roviny zvaru a roviny v ktorej ležala os rotácie mechanického oscilátora. V závislosti na vzdialenosti roviny otáčania oscilátora bola rovina zvaru posunutá a toto vychýlenie malo za následok uloženie zvaru iba na jednu stranu zvarovaného kovu a nedošlo k prepojeniu oboch materiálov prípadne došlo k nerovnomernému návaru, čo bol ale predvídateľný jav a vznikol nedostatočnou rovnobežnosťou podložky a zvarovacieho podvozku.

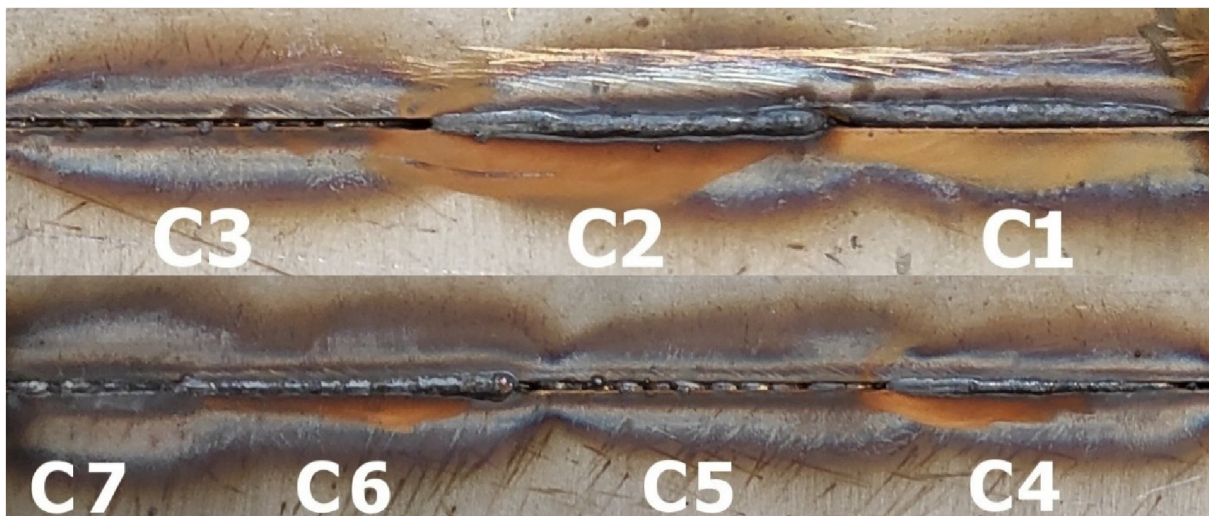
#### 4.3.2 Kontrola povrchu vzoru C

Špecifikácie duplexného materiálu u vzorkov vyžadovali zvýšenú pozornosť na tepelný príkon, praktické skúsenosti odporúčajú tepelný príkon držať v rozmedzí od 0.5 do 1 kJ/mm toto odporúčanie je ale pre rozsah hrúbiek materiálu 8-16mm. U vzorkov C1 až C7 Obr. 32 a Obr. 33 boli pozorované najmä chyby v oblasti koreňa - studený spoj alebo neprevarený koreň, všetky zvarové húsenice vykazovali dobrú vizuálnu kvalitu zvaru. Húsenice mali ihneď po zavarení jasnú čistú štruktúru s viditeľným zrnom, ktorého časti menili jas podľa uhlu odrazu svetla bez známok povrchových oxidov. V ich okolí sa vyskytoval tmavohnedý opar, ktorý však nepripomína opar vznikajúci z oxidov na povrchu vo farbách žltej až modrej farby. Opar tiež zachytil, ktoré vzorky boli vytvorené s rozkvyvom a ktoré bez rozkvyvu horáku. Zo strany koreňa

je vidieť jasne modrú farbu povrchových oxidov typickú pre ohriatie nerezovej oceli. Modrá farba zodpovedá hornému limitu hrúbky oxidovej vrstvy pred šedou. Po približne 10 minútach sa na povrchu taktiež vytvoril opar ktorý mal ale červené sfarbenie a bolo možné ho jednoducho zotrieť.



Obr. 32 - VZORKY C - STRANA ZVAROVEJ HUSENICE

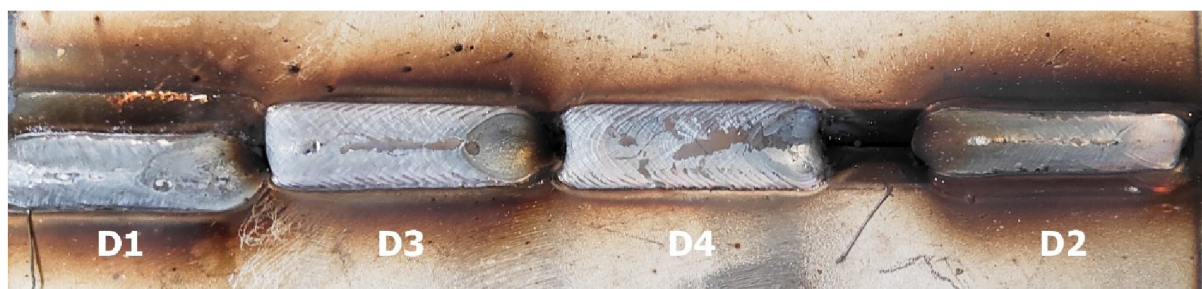


Obr. 33 - VZORKY C - KOREŇOVA VRSTVA ZVARU

#### 4.3.3 Kontrola povrchu vzoru D

Zvarovanie vzorov D Obr. 34 a Obr. 35 vykazuje všetky teoretické známky zvarovania austenitickej nerezovej oceli, veľmi nízky súčiniteľ tepelnej vodivosti mal za následok iba lokálne prehriatie a prebehlo bez významných chýb v geometrii zvarov a v procese zvarovania, zvarové parametre boli vopred optimalizované na základe čoho zvarové spoje rovnomerné bez viditeľných väd na povrchu. V okolí povrchovej vrstvy zvarov sa čiastočne ukazuje tmavý opar, ktorý je na vzore D4 takmer zanedbateľný, no na vzorke D1 a D2 je významný. Časť zvarovej húsenice oparom viditeľne, ale ovplyvnená nie je. Koreňová vrstva niektorých zvarov vykazuje nedostatočný prievar, alebo lokálne zatečenie tekutého kovu pod úroveň koreňu.

Pre porovnanie rozdielnych zvarových príkonov bol pripravený vzor s použitím zvarovania pod tavidlom, ktoré ponúka dvojnásobný príkon oproti zvarovaniu metódou MAG.



Obr. 34 VZORKY D – STRANA ZVAROVEJ HUSENICE



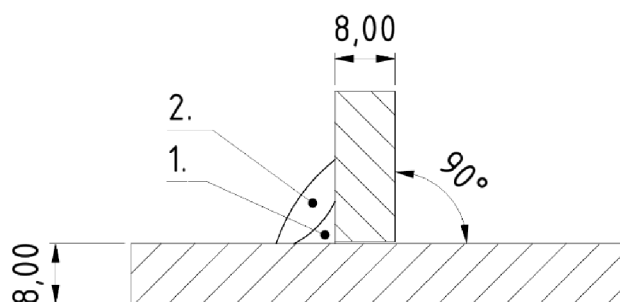
Obr. 35 VZORKY D – KOREŇOVA VRSTVA ZVARU

#### 4.4 Metalografické hodnotenie vybraných vzorkov

Metalografický rozbor bol vykonaný na základe normy ČSN EN ISO 17 639:2014. Všetky vzorky boli narezané kolmo na os zvarovej húsenice, narezané na metalografickej píle, vybrúsené na tanierovej brúske pod vodným chladením postupne brusnými papiermi na brúsenie pod vodou so zrnitosťou 180, 240, 400, 600, 1200 a následne naleptané leptadlom na korozivzdornú oceľ čiastočným ponorením skúmanej plochy do petriho misky. Následne bola plocha neutralizovaná, opláchnutá a vysušená. Vzorky boli pomerne veľké, takže neboli zaliate do epoxidovej živice ani do iného média.

Vzory boli pozorované stereo mikroskopom SCHUT SSM-EC2 a povrch bol snímaný a premietaný kamerou Dino eye a obrazy boli z dôvodu nedostatočne širokého záberu pospájané panoramatickým software Hugin do jedného obrázku s vysokým rozlíšením. Následne boli snímky zanalyzované a boli zamerané základné rozmery defektov a rozmery samotných zvarov. Následne bol povrch zachytený fotoaparátom Nikon D7100 s makro objektívom, výstupné obrázky boli vo vysokom rozlíšení so silným osvetlením a nízkou svetelnosťou výsledných fotografií, čo malo za následok veľmi nízku úroveň jasnosti a veľmi veľa zachytených dát v stredných farebných tónoch fotografického histogramu. Následným spracovaním obrazu a rozťahnutím obrazových dát histogramu na plnú dostupnú šírku spektra fotografie, boli dosiahnuté obrázky s širokým dynamickým rozsahom, ktoré veľmi jasne popisujú široké spektrum jednotlivých štruktúr zachytených na vyhotovených fotografiách. Technické vybavenie kamery mikroskopu nebolo dostatočné na to, aby boli snímky dostatočne široké na to, aby boli schopné zahrnúť celú plochu zvaru spolu s pridaným rozsahom základného materiálu a zároveň dostatočne popisné na zhodnotenie zmien štruktúr v tepelne ovplyvnenej oblasti. Hodnotenie metalografických výbrusov sa pridrižiava normy ČSN EN ISO 5817 a hodnotí všetky kritéria ako trhliny, póry, studené spoje, nadmerné prevýšenie zvaru, prechody zvarových vrstiev do základného materiálu, nesymetria zvarovej húsenice, ktorá nebola predom predpísaná. Nesúvislé zápaly na prechode zvaru do základného materiálu, alebo neprevarené koreň pretečenie zvaru alebo vrub v koreni.

## 4.4.1 Vzorka B1 (8mm ROZKYVV)

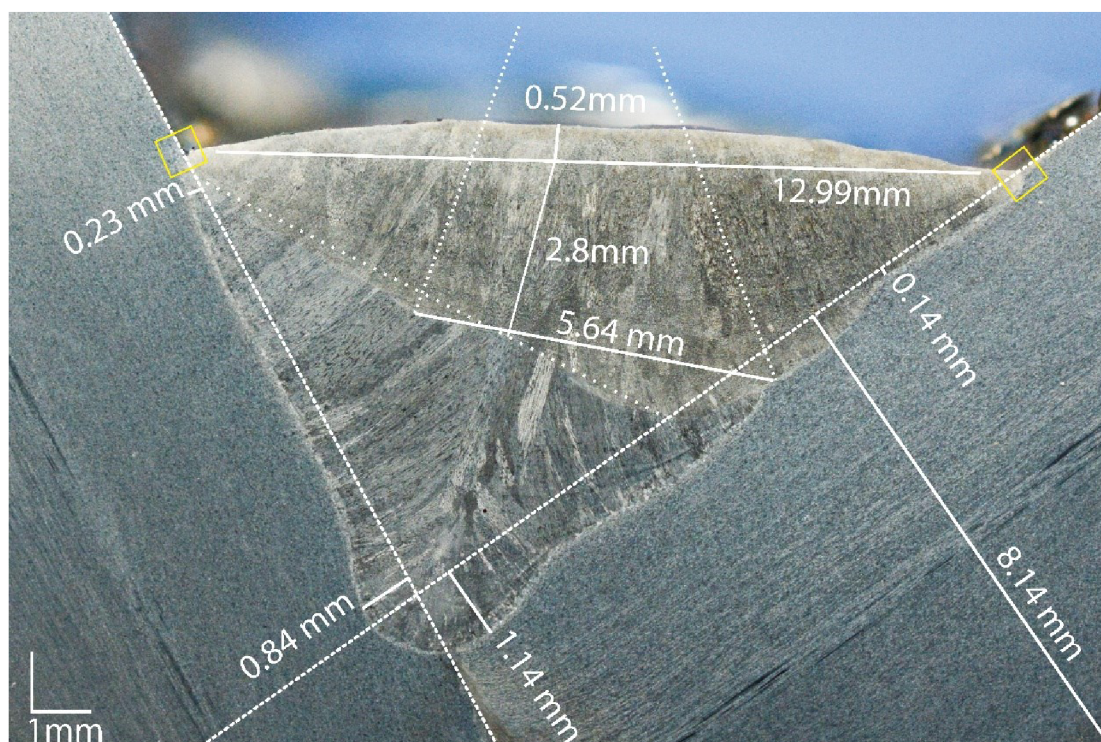


Obr. 36 Geometria vzoru B1



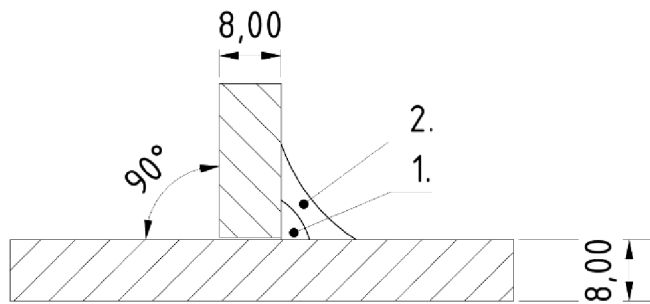
Obr. 37 Rez a povrchová vrstva zvaru B1

Vzor B1 Obr. 36 a Obr. 38 bol zvarovaný dvoma húsenicami s uhlom  $90^\circ$  bez úpiniek. Húsenica B1-1 bola kladená po celej dĺžke bez rozkyvu s  $U = 21,2V$ ,  $I = 181A$ ,  $v_c = 20cm/min$ , môžeme pozorovať veľmi miernu hĺbku prievaru s maximom na úrovni  $1,14mm$  do základného materiálu na okrajoch bez výrazných prehriatych častí, jasne kladené podlhovasté zrná a dobrý prievar v oblasti koreňa. Druhá húsenica č.B1-2 bola kladená s parametrami  $U = 21,2V$ ,  $I = 181A$ ,  $v_c = 20cm/min$ , s rozkyvom s frekvenciou  $1 Hz$  s nižšou amplitúdou rozkyvu horáku na úrovni  $8/2mm$ , na výbruse je zachytená stopa rozkyvu s veľkosťou  $5,64/2mm$  ktorá spôsobila nedostatočné rozliatie materiálu v okrajových častiach. Limitne (označené žltým rámkom) by sme mohli hovoriť o nenadviazaní okrajovej časti zvaru do základného materiálu. zvarovej húsenice a za vzniku prebytku materiálu v strednej oblasti zvaru vznikol zvar s konkávnou geometriou. Zrná zvarových húseníc sú pozdĺžne, jednoznačne orientované a ohraničené. V mieste väčšieho prievaru vpravo môžeme pozorovať mierne zhrubnutie zrna. Zvarová húsenica zvaru B1-1 vykazuje v strede závaru lokálne stiahnutiny ktoré sa prejavujú zmenou orientácie zrn smerom k stredu zvarovej húsenice, kde v prípade nepriaznivých materiálových podmienok hrozí lokálna trhlinka za tepla. V prípade húsenice B1-2 s rozkyvom horáku takéto trhlinky pozorované nie sú, môžu však byť orientované v iných rezoch zvarovej húsenice v rámci rozkyvu horáku. Odhad závaru je 10%.



Obr. 38 Metalografický výbrus vzoru B1

## 4.4.2 Vzorka B4 (8mm ROZKYV)

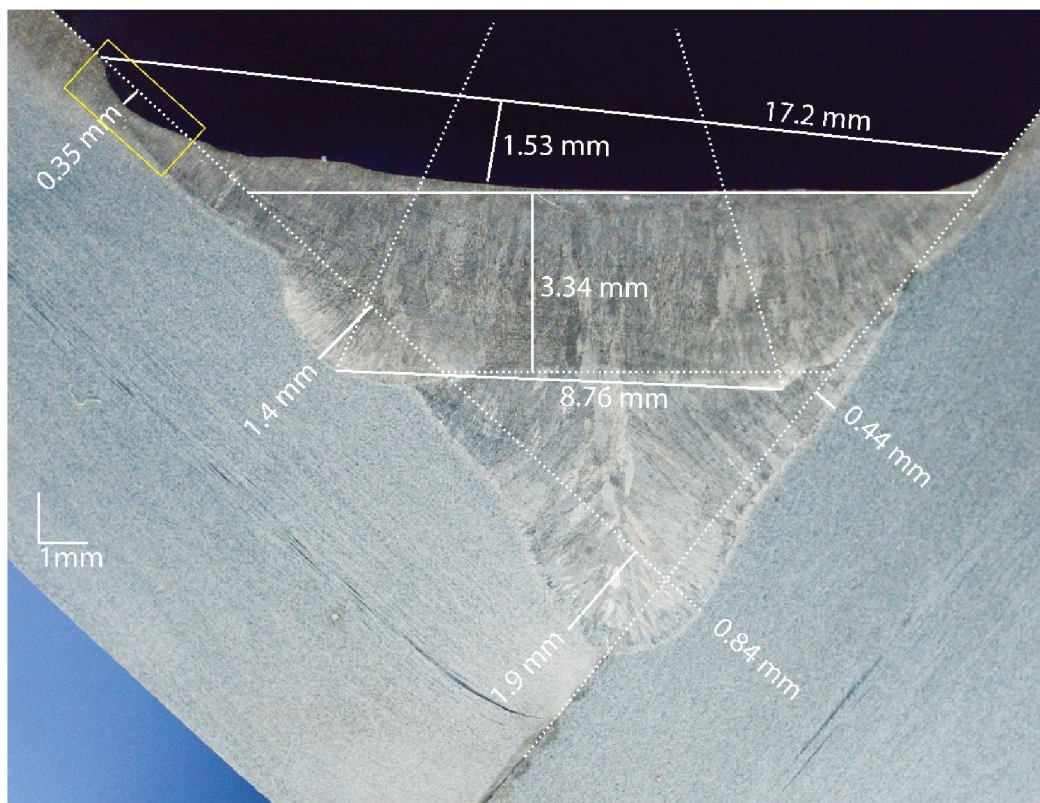


Obr. 39 Geometria vzoru B4



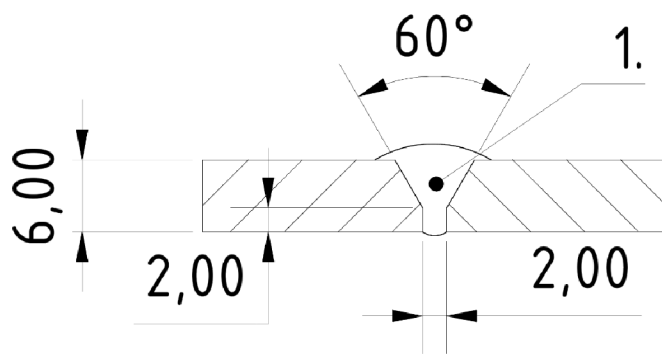
Obr. 40 Rez a povrchová vrstva zvaru B4

Zvarová húsenica B4-1 Obr. 39 a Obr. 41 bola zvarovaná s  $U = 21,2V$ ,  $I = 181A$ ,  $v_c = 20cm/min$  bez rozkyvu s mierne nesymetrickým závarom na ľavom a pravom okraji bez významných lokálnych priedarov. Koreň zvaru vykazuje dobrú kvalitu s hlbším závarom na ľavej strane, zrná jednotlivých strán sú orientované voči sebe pod uhlom približne  $85^\circ$  s lokálnym stiahnutím v strede zvaru. Húsenica B4-2 bola zvarovaná rozkyvom s rovnakou frekvenciou, ale s vyššou amplitúdou na úrovni 11/2mm. Čo spôsobilo výrazne viac energie sústredenej na okraji zvaru vpravo s dobrým natavením základného materiálu a s jemným prechodom do zvarového spoja, na ľavej strane však vplyvom posunutia osy rozkyvu mierne doľava vznikol prepál základného materiálu a vrub v hĺbke 0,35mm. Na výbruse sa odhadovaná amplitúda prejavila v šírke 8.76/2mm s výrazným priedarom na ľavej strane na úrovni 1,4mm priedar na pravej strane nie je tak výrazný, čo značí určitý posun dopredu a dozadu v rámci oscilácie. Čistý návar druhej húsenice je na úrovni 3,34mm. Spôsobená konvexnosť zvaru je na úrovni 1,53mm a je nerovnomerná. Čo má rovnako za následok väčší priedar. Zvar bol vyhotovený v polohe PA tak, ako je zobrazený na obrázku, čo pôsobilo zatekanie zvarového materiálu vplyvom gravitácie do najnižšieho miesta. Odhad závaru je 12%.

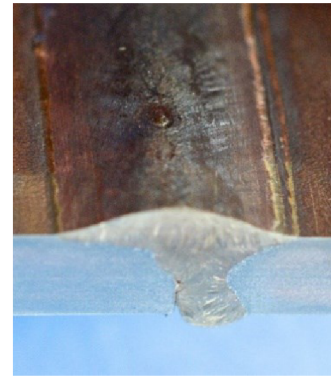


Obr. 41 Metalografický výbrus vzoru B4

## 4.4.3 Vzorka C1 (6mm LINEAR)

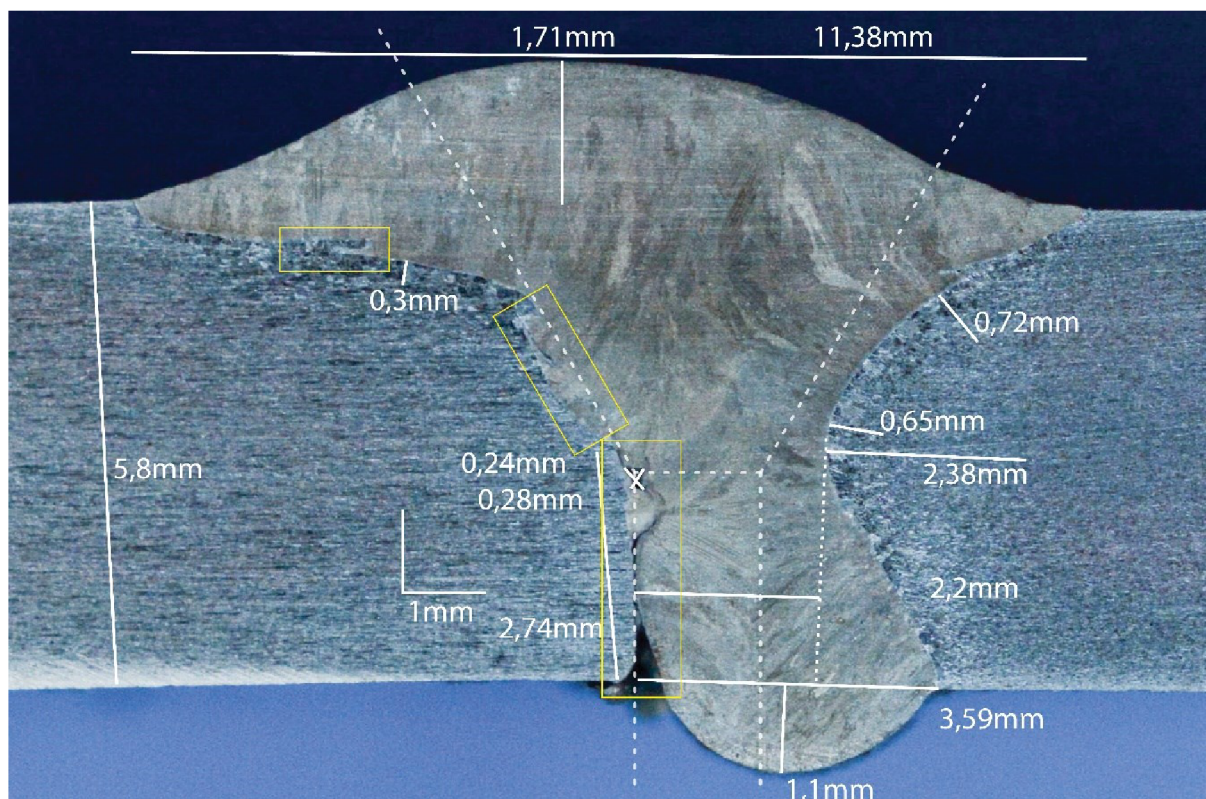


Obr. 42 Geometria vzoru C1



Obr. 43 Rez a povrchová vrstva zvaru C1

Na vzorke C1 Obr. 42 a Obr. 44 je veľmi dobre viditeľná feriticko – austenitická štruktúra základného materiálu s rozvalcovanými tmavými a bledými hranicami jednotlivých zložiek feritu a austenitu. Vzorka bola zvarovaná jednou lineárnou zvarovou húsenicou v polohe PA s parametrami  $U = 20,1V$ ,  $I = 147A$ ,  $v_c = 40\text{cm/min}$ . Vrchná zvarová vrstva má šírku 11.38mm a prevýšenie voči základnému materiálu 1.7mm. Na zvaru je pozvoľný prechod do základného materiálu bez viditeľných trhlin a neprievarov v jeho okraji. Zrná vo vrchnej časti sú dlhé jasne ohraničené a orientované vertikálne. Koreňová vrstva zvaru vykazuje hrubé nedostatky. Kryštály sú na seba orientované približne pod  $90^\circ$  uhlom s osovou stiahnutinou. Ktorá sa nepravidelne tiahne v okolí pravej strany materiálu až k vrchnej vrstve zvaru. Prevarený koreň je na pravej strane s veľmi dobrým širokým závarom, ľavá strana koreňa však vykazuje studený spoj v hĺbke 2.74mm čo je neprípustná chyba zvarového spoja. Odhad závaru je 40%.

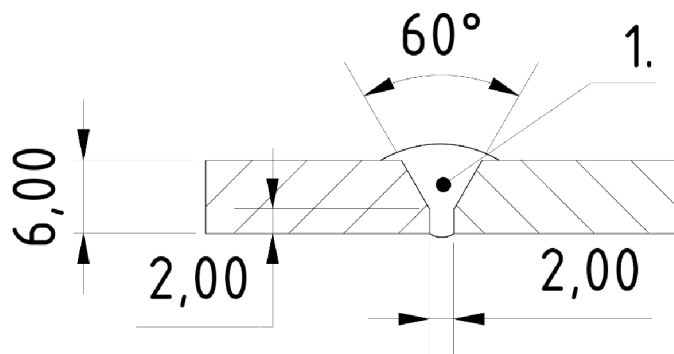


Obr. 44 Metalografický výbrus vzoru C1

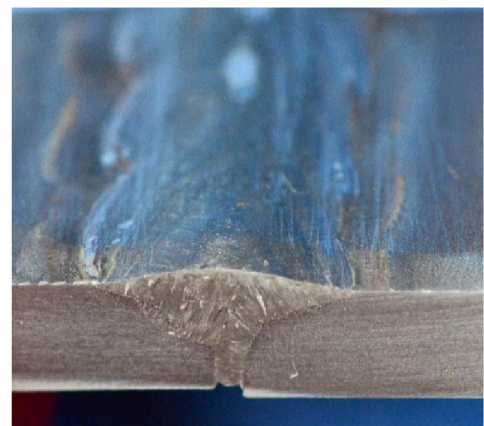
V okolí zvarového spoja je významne viditeľné pásmo TOO, ktorého dôsledok je pásmo so zhrubnutým duplexným zrnom v šírke aspoň 0,6-0,75 mm v pravej časti zvaru, toto pásmo prechádza postupne do základného materiálu až vo vzdialenosti približne 2,38mm, kde už je

materiál bez tepelného ovplyvnenia. V ľavej časti výbrusu môžeme pozorovať prievar a zhrubnutie iba v rámci povrchovej vrstvy, kde je vidieť značné zhrubnutie zrna v hĺbke 0,3mm, v strednom pásme zvaru nie je možné pozorovať žiadnu ovplyvnenú zónu, čo ku koncu vedie k pásnu s neprevareným koreňom. V ľavej časti v žltých rámikoch môžeme pozorovať čiastočne natavené fláky základného materiálu, ktoré sa nepremiešali so zvarovým kovom a štruktúra kovu zostala pôvodná duplexná, no v jej okolí sa nachádza dobre premiešaná zmes základného materiálu a zvarového kovu.

#### 4.4.4 Vzorka C3 (6mm ROZKYV)

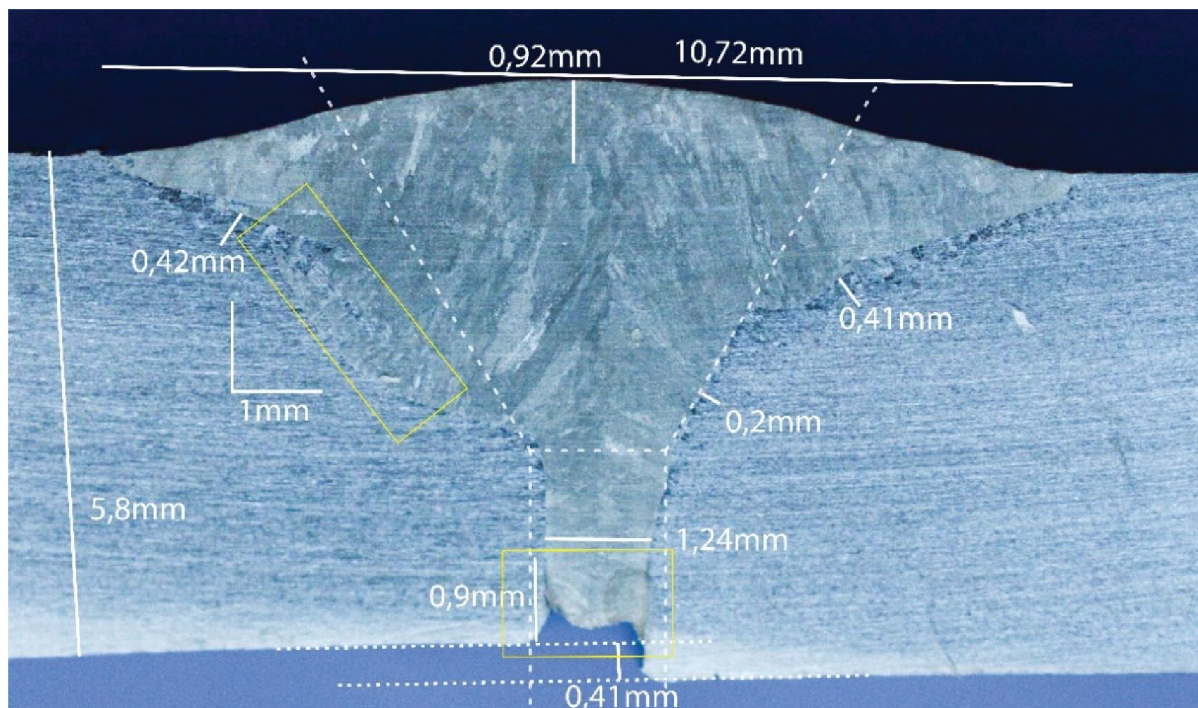


Obr. 45 Geometria vzoru C3



Obr. 46 Rez a povrchová vrstva zvaru C3

Vzorka bola zvarovaná jedným zvarovým spojom Obr. 45 a Obr. 47 s rozkyvom s parametrami  $U = 21,1 \text{ V}$ ,  $I = 180 \text{ A}$ ,  $v_c = 20 \text{ cm/min}$  s amplitúdou rozkyvu 6/2 mm a frekvenciou 1 Hz. Zvarový spoj má šírku 10.72 mm a prevýšenie oproti základnému materiálu 0.92 mm s plynulým nábehom na základný materiál zrno v hornej vrstve je orientované kolmo k povrchu bez lokálnych stiahnutí. . Odhad závaru je 35%.



Obr. 47 Metalografický výbrus vzoru C3

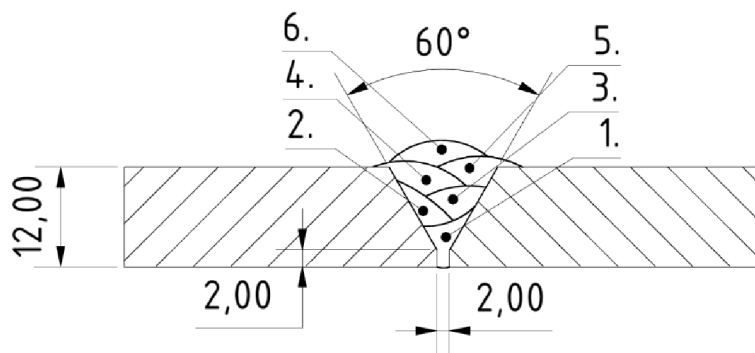
Vplyvom rozkyvu bolo do okrajových vrstiev privedené väčšie množstvo tepla, čo spôsobilo bohaté zhrubnutie zrna rovnomerne na oboch stranách povrchu zvaru s dobrým širokým



závarom za úrovňou pripraveného úkosu s dobrým a rovnomerným zmiešaním základného materiálu so zvarovým kovom. V strednom pásme sa začínajú objavovať stiahnutiny, ktoré pokračujú symetricky až ku koreňu zvaru. V strednom pásme môžeme pozorovať rovnako podtavené hrany - odtavené vmestky nepremeneneho základného materiálu obklopené zvarovaným materiálom s dobrým prievarom v žltom rámičku.

Koreňová vrstva je mierne presadenými plochami zvaru o 0,4mm, a nedostatočne prevareným koreňom zvaru, kam dostatočne nezatiekol zvarový materiál, tiež sú pozorované celkové stiahnutiny a zrná, ktoré sú orientované lineárne oproti sebe v jednej horizontálnej línii. V ľavej časti koreňa sa nachádza 0,9 mm koreňový neprievar. V strednom pásme a v pásme koreňa tiež nie je pozorovaná zmena štruktúry materiálu, ani zhrubnutie zrna a ani tepelne ovplyvnená oblasť, čo je dôsledok rozkvyvu horáku, ktorý sústredil väčšiu časť energie v hornej vrstve zvaru a roztavený kov zatekal do nižších vrstiev.

#### 4.4.5 Vzorka D2 (12mm - 6 VRSTIEV LINEAR)



Obr. 48 Geometria vzorku D2



Obr. 49 Rez a povrchová vrstva zvaru D2

Vzorka 12mm hrubého materiálu Obr. 48 a Obr. 50 zvarovaná sústavou 6 lineárnych zvarov bez rozkvyvu horáku. Šírka koreňovej vrstvy zvaru D2-1 je 3,87mm s jemným zrnom bez jasnej topologickej orientácie. V stredovom pásme sa však viditeľne prejavuje osovo symetrická stiahnutina. V ľavej časti je koreň zvaru dobre prevarený a premiesnený so základným materiálom. V pravej časti však dochádza k studenému spojeniu v hĺbke 1,27mm. Zvarovaný materiál je v oblasti koreňa mierne presadený o 0,8mm. Hrúbka tepelne ovplyvnenej oblasti je v úrovni do 1,3mm a nedochádza k významnému hrubnutiu zrn. Prechod v zvarovom kove je jasne ohraničený.

Medzi jednotlivými vrstvami je nevyhnutné zachovávať medzi húsenicovú teplotu T8/5, takže zvarovanie daného vzorku bolo pomerne zdĺhavé, pretože sme sa snažili zachovať teplotu predohrevu medzi jednotlivými zvarovými húsenicami na úrovni okolo 100° C. Zvarovanie prebiehalo s parametrami  $U = 20,9 \text{ V}$ ,  $I = 176 \text{ A}$ ,  $v_c = 20 \text{ cm/min}$

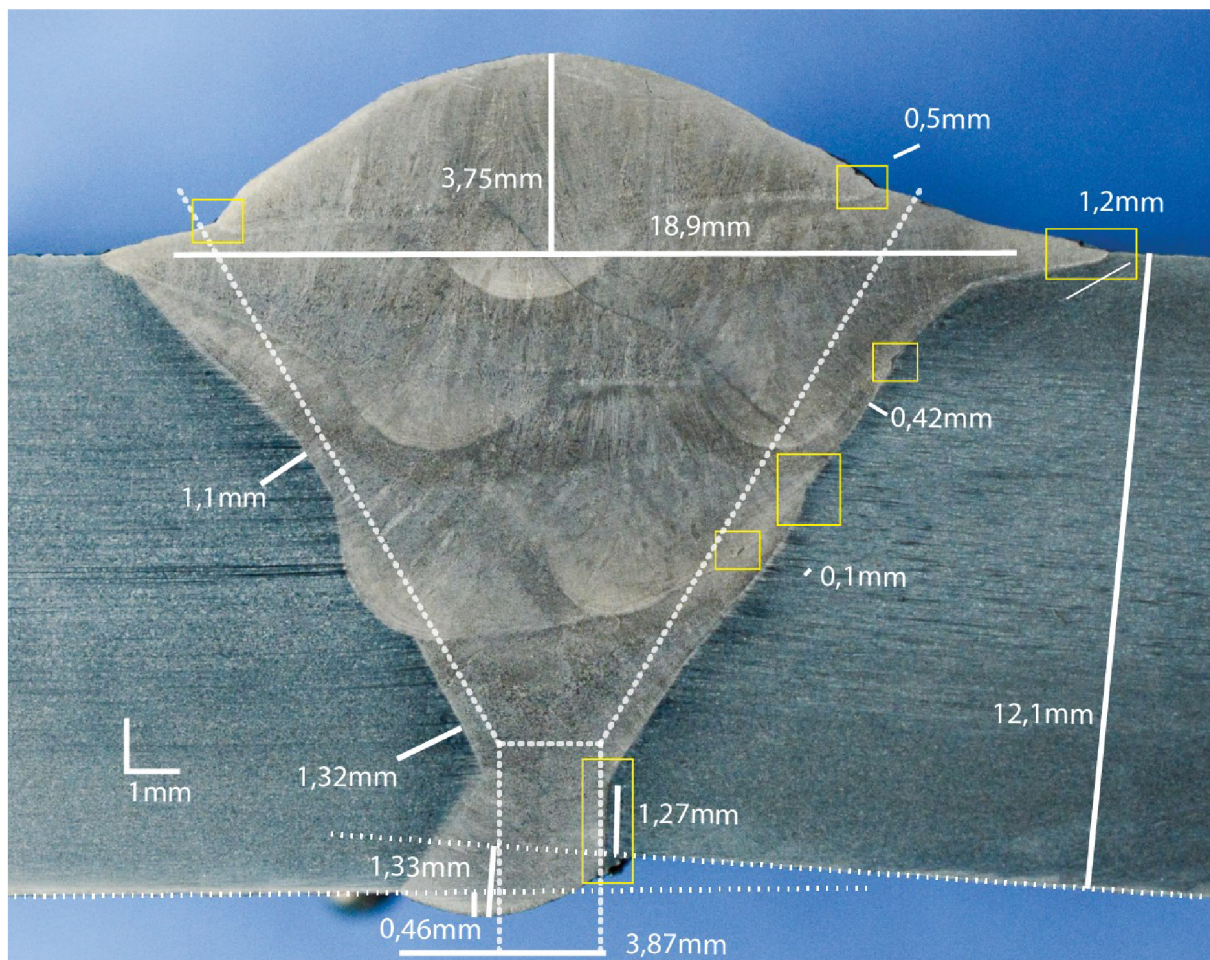
1. zvar – teplota predohrevu  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ , teplota po zavarení  $t_1 = 168^\circ\text{C}$ ,
2. zvar – teplota predohrevu  $t_2 = 87^\circ\text{C}$ , teplota po zavarení  $t_3 = 188^\circ\text{C}$ ,
3. zvar – teplota predohrevu  $t_4 = 120^\circ\text{C}$ , teplota po zavarení  $t_5 = 270^\circ\text{C}$ ,
4. zvar – teplota predohrevu  $t_6 = 106^\circ\text{C}$ , teplota po zavarení  $t_7 = 298^\circ\text{C}$ ,
5. zvar – teplota predohrevu  $t_8 = 123^\circ\text{C}$ , teplota po zavarení  $t_9 = 313^\circ\text{C}$ ,
6. zvar – teplota predohrevu  $t_{10} = 121^\circ\text{C}$ , teplota po zavarení  $t_{11} = 344^\circ\text{C}$ ,

Čas chladnutia medzi jednotlivými zvarmi bol pomerne dosť dlhý na úrovni cca 10 minút vzhľadom na malú dĺžku zvaru a pomerne zlé vlastnosti tepelnej vodivosti. Pri veľkých

zvarovacích zostavách môže byť celkové naakumulované teplo omnoho väčšie a čas na ochladnutie výrazne predĺžený. Samozrejme záleží na veľkosti celkovej súčasti a pomere dĺžiek zvarov voči celkovej veľkosti zvarenca.

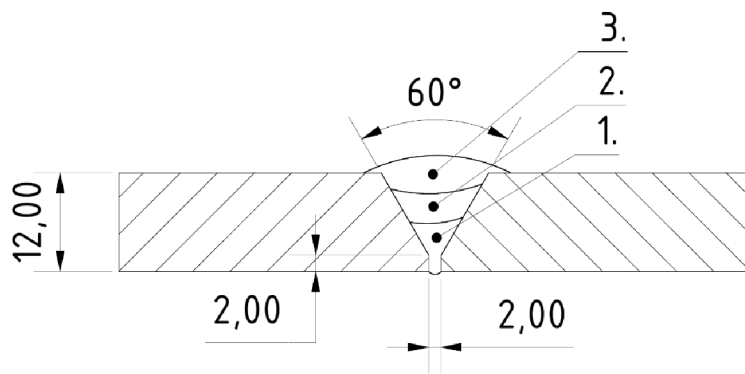
Na rozhraní jednotlivých vrstiev najmä v strednom pásme vznikali pravdepodobne vplyvom nečistôt miesta s lokálnymi malými nespojitými plochami – malými studenými spojmi s rozmerom 0,1-1,2mm. V strednom pásme nie je pozorované významné zhrubnutie zŕn v pôvodnom materiály, je však viditeľné v zvarových húseniciach, ktoré boli zvarované skôr vždy v pásme približne 0,5mm od hranice medzi jednotlivými zvarovými húsenicami. Tepelne ovplyvnená oblasť je nevýrazná, a líši sa iba jemným stmavnutím v okolí závaru do pôvodného materiálu.

Šírka hornej vrstvy zvaru je 18,9mm a prevýšenie voči základnému materiálu 3,75mm s plynulým nábehom do základného materiálu, ale s lokálnym vrypom alebo trhlinou. A nerovnosťami na rozhraní jednotlivých zvarových húseníc. Odhad závaru je 20%.

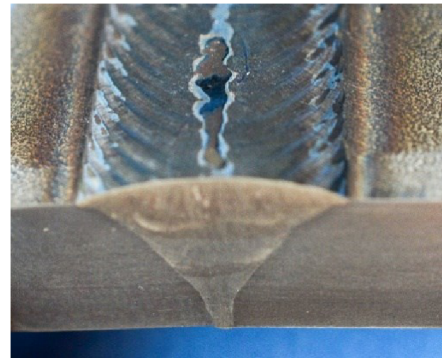


Obr. 50 Metalografický výbrus vzoru D2

## 4.4.6 Vzorka D3 (12mm - 3 VRSTVY ROZKYV)



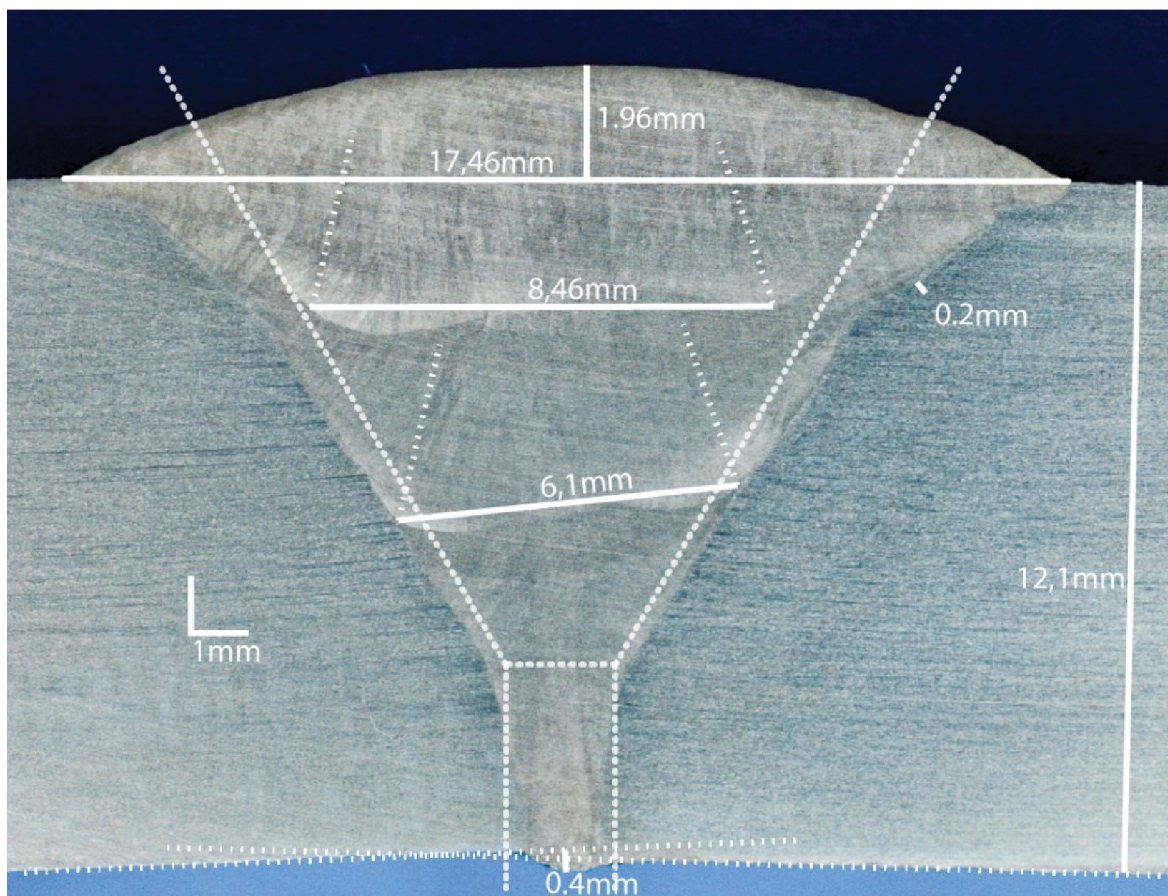
Obr. 51 Geometria vzoru D3



Obr. 52 Rez a povrchová vrstva zvaru D3

Vzor D3 Obr. 51 a Obr. 53 bol zvarovaný na 3 zvarové húsenice. Prvá zvarová húsenica bola zvarovaná bez rozkvyvu. Parametre zvarovania boli s rozkvyvom s amplitúdou 7/2mm

1. zvar – teplota predohrevu  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ , teplota po zavarení  $t_1 = 180^\circ\text{C}$ ,  $v_{c1} = 32\text{cm/min}$ ,  $I_1 = 190\text{A}$ , frekvencia 0 Hz,
2. zvar – teplota predohrevu  $t_2 = 70^\circ\text{C}$ , teplota po zavarení  $t_3 = 195^\circ\text{C}$ ,  $v_{c2} = 21\text{cm/min}$ ,  $I_2 = 182\text{A}$ , frekvencia 1.8 Hz,
3. zvar – teplota predohrevu  $t_4 = 87^\circ\text{C}$ , teplota po zavarení  $t_5 = 225^\circ\text{C}$ ,  $v_{c3} = 21\text{cm/min}$ ,  $I_3 = 182\text{A}$ , frekvencia 1.8 Hz, Odhad závaru je 10%.

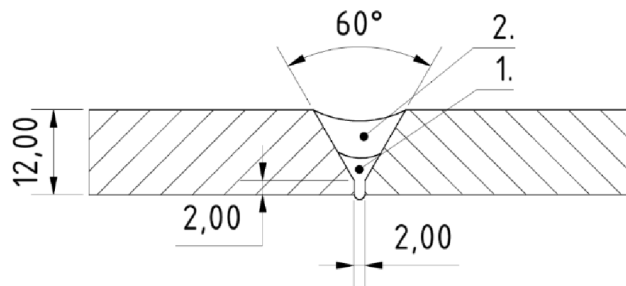


Obr. 53 Metalografický výbrus vzoru D3

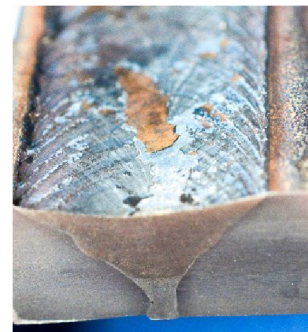
V oblasti koreňovej vrstvy zvaru D3-1 môžeme pozorovať dobrý zvar s 0,4mm prevýšením so symetrickou jemnozrnnou štruktúrou bez viditeľných stiahnutí, s veľmi malou tepelne

ovplyvnenou oblasťou na úrovni do 0,5mm koreňová vrstva má nevýrazné presadenie na úrovni 0,2mm. V okolí zvaru D3-2 je vidieť primárny a sekundárny zvarový závar. Ktorý však nezasahuje do základného materiálu, šírka jednotlivých závarov má amplitúdu 6,1/2mm. Zvar D3-3 je jemnozrnný s jemne objavujúcou sa štruktúrou s orientáciou zrn. Povrchová vrstva má ostrejšiu návaznosť na základný materiál s šírkou zvaru 17,46 mm konkávnym prevýšením oproti základnému materiálu 1,96mm. Šírka primárneho a sekundárneho závaru je s amplitúdou 8,46/2mm. Zvar má veľmi malú tepelne ovplyvnenú oblasť do 0,2mm, a vonkajších okrajoch zvarovej húsenice je vidieť mierne prievary okrajovej vrstvy do základného materiálu, inak celý zvar kopíruje tvar východzej geometrie. V rovine výbrusu neobsahuje žiadne viditeľné vady.

#### 4.4.7 Vzorka D4 (12mm - 2 VRSTVY ROZKYV)



Obr. 54 Geometria vzoru D4

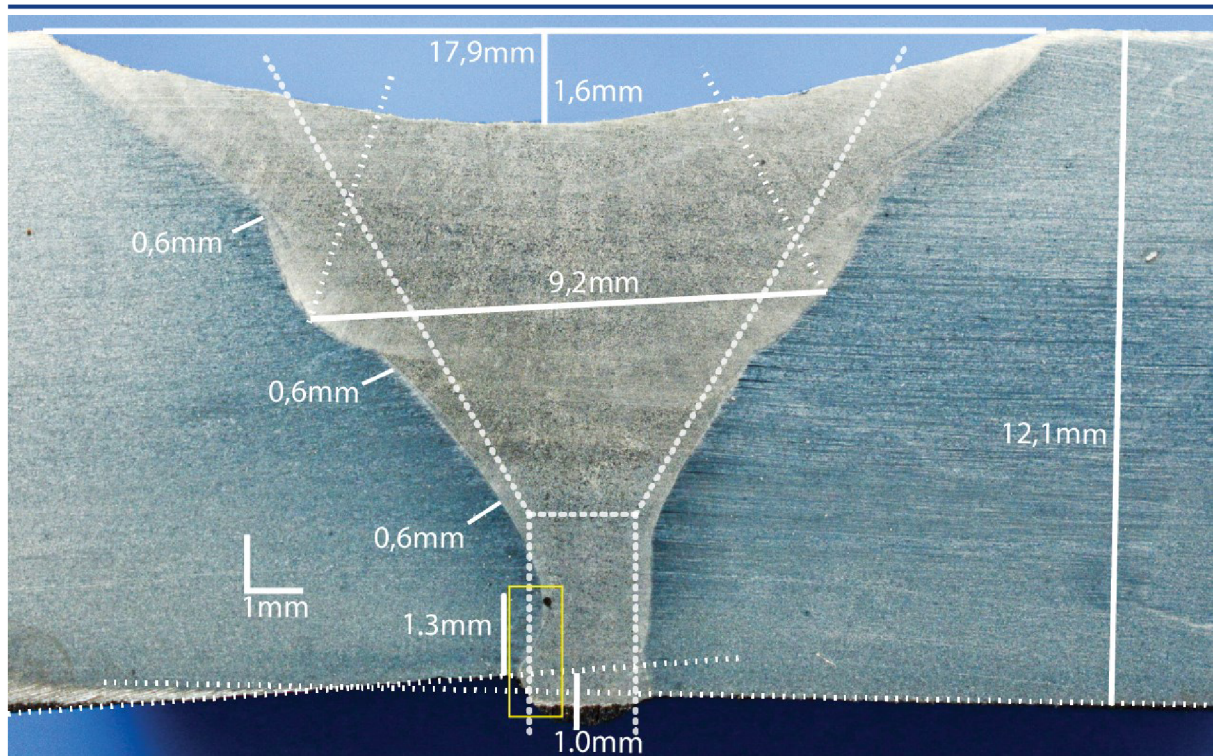


Obr. 55 Rez a povrchová vrstva zvaru D4

Vzorka D4 Obr. 54 a Obr. 56bola vytvorená s cieľom vytvoriť plnohodnotný zvar na 2 prejazdy, vplyvom nízkej rýchlosti podávania drôtu, ale došlo k nízkej dávke pridávaného materiálu, čo malo za následok prepadnutie zvaru a zúženie prierezu, čo je z pohľadu prevedenia zvaru v praxi neprípustná zmena geometrie za vzniku výrazného nerovnomerného vrubového napätia pri zaťažení priamo v zvarovej oblasti. Zvarový spoj bol zvarovaný s parametrami - amplitúda 8/2mm

1. zvar – teplota predohrevu  $t_0 = 20^{\circ}\text{C}$ , teplota po zavarení  $t_1 = 185^{\circ}\text{C}$ ,  $v_{c1} = 35\text{cm/min}$ ,  $I_1 = 182\text{A}$ , frekvencia 0 Hz,
2. zvar – teplota predohrevu  $t_2 = 70^{\circ}\text{C}$ , teplota po zavarení  $t_2 = 195^{\circ}\text{C}$ ,  $v_{c2} = 18\text{cm/min}$ ,  $I_2 = 190\text{A}$ , frekvencia 1.8 Hz,

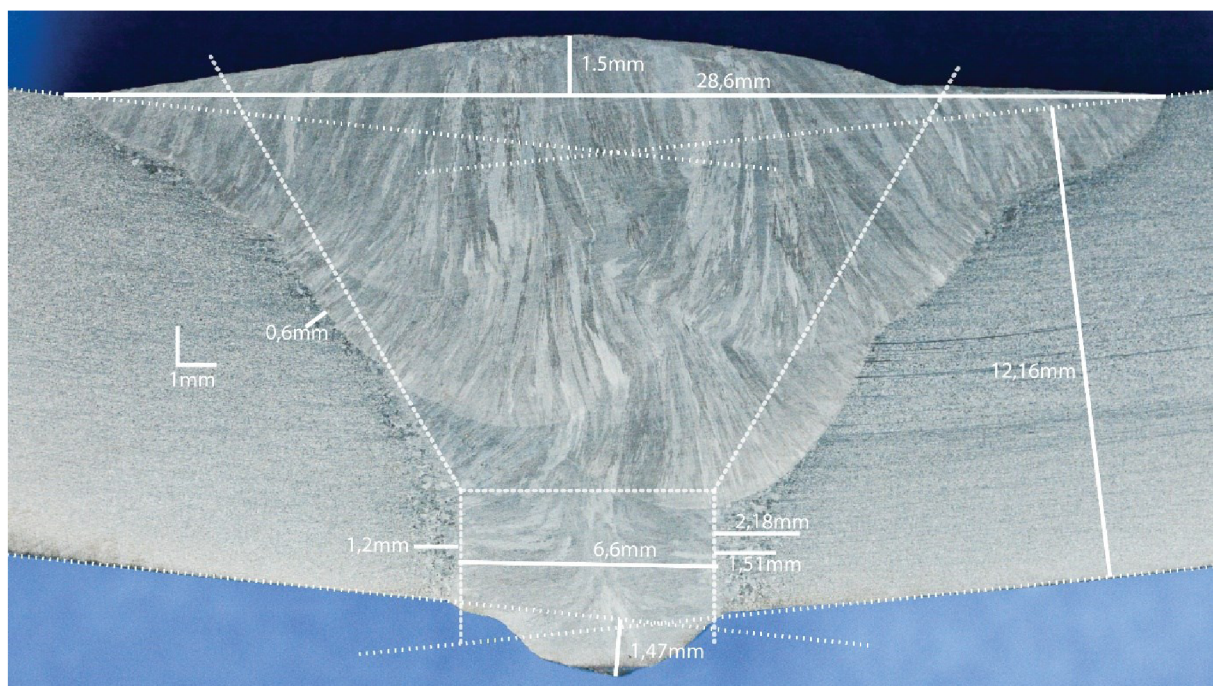
Zvarová húsenica D4-1 bola zvarovaná bez rozkvyv v zvarovej húsenici, je vidieť jemne zhrubnuté oválne zrno bez jasnej orientácie s veľmi miernou sťaženinou v osi zvarovej húsenice. Tepelne ovplyvnená oblasť je na úrovni 0,6mm bez významného zhrubnutia materiálu. V strednom pásme zvaru vidíme 2 výrazné závary – primárny vľavo sekundárny vpravo, ktoré sú mierne asymetrické bez ďalších ohraničení jednotlivých zvarových húseníc, čo je príznačné pre zvar vytvorený s rozkvyvom, práve na tomto vzore je jasne viditeľné pásmo s výrazne menšou šírkou TOO na rozhraní prvej a druhej zvarovej húsenice, s výnimkou veľmi blízkeho okolia hlavného závaru. Kde je tepelne ovplyvnená oblasť rovnako, ako pri lineárnom zvare na úrovni menej 0,6mm. V strede druhej zvarovej húsenice môžeme vidieť mierne zhrubnutie zrna miestami hrubšieho, ako v prípade zvarovej húsenice D4-1. Vrchná vrstva zvaru má rovnomernú skladanú topológiu tvorenú postupným ochladzovaním zvarového kovu, šírka zvaru je 17.9mm, konvexné prehĺbenie voči základnému materiálu je 1.6mm . Odhad závaru je 25d%.



Obr. 56 Metalografický výbrus vzoru D4

#### 4.4.8 Vzorka D5-T (12mm – 5 VRSTIEV LINEÁRNE)

Vzorka zvarovaná pod tavidlom Obr. 57 je uvedená pre doplnenie, a porovnanie výsledkov problematiky a dôsledkov zvarovania s výrazne väčším tepelným príkonom. Vzorka bola vyrezaná z východzieho materiálu použitého na zvarovanie vzorov. Geometria a šírka návaru zvarovej húsenice vytvorenej pod tavidlom sa približuje výsledkom zvarovej húsenice, ktorá bola vytvorená s rozkyvom horáku metódou MAG. Zvarové húsenice boli zvarované lineárnym zvarom. Zvarovanie pod tavidlom sa vyznačuje vysokou produktivitou. . Odhad závaru je 40%.



Obr. 57 Metalografický výbrus vzoru D-T

---

Zvar bol zvarovaný do V úkosu s vrcholovým uhlom  $45^\circ$ , zvar bol vytvorený metódou 121 v polohe PA na 5 zvarových húseníc s priemerom drôtu 3.2mm, pre ochranu zvaru aj koreňa bolo použité tavidlo P2007 a rýchlosť podávania drôtu bola 2,6cm/min pre všetky zvarové húsenice.

1. zvar –  $U_1 = 32V$ ,  $I_1 = 450A$ ,  $v_{s1} = 42cm/min$ , teplota predohrevu  $t_0 = 20^\circ C$
2. zvar –  $U_2 = 32V$ ,  $I_2 = 530A$ ,  $v_{s2} = 32cm/min$ , teplota predohrevu  $t_3 = 124^\circ C$
3. zvar –  $U_3 = 32V$ ,  $I_3 = 530A$ ,  $v_{s3} = 32cm/min$ , teplota predohrevu  $t_5 = 122^\circ C$
4. zvar –  $U_4 = 32V$ ,  $I_4 = 530A$ ,  $v_{s4} = 32cm/min$ , teplota predohrevu  $t_7 = 128^\circ C$
5. zvar –  $U_5 = 32V$ ,  $I_5 = 530A$ ,  $v_{s5} = 32cm/min$ , teplota predohrevu  $t_9 = 132^\circ C$

Prvá zvarová húsenica je dobre prevarená, má jasne orientované symetrické dlhé kryštáli zrna so stredovou stiahnutinou, celková šírka koreňovej vrstvy je 6,6mm, v jej okolí je výrazné zhrubnutie zrna na úrovni do 1,2mm, základný materiál je možné pozorovať až od vzdialenosti 2,18mm. Koreňová vrstva je mierne prepadnutá voči základnému materiálu o 1,47mm. A v jej okolí je výrazná plastická deformácia, ktorá je ale spôsobená celkovým napätím v zloženom zvaru. V strednom pásme uložených húseníc 2-3 sa nachádza vertikálne, jasne ohraničené dlhé zrno s miernejšou tepelne ovplyvnenou oblasťou na úrovni 0,6mm. Vrchná vrstva zvaru má 28,6mm a prevýšenie voči základnému materiálu 1.5mm, na okraji pozvoľný nábeh medzi základným materiálom, avšak medzi húsenicou 4 a 5 nie je plynulá nadväznosť, čo môže pôsobiť na zvar ako vrub. Výslednú kvalitu zvaru môžeme hodnotiť ako veľmi dobrú, veľkým nedostatok však je pomerne veľká deformácia

## 4.5 Experimentála skúška ťahom

Skúšané vzory boli vybrané na základe posúdenia zvarového povrchu a koreň tak, aby najmä v koreňovej oblasti nebol neprievar, ktorý by skúšku diskvalifikoval. Bol vybratý vzor C2 a C6 z duplexnej oceli triedy X2CrNiMoN22-5-3 (1.4462) ktorý bol upravený do skúšobnej tyčinky s šírkou  $b$  ( $20.3 \pm 0,25$ )mm a hrúbkou  $a$  ( $5,55 \pm 0,1$ )mm s meranou dĺžkou 80mm.

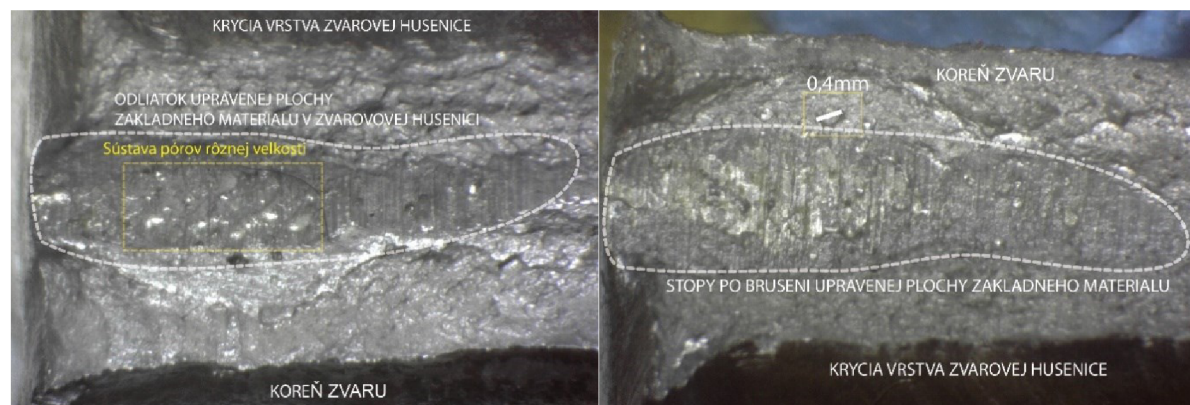
Tab. 5 Namerané hodnoty ťahovej skúšky

Vzorka	a	b	E	Rp <sub>0,2</sub>	Rt <sub>0,5</sub>	Rm	A Lo1
[-]	[mm]	[mm]	[kN/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
C2	5,55	20,35	15,085	579	129	719	12,5
C6	5,51	20,3	15,174	542	110	735	18,75

Tabuľková hodnota pre východzí materiál je pre medzu sklzu aspoň Rp 460 N/mm<sup>2</sup> a medzu pevnosti Rm 650-880 N/mm<sup>2</sup>, pre prídavný materiál sú uvedené tabuľkové hodnoty Rp aspoň 450 N/mm<sup>2</sup>, a Rm aspoň 640 N/mm<sup>2</sup>.

Vzor C2 bol zvarovaný s bez rozkvyvu horáku, podľa Tab. 5 sú uvedené namerané hodnoty medze sklzu Rp<sub>0,2C2</sub> = 579 N/mm<sup>2</sup> a medze pevnosti Rm<sub>C2</sub> = 719 N/mm<sup>2</sup>. Skúška prebiehala postupným zaťažovaním, prekonaním medze sklzu, za akustického efektu vo vysokej frekvencii došlo k miernemu voľným okom neviditeľnému prasknutiu vzoru v oblasti zvaru a došlo k inicializácii zúženia a pozvoľnému trhaniu zvaru postupne z pravej strany do ľavej od miesta inicializácie prvotnej praskliny až po konečný lom.

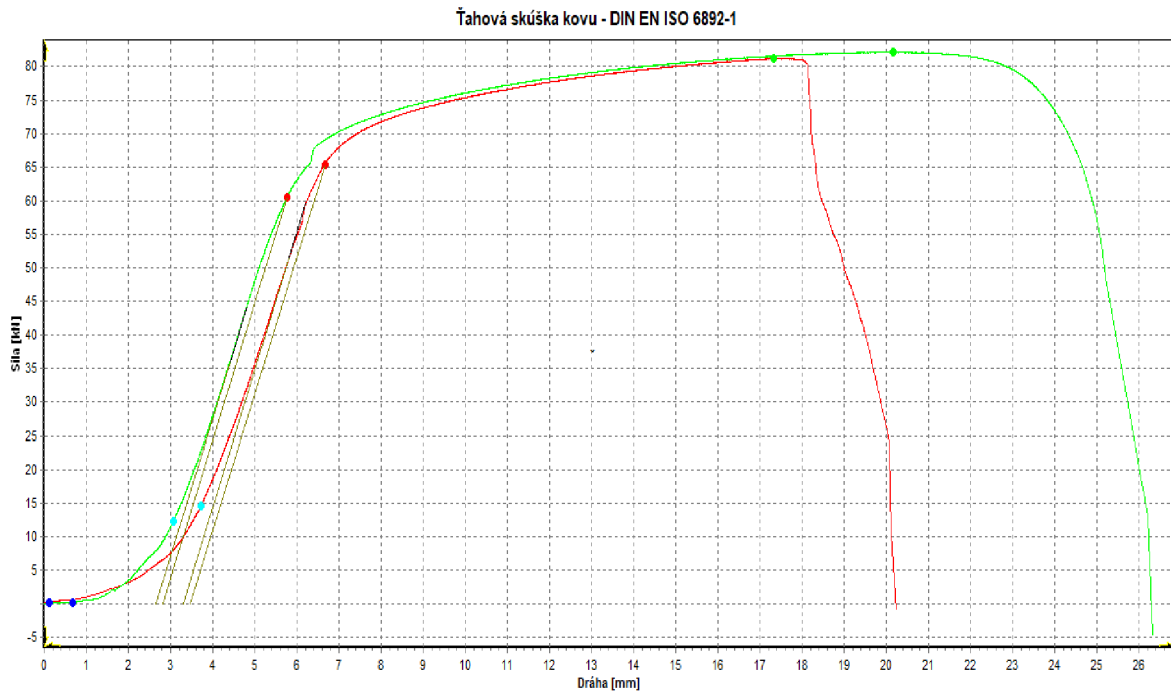
Po preskúmaní lomovej Obr. 58 plochy bol zistený tvárny lom, ktorý nebol inicializovaný v koreňovej vrstve, ale v stredovej vrstve na rozhraní základného materiálu.



Obr. 58 Lomová plocha vzoru C2 ťahovou skúškou orušená v zvare

Vzor C6 bol zvarovaný s rozkvyvom horáku, podľa Tab. 5 sú uvedené namerané hodnoty medze sklzu 0,2% Rp<sub>0,2C6</sub> = 542 N/mm<sup>2</sup> a medze pevnosti Rm<sub>C6</sub> = 735 N/mm<sup>2</sup>. Skúška prebiehala postupným zaťažovaním, prekonaním medze sklzu a pozvoľným vytvorením krčka mimo zvarový spoj a následné veľmi rýchle uvoľnenie napätia tvárnym lomom sprevádzané akustickým efektom v nízkej frekvencii. Výsledkom trhacej skúšky bolo pretrhnutie skúšobného vzoru mimo zvarový spoj v základnom materiáli, namerané hodnoty však vyhovujú pevnosti aspoň základného materiálu a sú lepšie.

Oba vzory majú porovnateľné výsledky v rozmedzí tabuľkových hodnôt základného materiálu. Podľa diagramu sa jedná o pružný materiál bez výraznej medze sklzu. K rozdielom dochádza až za medzou pevnosti v rámci rýchlosti porušenia skúšobného vzorku.



Obr. 59 Ťahový diagram

## 4.6 Skúšky tvrdosti podľa Vickersa

Tvrdosť bola meraná na zariadení Zwick 3212 obstaraný kamerou, ktorá na vyhodnocovanie vzorov využíva software TestXpert od firmy Zwick/Roell. Vzory sú skúmané pomocou mikroskopu a kamery prenášané do počítača. Skúškou tvrdosti vieme nezávisle vyhodnotiť kvalitu zvarových plôch v rovine metalografického výbrusu, skúšky vieme podľa tabuliek od firmy Struers previesť na orientačné empiricky zistené hodnoty  $R_m$  medze pevnosti, ktoré ale nemusia zodpovedať konkrétnemu vzoru pretože nie sú určené pre austenitické oceli, čiže pre ani jeden testovaný vzor, ale dávajú náhľad na porovnanie hodnôt napríklad s trhacou skúškou. Limitné body prepočítané pomocou tabuliek pre vzory C – HV 170  $\approx R_m$  545 N/mm<sup>2</sup>, HV 145  $\approx R_m$  465 N/mm<sup>2</sup>, Pre vzory D – HV 150  $\approx R_m$  480 N/mm<sup>2</sup>, HV 135  $\approx R_m$  430 N/mm<sup>2</sup>, HV 125  $\approx R_m$  400 N/mm<sup>2</sup>, HV 120  $\approx R_m$  385 N/mm<sup>2</sup>

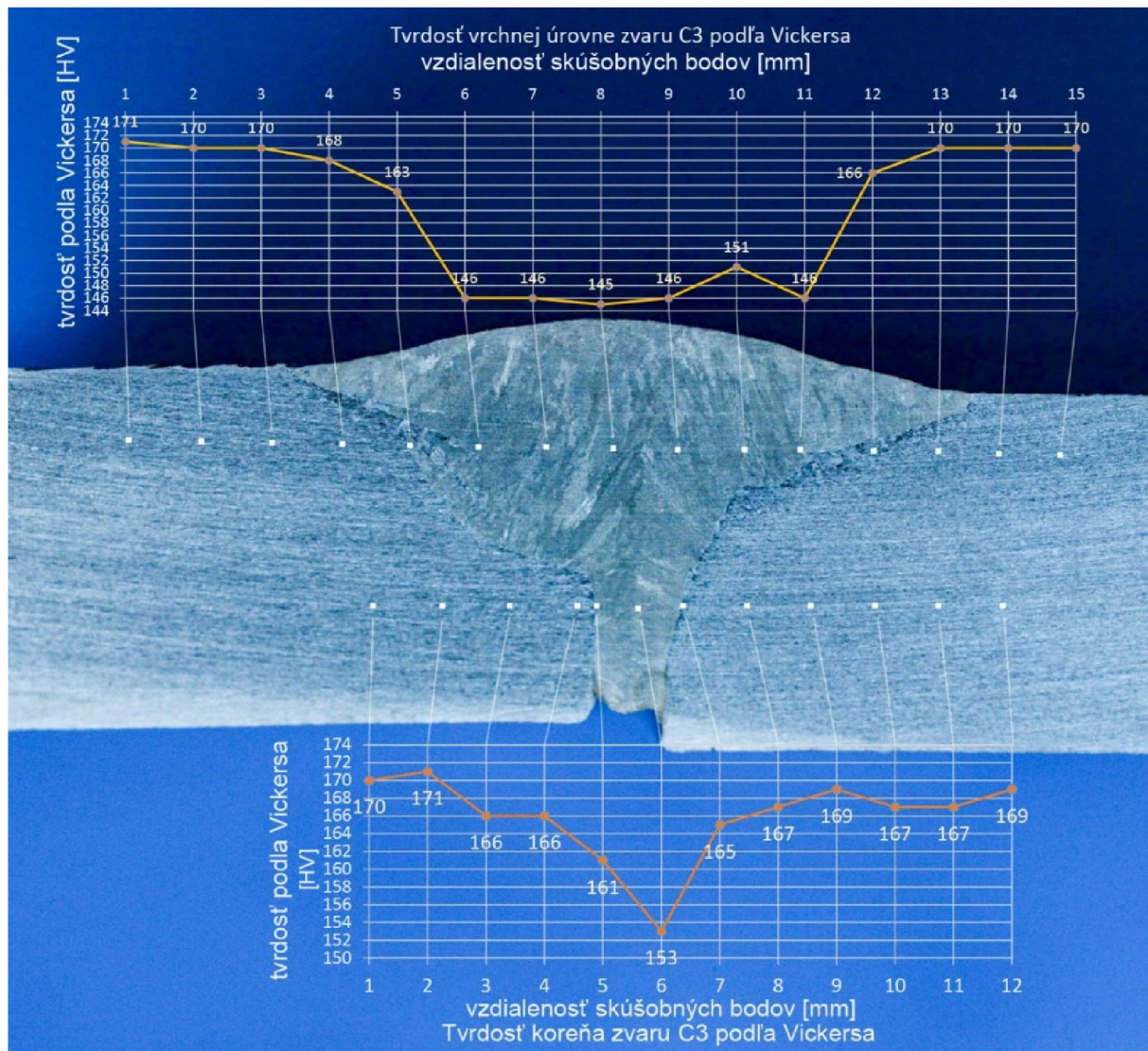
Špecifická duplexná štruktúra vykazuje výrazne vyššie úrovne tvrdosti, ako austenitická oceľ, Vzorky duplexnej oceli boli testované aj na skúšku ťahom, ktorá ukazuje maximálnu mieru pevnosti najslabšieho miesta, ktorá bola v oboch trhaných vzoroch C2 a C6 (719 a 735 N/mm<sup>2</sup>) približne na úrovni hodnoty konverznej tabuľkovej hodnoty na úrovni 725 N/mm<sup>2</sup>, čo by zodpovedalo približne 221HV, tejto hodnote ani jeden testovaný otláčok nezodpovedá, čo značí, že hodnota by mohla zodpovedať konverzii pomocou tabuľky a musela by sa korigovať reálne nameranými hodnotami. Tiež to potvrdzuje tvrdenie, že tabuľka nie je určená pre austenitické oceli.

### 4.6.1 Vzorka C3

Základný materiál má pomerne vysokú základnú miernu tvrdosti Obr. 60 na úrovni 170HV, ktorá už aj v mierne ovplyvnenej tepelne oblasti začína klesať na úroveň okolo 166HV. Otláčkom v zvarovom materiáli ale dostávame hodnotu tvrdosti 146, ktorá je výrazne nižšia ako hodnota základného materiálu a je takmer konštantná v celom priereze zvaru. V porovnaní s čisto austenitickou oceľou má ale približne o 20HV vyššiu tvrdosť v celej šírke zvarovej húsenice. Materiálové charakteristiky výrobcu prídavného materiálu neupravujú tvrdosť východzieho materiálu, iba jeho vrubovú húževnatosť. Koreňová vrstva má rovnako



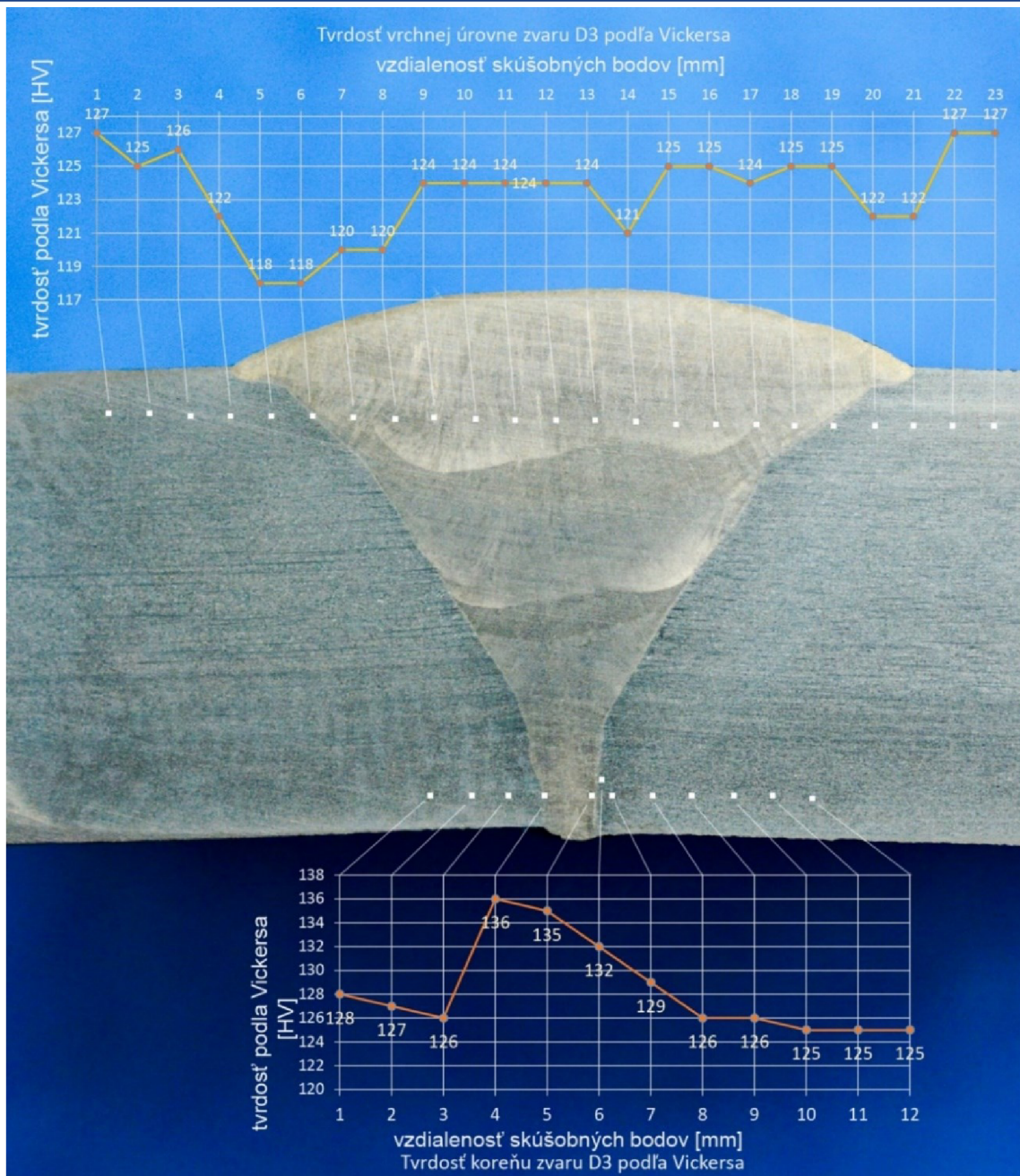
rovnornou charakteristiku, ako povrchová vrstva, ale v najslabšom mieste nedosahuje ani hodnotu 145HV, čo môže byť ale spôsobené tým, že ostatné vpichy sú umiestnené na rozhraní TOO a zvarového materiálu.



Obr. 60 Grafy hodnotenia tvrdosti oblasti pod povrchom zvaru a v oblasti koreňa vzoru C3

#### 4.6.2 Vzorka D3

Krycia vrstva zvaru vzoru D3 vykazuje v úzkom okolí približne 1,5mm od rozhrania zvaru a základného materiálu mierne zníženie tvrdosti o približne 5HV Obr. 61 toto zníženie je pozorované v základnom materiály, aj v zvarovom kove. V stredovej oblasti v oblasti rozkvyvu horáku je tvrdosť takmer na rovnakej úrovni, ako je úroveň základného materiálu. Iba v prípade, kedy sa vzorový otláčok 14 približuje predchádzajúcej vrstve sa tvrdosť znižuje na úroveň v okolí TOO základného materiálu. Naopak v oblasti koreňovej vrstvy, ktorá bola zvarovaná lineárnym zvarom je základný materiál aj TOO z hľadiska tvrdosti nezmenený. Samotný zvarový materiál tesne za rozhraním zvaru vykazuje zvýšenie tvrdosti na úroveň 136HV.

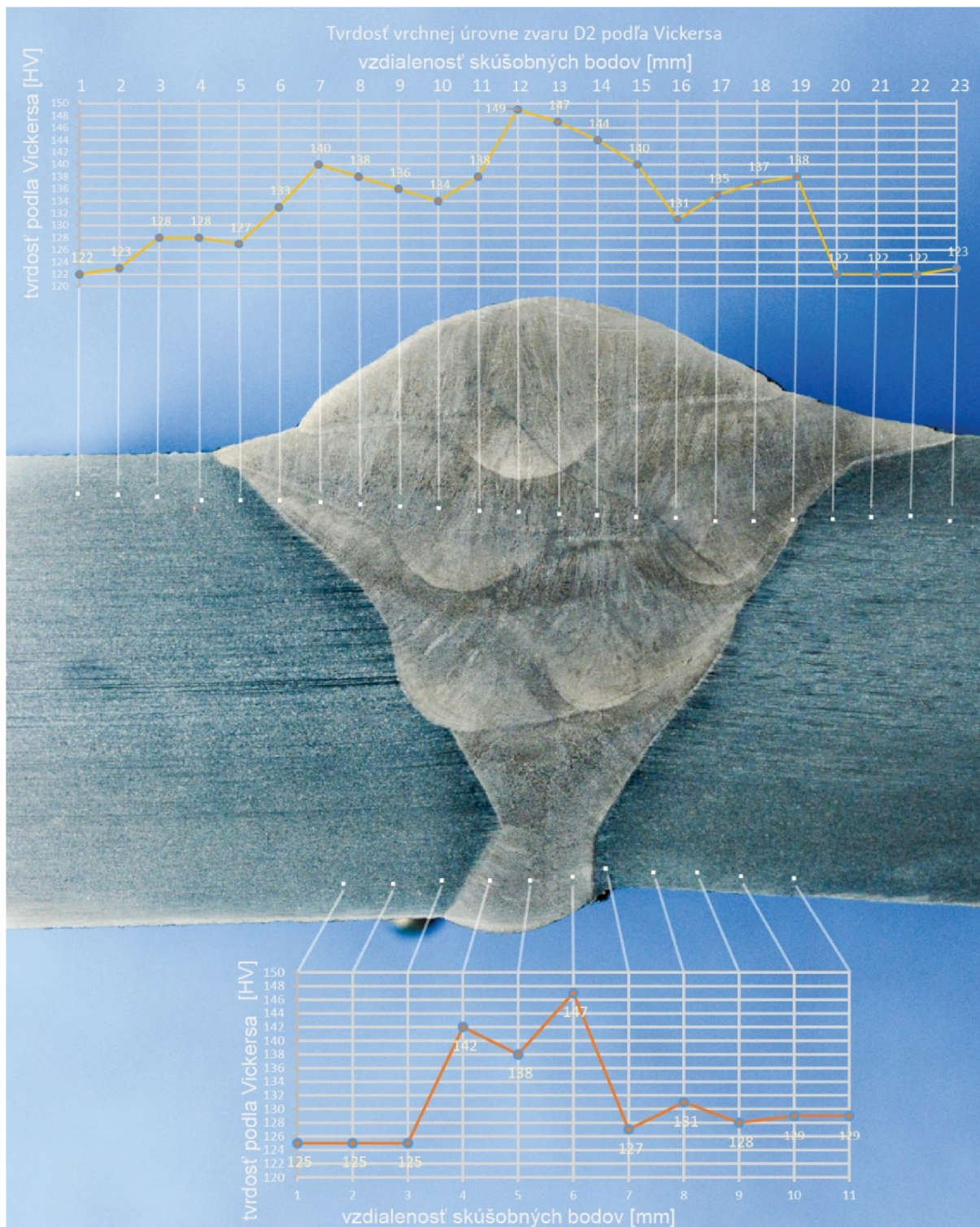


Obr. 61 Grafy hodnotenia tvrdosti oblasti pod povrchom zvaru a v oblasti koreňa vzoru D3

#### 4.6.3 Vzorka D2

Vzorka D2 vykazuje výrazne odlišné charakteristiky pevnosti zvaru ako vzorka D3, Obr. 62 Vo vrchnej vrstve v rámci základného materiálu nie sú žiadne rozdiely, už v krátkej vzdialenosti od tepelne ovplyvnenej oblasti základného materiálu pozorujeme zvýšenie tvrdosti o 5 HV, ktoré sa po prekročení rozhrania ďalej zvyšuje na úroveň 140HV na rozhraní dvoch zvarových húseníc. Smerom do stredu 4 húsenice tvrdosť mierne poklesne a od stredu exponenciálne rastie, ako sa približuje k miestu pod závarom krycej šiestej zvarovej húsenice, následne znova symetricky k ose zvaru klesá znova do bodu blízkeho stredovej úrovni piatej zvarovej húsenice, kde tvrdosť mierne vzrastá smerom k TOO, ktorá je veľmi tenká a v tesnej blízkosti za ňou sa dostáva tvrdosť na základnú úroveň materiálu. Koreňová vrstva je ovplyvnená sťaženinami v strede zvaru, ktorá má za následok výrazné zníženie tvrdosti, o niekoľko milimetrov vyššie je v oblasti sťaženiny vidno zmenu podlhovastých kryštálov na oválne, ktoré boli tepelne

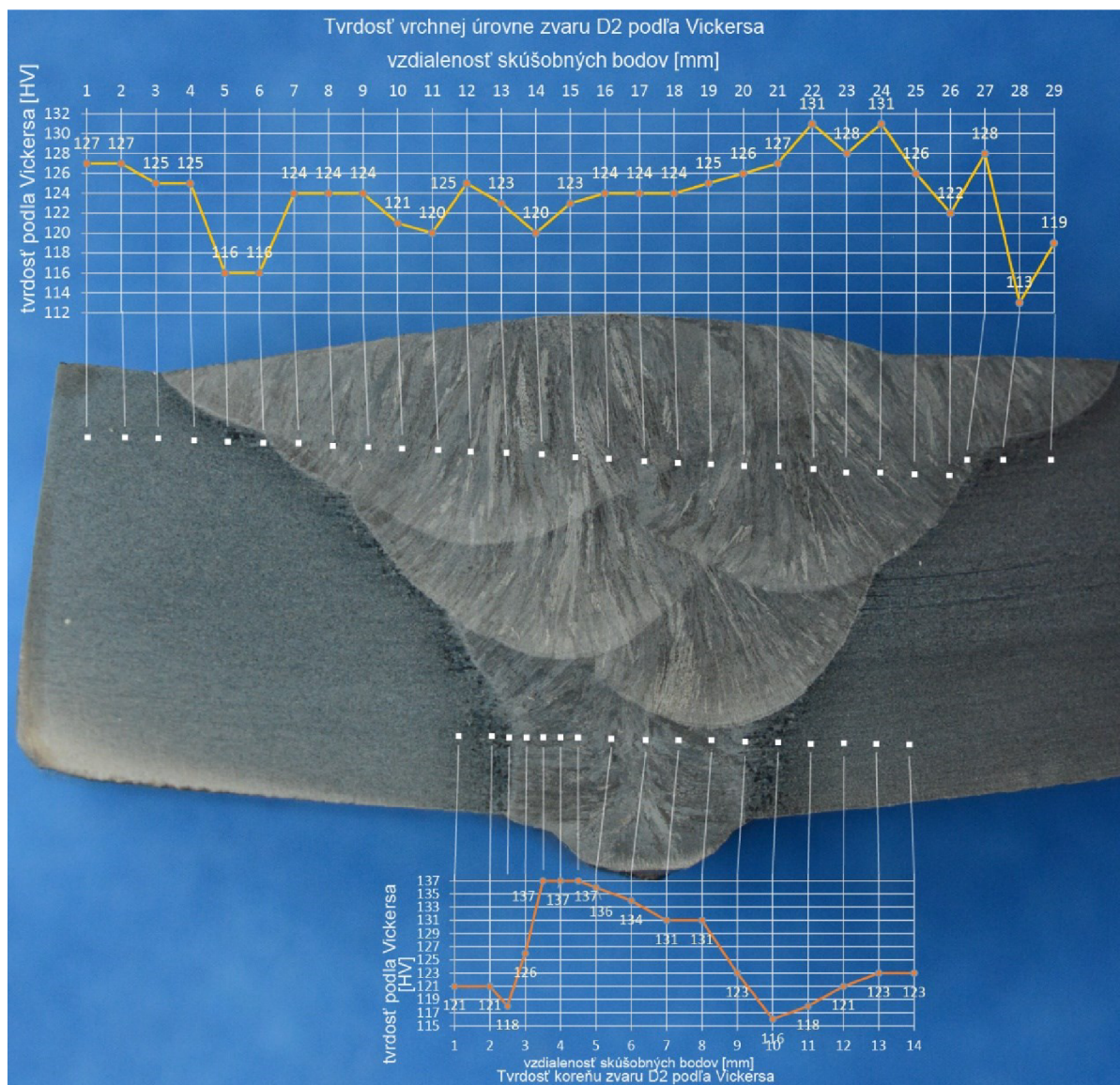
ovplyvnené ďalšími zvarovými húsenicami. základný materiál ani tepelné ovplyvnená oblasť nevykazujú výrazné zmeny tvrdosti.



Obr. 62 Grafy hodnotenia tvrdosti oblasti pod povrchom zvaru a v oblasti koreňa vzoru D2

#### 4.6.4 Vzorka D-T

Pre porovnanie tvrdostí so zvarovaním metódou MAG sme použili vzor zvarovaný rovnaký materiál metódou zvarovania pod tavidlom Obr. 63. V krycej vrstve zvarových húseníc vzorka vykazuje zníženie tvrdosti najmä v tepelne ovplyvnenej oblasti, ale v rámci zvarových húseníc nie sú badateľné zmeny, ktoré by naznačovali zvýšenie tvrdosti, až v prípade vpichu 2-25 môžeme pozorovať mierne zvýšenie tvrdosti v oblasti 4 zvarovej húsenice, ale iba v úrovni ktorú priamo prekrýva piata zvarová húsenica.



Obr. 63 Grafy hodnotenia tvrdosti oblasti pod povrchom zvaru a v oblasti koreňa vzoru D - T zvarovaná metódou pod tavidlom

Koreňová vrstva je tepelne ovplyvnená ďalšou zvarovou húsenicou, môžeme tu pozorovať že na zvýšenie tvrdosti má priami dôsledok či nad zvarovou húsenicou je ešte ďalšia húsenica, ktorú predchádzajúca ďalej tepelne ovplyvní aj keď bez výraznej rekryštalizácie. Tiež môžeme na koreňovej vrstve vidieť istú závislosť, ako je zvýšenie tvrdosti závislé na vzdialenosti od krycej zvarovej húsenice, v tomto prípade by sme mohli predpokladať, že k tepelnému ovplyvneniu došlo v prípade vpichu 3 - 5 dva krát, kde je tvrdosť vyššia o 5 HB ale vzdialenosť bodov je výrazne väčšia ako tvrdosť bodov 6-8, zároveň je tvrdosť bodov 6-8 koreňovej vrstvy porovnateľná s tvrdosťou bodov 22-24 v prekrytej povrchovej vrstve, čo by potvrdzovalo tento predpoklad.

---

## ZÁVER

Práca sa zaoberá problematikou využitia zvarovania nerezových ocelí pre potravinárske a energetické aplikácie metódou MAG s využitím rozkyvu a bez využitia rozkyvu zvarovacieho horáku. Spracovaná bola literárna štúdia zameraná na korozivzdorné oceli, zvariteľnosť korozivzdorných ocelí a základné skúšky materiálu boli vybraté 3 skúšobné triedy materiálu – Austenitická oceľ X5CrNi18-10 (1.4301) a jej veľmi blízka oceľ legovaná titanom X6CrNiTi18-10 (1.4541) a duplexná feriticko-austenitická oceľ X2CrNiMoN22-5 (1.4462). Tieto oceli boli zostavené do 4 experimentálnych skupín označených A,B,C,D. Pre každú experimentálnu skupinu bola určená geometria skúšobného zvaru, ktorá bola následne zvarená vo viacerých krátkych vzorových zvarových spojoch za sebou, ktoré striedali zvarovanie s rozkyvom a bez rozkyvu horáku.

Na základe výsledkov v práci môžeme dospieť k záveru, že rozkyv horáku má veľký potenciál pre cielené aplikácie, jeho hlavné výhody sú:

- oscilačným pohybom dosahujeme lepšie premiešanie zvarového spoja a vyššiu čistotu prechodu medzi jednotlivými zvarovými húsenicami, najmä pri zvaroch hrubších plechov napr. 12mm. Rozkyvom sa aplikuje vnesené teplo najmä do okrajovej časti zvaru, zatiaľ čo stredová už roztavená časť zvaru je vystavená priamemu oblúku menej, čím je možné dosahovať výrazne hlbšieho závaru v okrajovej oblasti. Na hranici so základným materiálom dochádzalo spravidla vždy k dobrému prievaru v horných vrstvách zvaru, kde bol aplikovaný rozkyv.

- Rozkyvom získame umiernenější a plynulejší nábeh zvaru na základný materiál a vzájomné previazanie materiálu a docielime rovnomerný povrch zvarovej húsenice na rozdiel od skladaného zvaru vo viacerých vrstvách.

- Pri použití v austenitických ocelí bola pozorovaná veľmi mala tepelne ovplyvnená oblasť na úrovni do 0,5mm, pri využití skladaného tvarového spoja je táto hodnota na úrovni do 1,1mm pri vzorke D hrúbky 12mm. Porovnateľné parametre TOO boli pozorované aj pri duplexnej oceli vzorku C 6mm bola pri lineárnom zvarovaní šírka výraznej TOO na úrovni do 0,72 mm a štruktúra zakladeného materiálu bola dosiahnutá vo vzdialenosti nad 1mm a v prípade rozkyvu horáku bola šírka TOO pod úrovňou 0,5mm.

- Ďalším podstatným aspektom, ktorý nemá výsledný efekt na zvar ako taký, ale za istých okolností môže významne ovplyvniť ekonomiku zvaru je, že 12mm materiál sme boli schopný zavariť 5 - 6 skladanými húsenicami, medzi ktorými sme museli čakať na ochladnutie materiálu pre dosiahnutie správnej medzi húsenicovej teploty, kde sa aj v prípade takto malého zvaru pohyboval čas chladnutia v rozmedzí 5-10 minút. Rovnaký čas chladnutia bol potrebný aj na zvarovanie pomocou rozkyvu, ale rovnaký zvar sme boli schopný zhotoviť iba pomocou 3 zvarových húseníc, čo významne urýchľuje výsledný pracovný cyklus, za predpokladu, že nechceme nejakou metódou urýchliť chladnutie - vodou, vzduchom apod.

Pozorovaním metalografických výbrusov a ich popisom a následnou analýzou zvarovacích parametrov dostávame podrobný empirický základ príčina – dôsledok, ako podklad do prípadného ďalšieho výskumu.

### **Odporúčenia pre prax:**

Zvolená metóda rozkyvu horáku pre austenitické korozivzdorné oceli sa ukázala ako potenciálne využiteľná s veľmi malou tepelne ovplyvnenou oblasťou. Najslabším miestom experimentálneho merania boli koreňové vrstvy, pre ktoré bola zvolená východzia šírka škáry 2mm, v praxi to bolo ale závislé od kvality opracovania plochy a medzera sa ukázala takmer vo všetkých prípadoch malá a zvarový materiál nebol schopný ju vyplniť s dostatočným prievarom, čo malo za následok vznik neprevarených koreňov a studených spojov. Doporučené by bolo voliť medzeru na úrovni minimálne 2,5-3mm. Ďalším odporúčením je mierne zvýšenie

---

tepelného příkonu, který sa v našem experimente drží na velmi nízkých hodnotách, okolo 0,5 kJ/mm, při zvýšení by sme mohli predpokladať výraznejšiu TOO ale hlbší prievar a nižšie riziko studených spojov najmä v oblasti koreňa, kedy sa materiál zvaruje bez predohrevu vplyvom predchádzajúcej zvarovej húsenice.

Rozkvyv horáku poskytuje jednoznačne lepšie charakteristiky z hľadiska topológie vrchnej pohľadovej vrstvy, hygienickej spôsobilosti konečného zvaru a z tohoto hľadiska je možné ho odporučiť ako poslednú kryciu zvarovú húsenicu pre potravinárske aplikácie.

Ďalej boli vypracované WPS a skúška tvrdosti pre každý druh zvarového spoja vzoru C a D a vykonané skúšky ťahom pre dva vzory C, ktoré ako jediné dva boli zvarené s dostatočne vyplneným koreňom s rozkvyvom a bez rozkvyvu na posúdenie či sa metódy líšia z hľadiska zaťažiteľnosti zvarovej húsenice.

---

**ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] TOKAMAK [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.iter.org/>
- [2] ČÍHAL, Vladimír. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1999, 437 s. ISBN 8020006710.
- [3] HRIVŇÁK, Ivan. *Theory of Weldability of Metals and Alloys: Materials Science Monographs 74*. 1. vyd. Amsterdam-London-New York -Tokyo: Elsevier Science, 1992. ISBN 0-444-98707-X.
- [4] AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. : il. ISBN 80-85771-81-0.
- [5] KITAHARA, H. *Fast and Effective EBSD Mapping of Martensitic Stainless Steel: Crystallographic features of lath martensite in low-carbon steel* [online]. Oxford: Acta Materialia 54, 1279–1288, 2017 [cit. 2022-05-20].
- [6] RIOS, Paulo, Ronald LESLEY a Angelo PADILH. *Stainless steels heat treatment (Chapter 12)* [online]. 2007 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/293106894>
- [7] ZHANG, Qingdong, Kai ZHU, Arun SINGARAVELU, Weizhao SUN, Tao JING a Nikhilesh CHAWLA. Three-Dimensional (3D) Microstructure-Based Modeling of a Thermally-Aged Cast Duplex Stainless Steel Based on X-ray Microtomography, Nanoindentation and Micropillar Compression. *Metals* [online]. 2019, 9(6) [cit. 2022-05-20]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met9060688
- [8] NKHOMA, Richard, Charles SIYASIYA a Waldo STUMPF. Hot workability of AISI 321 and AISI 304 austenitic stainless steels. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2014, 595, 103-112 [cit. 2022-05-20]. ISSN 09258388. Dostupné z: doi:10.1016/j.jallcom.2014.01.157
- [9] MAJER, Lubomír. *Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 1999, 249 s. : il. ; 30 cm. ISBN 80-85771-70-5.
- [10] ZMRZLÝ, Martin. Korozivzdorné oceli ve výrobě kyseliny fosforečné. In: *Konstrukce.cz* [online]. 2019 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://konstrukce.cz/materialy-a-technologie/korozivzdorne-oceli-ve-vyrobe-kyseliny-fosforecne-102-1>
- [11] BARTONÍČEK, Robert. *Koroze a protikorozi ochrana kovů*. 1. vyd. Praha: Academia, 1966.
- [12] MARTIKAINEN, Jukka, Paul KAH a Oluwasanmi ADERINOLA. *Efficient Welding Technologies Applicable to HSS Arctic Offshore Structures* [online]. In: . [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: doi:10.13140/2.1.2986.8329
- [13] GUZMAN, Zach. *MIG Welding Transfer Methods* [online]. In: . [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.aedmotorsport.com/news/mig-welding-transfer-methods>
- [14] MUSIL, Miloslav a Jaromír MORAVEC. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování*. DOM-ZO 13, s.r.o., 2017, 404 s.
- [15] GUCWA, M., J. WINCZEK, M. KUKURYK a K. MAKLES. The analysis of stainless steel welded connections made by low energy and classic welding processes. *ENGINEERING MECHANICS 2018* [online]. 2018(76), 273-276 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: doi:10.21495/91-8-273
-

- 
- [16] *Pracovné polohy při zvarání podle EN ISO 6947* [online]. 2021 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.zvaracka.eu/pracovne-polohy-pri-zvarani/>
- [17] BARTÁK, Jiří. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2000, 213 s. : il. ; 30 cm. ISBN 80-85771-72-1.
- [18] FOLDYNA, Václav. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2. upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7185-3.
- [19] ESAB VAMBERK, S.R.O. *PŘÍDAVNÉ MATERIÁLY PRO SVAŘOVÁNÍ A NAVAŘOVÁNÍ NEREZAVĚJÍCÍCH OCELÍ A NIKLOVÝCH SLITIN*. Dostupné také z: [www.esab.com](http://www.esab.com). Reg. č.: XA00048714 04 2009.
- [20] ŽÁK, Jan a Miroslav NOVÁK. *Teorie svařování*. 1. vyd. Brno: Ediční středisko Vysokého učení technického, 1988.
- [21] SCHWARZ, D. a J. KOUKAL. VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. *Závěrečná technická zpráva ke grantovému úkolu GAČR č. 106/01/0556*. Ostrava, 2003, 60 s.
- [22] TONG, L.G., J.C. GU, S.W. YIN, L. WANG a S.W. BAI. Impacts of torch moving on phase change and fluid flow in weld pool of SMAW. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016, **100**, 949-957. ISSN 00179310. Dostupné z: [doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.04.032](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.04.032)
- [23] *Caligrafía del soldador* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.areametalurgia.com/post/caligraf%C3%ADa-del-soldador>
-



---

**ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATIEK**
**Symboly**

Označení	Legenda	Jednotka
Al	Hliník	
Ar	Argón	
Co	Kobalt	
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý	
Cr	Chróm	
Cu	Meď	
Fe	Železo	
Mn	Mangán	
Mo	Molybdén	
N	Dusík	
Ni	Nikel	
Nb	Niób	
Si	Kremík	
Ta	Tantal	
Ti	Titan	
V	Vanád	
W	Wolfrám	
O <sub>2</sub>	Kyslík	
Zr	Zirkónium	

**Zkratky**

Označení	Legenda
A	Ampér
BCC	Stredovo striedena mriežka
FCC	Plošne striedena mriežka
HRA	tvrdost dle Rockwella
V	Volt
WPS	Welding Procedure Specification, Stanovenie postupov zvarovania
TOO	Tepelne ovplyvnená oblasť
MAG	Zvarovanie kovov v ochranné atmosfére aktívneho plynu
MIG	Zvarovanie kovov v ochranné atmosfére inertného plynu
Hz	Herz
HB	Skúška tvrdosti

---

**ZOZNAM PŘÍLOH**

Priloha 1 Vzor WPS .....	67
Priloha 2 metalograficky vybrus pod miroskopom 1x zvačšenie pre vzor C3.....	68
Priloha 3 metalograficky vybrus pod miroskopom 1x zvačšenie pre vzor C1.....	68
Priloha 4 metalograficky vybrus pod miroskopom 1x zvačšenie pre vzor B4.....	69
Priloha 6 metalograficky vybrus pod miroskopom 1x zvačšenie pre vzor D2 .....	70
Priloha 7 metalograficky vybrus pod miroskopom 1x zvačšenie pre vzor D3 .....	71
Priloha 8 metalograficky vybrus pod miroskopom 1x zvačšenie pre vzor D4 .....	72

---


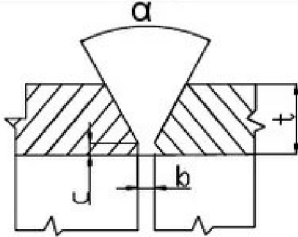
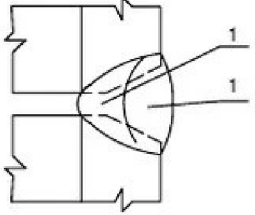
**ZOZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKOV**

Obr. 1 Použitie zvarovania nerezovej oceli v TOKAMAK [1].....	7	
Obr. 2 - Diagram základných typov nehrdzavejúcej oceli na základe obsahu chrómu a niklu. [3] .....	9	
Obr. 3 - Mikroštruktúra martenzitickej nerezovej ocele [5].....	10	
Obr. 4 - rovnovážny diagram železo – chróm [6] .....	11	
Obr. 5 - Mikroštruktúra duplexnej oceli [7] .....	11	
Obr. 6 Rozdielna austenitická štruktúra oceli (a)1.4301 34541 X6CrNiTi18-10 [8].....	12	
Obr. 7 Vplyv uhlíku na dobu vyvolania citlivosti na medzikryštalickú koróziu [10].....	14	
Obr. 8 Vzory základného korózneho napadnutia podľa typu .....	15	
Obr. 9 Schéma horáku metódy MIG [12] .....	17	
Obr. 10 schémy prenosu zvarového kovu. [13] .....	18	
Obr. 11 Pracovné oblasti jednotlivých metód prenosu v závislosti prúdu na napätie.....	19	
Obr. 12 Základné polohy pri zvarovaní podľa EN ISO 6947:2011 [16].....	21	
Obr. 13 - Schaefflerov diagram znázorňujúci štruktúru zvarovaného kovu korozivzdorné oceli podľa obsahu chrómu a niklu [19].....	23	
Obr. 14 – Deongov diagram pre obsah feritu [19] .....	24	
Obr. 15 Diagram WRC-1992 [19].....	25	
Obr. 16 - pseudobinárny rovnovážny diagram, Cr -Ni pre 70 hm. % Fe [18] .....	26	
Obr. 17 Suutalov diagram fázových premien a vplyv S a P na vznik trhlín za tepla [20] .....	26	
Obr. 18 Všeobecný priebeh tepelného cyklu zloženého zvarového spoja [21] .....	27	
Obr. 19 Tepelné pole s šírením tepla TOO v čase pre lineárne zvarovanie [22] .....	28	
Obr. 20 Tepelné pole s šírením tepla TOO v čase pre zvarovanie s rozkyvom horáku [22] .....	28	
Obr. 21 Mechanika roztaveného materiálu pri lineárom zvarovaní [22] .....	29	
Obr. 23 Mechanika roztaveného materiálu pri rozkyve horáku [22] .....	29	
Obr. 24 Niektoré z možných vzorov rozkyvu horáku [23] .....	30	
Obr. 25 Pracovný diagram ťahovej skúšky [18] .....	31	
Obr. 26 pripravený vzor skúšobnej tyče pred a po skúške ťahom [18].....	32	
Obr. 27 určenie miesta skúšania tvrdosti pre jednostranný jedno, a viac húsenkový tvar zvaru podľa ČSN EN ISO 9015-1.....	33	
Obr. 28 Zostava zvarovacieho vzorku a lineárneho podvozku s oscilátorom.....	35	
Obr. 29 Úprava zvarových plôch Y úkos pred zavarením .....	36	
Obr. 30 Chemické zloženie experimentálnych materiálov prepočítané na ekvivalent chrómu a niklu zavedené do Schaefflerovho diagramu pre odhad štruktúry .....	37	
Obr. 31 Chemické zloženie experimentálnych materiálov prepočítané na ekvivalent chrómu a niklu zavedené do WRC - 1992 diagramu pre odhad štruktúry .....	38	
Obr. 32 - Zvar vľavo veľká rýchlosť oscilácie a široká amplitúda rozkyvu, vpravo nerovnomerný návar.....	40	
Obr. 33 - VZORKY C - STRANA ZVAROVEJ HUŠENICE .....	41	
Obr. 34 - VZORKY C - KOREŇOVA VRSTVA ZVARU .....	41	
Obr. 35 VZORKY D – STRANA ZVAROVEJ HUŠENICE.....	42	
Obr. 36 VZORKY D – KOREŇOVA VRSTVA ZVARU .....	42	
Obr. 37 Geometria vzoru B1	Obr. 38 Rez a povrchová vrstva zvaru B1.....	43
Obr. 39 Metalografický výbrus vzoru B1 .....	43	
Obr. 40 Geometria vzoru B4	Obr. 41 Rez a povrchová vrstva zvaru B4... ..	44
Obr. 42 Metalografický výbrus vzoru B4 .....	44	
Obr. 43 Geometria vzoru C1	Obr. 44 Rez a povrchová vrstva zvaru C1 .....	45
Obr. 45 Metalografický výbrus vzoru C1 .....	45	
Obr. 46 Geometria vzoru C3	Obr. 47 Rez a povrchová vrstva zvaru C3.....	46
Obr. 48 Metalografický výbrus vzoru C3 .....	46	

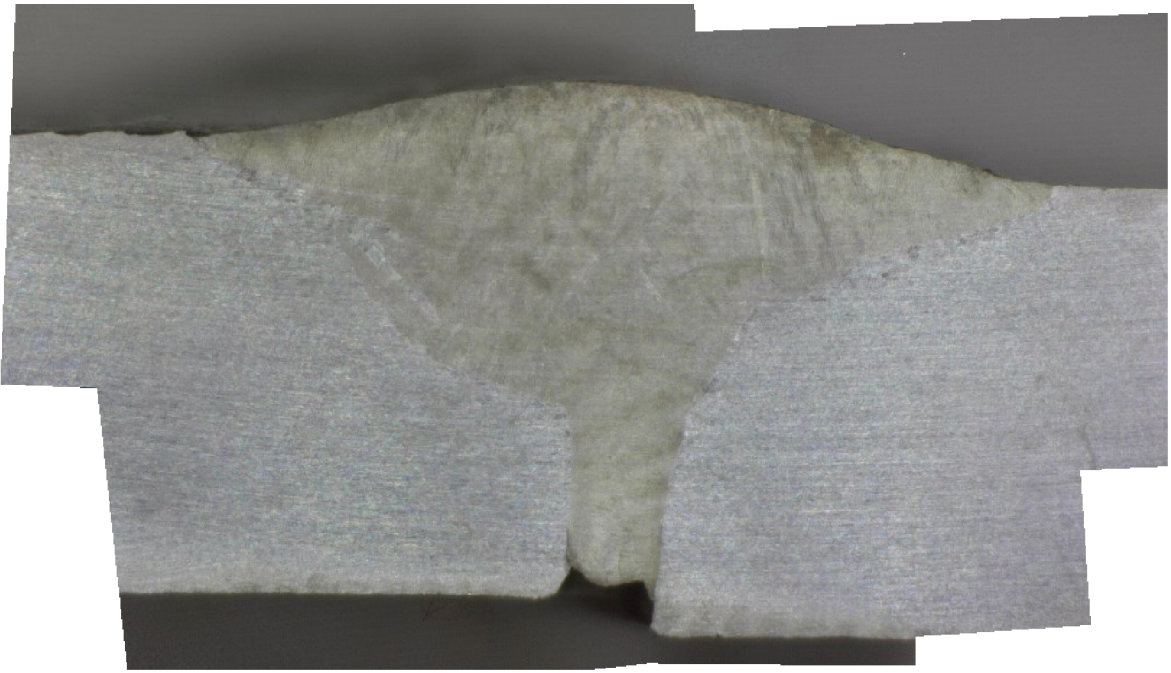
---

---

Obr. 49 Geometria vzoru D2	Obr. 50 Rez a povrchová vrstva zvaru D2 .....	47
Obr. 51 Metalografický výbrus vzoru D2 .....		48
Obr. 52 Geometria vzoru D3	Obr. 53 Rez a povrchová vrstva zvaru D3 .....	49
Obr. 54 Metalografický výbrus vzoru D3 .....		49
Obr. 55 Geometria vzoru D4	Obr. 56 Rez a povrchová vrstva zvaru D4 50	
Obr. 57 Metalografický výbrus vzoru D4 .....		51
Obr. 58 Metalografický výbrus vzoru D-T .....		51
Obr. 59 Lomová plocha vzoru C2 ťahovou skúškou orušená v zvare .....		53
Obr. 60 Ťahový diagram .....		54
Obr. 61 Grafy hodnotenia tvrdosti oblasti pod povrchom zvaru a v oblasti koreňa vzoru C3 55		
Obr. 62 Grafy hodnotenia tvrdosti oblasti pod povrchom zvaru a v oblasti koreňa vzoru D3 56		
Obr. 63 Grafy hodnotenia tvrdosti oblasti pod povrchom zvaru a v oblasti koreňa vzoru D2 57		
Obr. 64 Grafy hodnotenia tvrdosti oblasti pod povrchom zvaru a v oblasti koreňa vzoru D - T zvarovaná metódou pod tavidlom .....		58

 <b>PIK s.r.o.</b>		<b>Specifikace postupu svařování "WPS"</b> dle ČSN EN ISO 15609-1 (obložkové svařování)				Strana: 1 Celkem: 1 Revize č.: 1	
1. Výrobce: PIK s.r.o. Na Hrázi 781/15, CZ - 750 02 Přerov		Výrobce: TUV SÚD Czech s.r.o., Pobočka Ostrava Teslova 2, 702 00 Ostrava					
2. Místo : —		11. Způsob přípravy úkosů: obráběním, broušením					
3. Číslo dokladu (WPS) : 111-BW-1-P-H-L045		12. Způsob čistěn : kartáčování, odmaštění					
4. Číslo dokladu WPQR : —		13. Specifikace základních materiálů : ČSN EN 05 0323					
5. Číslo zkušebního kusu : —		- materiál 1[mm] : (1.0425) P265GH, 1.4301X5CrNi1911					
6. Kvalifikace svařeče : ČSN EN ISO 287-1		- materiál 2[mm] : (17618) 1.4301; X5CrNi1911					
7. Metoda svařování : 111(MMA)		14. Svařovaná tloušťka [mm] :					
8. Druh svaru : "V" (BW)		15. Vnější průměr [mm] :					
9. Údaje o přípravě svarových ploch : ČSN EN ISO 9692-2		16. Poloha svařování :					
10. Tvar spoje 		18. Rozměry:		19. Postup svařování 			
		a[mm]					
		—					
		b[mm]					
		2,5 - 3					
		c[mm]					
		1,5 - 2					
		α[°]					
		60					
20. Svarová housenka	1.	2.	3.	4.	5.	6.	
21. Parametry pro svařování	1.	2.	3.				
22. Metoda	1.	2.	3.				
23. Průměr přídav. mat. [mm]Ø	1.	2.	3.				
24. Svařovací proud [A]	1.	2.	3.				
25. Svařovací napětí [U]	1.	2.	3.				
26. Druh proudu a polarita	1.	2.	3.				
27. Přenos kovu základního mat.	1.	2.	3.				
28. Rychlost podávání drátu[m/min.]	1.	2.	3.				
29. Rychlost posuvu pojezdu [m/min.]	1.	2.	3.				
30. Tepelný příkon [J/cm]	1.	2.	3.				
31. Přídavný materiál - zařazení a značka:							
32. Předpis pro sušení:			42. Teplota předehřevu [°C]				
33. Ochranný plyn / tavidlo			43. Další informace : Rozkvyv - amplituda:				
- ochranný plyn [l/min.]			- frekvence a doba prodlevy				
- ochrana kořene [l/min.]			Rozkvyv (max. šířka housenky)				
34. Wolfram elektroda, druh/průměr:			44. Údaje pro pulzní svařování:				
35. Údaje o drážkování/podlož. kořene			45. Údaje o plazmovém sřování				
36. Údaje o drážkování/podlož. kořene			46. Úhel nastavení hořáku:				
37. Teplota předehřevu [°C]			47. Druh automatu a svař. hlavy :				
38. Interpass teplota [°C]			48. Prokování svaru:				
39. Doba, teplota, postup:			49. Teplota předehřevu [°C]				
40. Rychlost ohřevu a chladnutí:							
41. Vzdálenost elektrody (kontaktu špičky) od základního mat. [mm]:							
50. Výrobce			52. Zkušební orgán nebo technická dozorcí (inspekční) organizace				
51. datum, jméno, podpis a razítko zkušebního orgánu			53. datum, jméno, podpis a razítko zkušebního orgánu				

Priloha 1 Vzor WPS



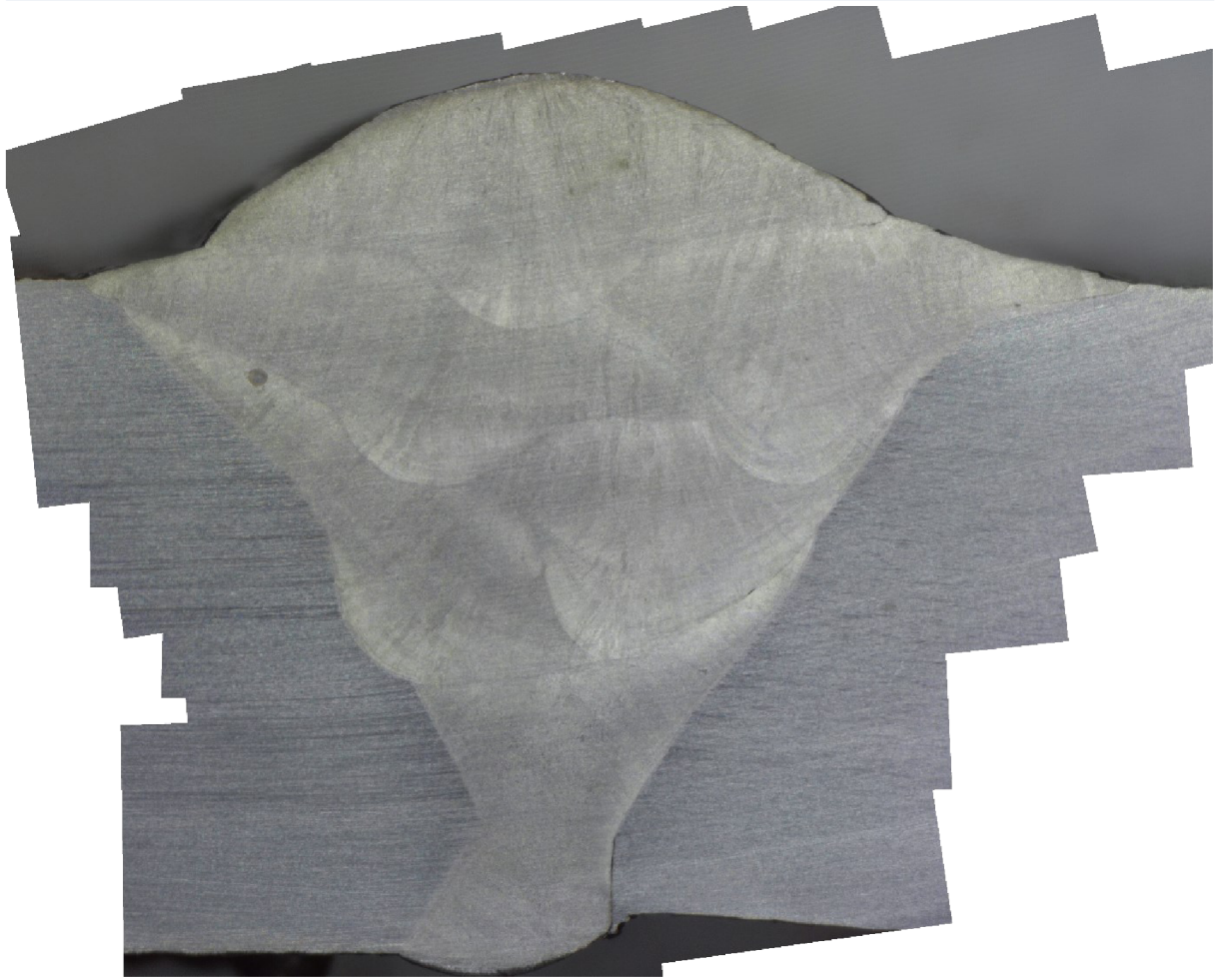
**Priloha 2 metalograficky vybrus pod miroskopom 1x zvačšenie pre vzor C3**



**Priloha 3 metalograficky vybrus pod miroskopom 1x zvačšenie pre vzor C1**



**Priloha 4 metalograficky vybrus pod miroskopom 1x zvačšenie pre vzor B4**

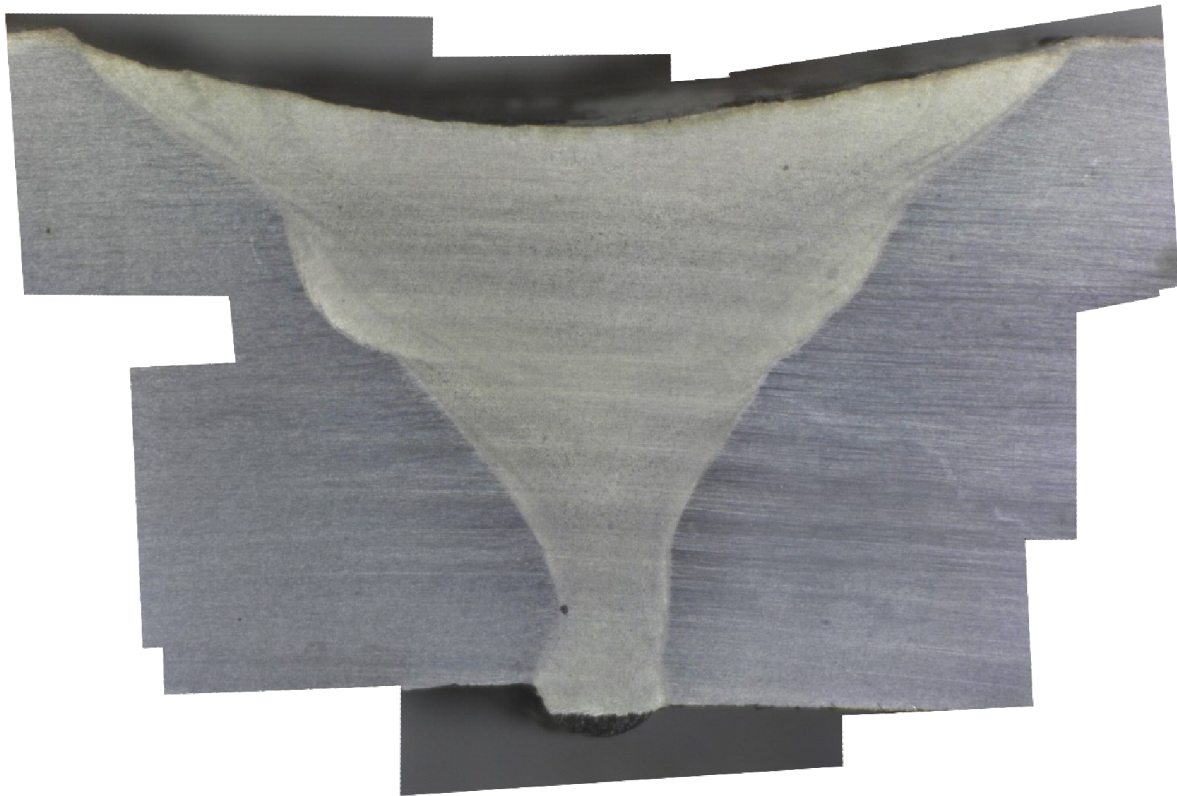


**Priloha 5 metalograficky vybrus pod miroskopom 1x zvačšenie pre vzor D2**





**Priloha 6 metalograficky vybrus pod miroskopom 1x zvačšenie pre vzor D3**



**Priloha 7 metalograficky vybrus pod miroskopom 1x zvačšenie pre vzor D4**