

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie



Vliv přípravy svarových ploch na kvalitu svaru

Influence of Weld Surface Preparation on a Weld Quality

Student:

Bc. Michal Latocha

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Latocha**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Vliv přípravy svarových ploch na kvalitu svaru**
Influence of Weld Surface Preparation on a Weld Quality
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Provést posouzení různých metod přípravy svarových ploch.
2. Zhotovit svarové plochy, pomocí nedestruktivních metod je zkontrolovat a svařit připravené vzorky.
3. Provést kontrolu hodnot tvrdostí a mikrotvrdostí, zejména v přechodových oblastech svarového spoje.
4. Metalografické posouzení jednotlivých svarových spojů.
5. Zhodnocení vlivu přípravy svarových ploch na konečnou kvalitu svarového spoje.

Seznam doporučené odborné literatury:

KUNCIPÁL, J. A KOL. *Teorie svařování*. Praha: SNTL Praha, 1986, 265 s.
KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich svařitelnost*. (Učební texty pro kurzy IWE/IWT). Ostrava: ZEROSS, Ostrava, 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
TURŇA, M. *Špeciálne metódy zvárania*. Bratislava: ALFA Bratislava, 1989, 384 s. ISBN 80-05-00097-9.
KOLEKTIV AUTORŮ. *Výroba, technická příprava výroby a kontrola svarových spojů*. (Učební texty pro kurzy IWE/IWT). Ostrava: ZEROSS, 2002, 417 s. ISBN 80-85771-97-1.

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

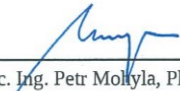
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.**


Konzultant diplomové práce: Ing. Tomáš Klvaňa

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016





doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.
vedoucí katedry


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

Mistopřisečné prohlášení studenta

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

V Ostravě12.5.2016.....

..........

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 12. 5. 2016....



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Michal Latocha

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Sosnová 351, Třinec

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucí diplomové práce Ing. Lucii Krejčí, Ph.D., za odborný dohled, rady a připomínky při sepisování práce. Rovněž děkuji firmě JINPO PLUS a. s., za možnost svaření vzorků a firmě Shape Steel a.s. za dodání plechu pro zkoušky na diplomovou práci. Nakonec bych chtěl poděkovat také své rodině za podporu v průběhu studia.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

LATOCHA, M. *Vliv přípravy svarových ploch na kvalitu svaru: diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2016, 49s. Vedoucí práce: Krejčí, L.

Cílem diplomové práce bylo zjistit, jaký vliv má příprava svarových ploch různými metodami na kvalitu svarových spojů. Teoretická část diplomové práce popisuje různé metody řezání materiálů, jejich výhody, nevýhody, funkčnost a vlastnosti. Druhá část je zaměřena na správné svařování a nedestruktivní kontrolu svarových spojů. V poslední části diplomové práce jsou provedeny zkoušky svarových spojů, za účelem zjištění vlivu přípravy svarových ploch na kvalitu svarového spoje. Pro experiment byl použit plech jakosti S235JR+N o tloušťce 15 mm. Svařovací parametry byly u všech vzorků stejné, aby nedošlo k nepřesnostem při vyhodnocení jednotlivých zkoušek.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

LATOCHA, M. *Influence of Weld Surface Preparation on a Weld Quality: Master Thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2016, 49 p. Thesis head: Krejčí, L.

The aim of the master thesis was find out which influence have different methods of a preparation of welding edges on quality of welding joints. The theoretical part of master thesis describes a various methods of cutting materials, their advantages, disadvantages, functionality and properties. Second part is focused on the proper welding and non-destructive's control of welding joints. In the last part of master thesis are performed tests of welding jionts for a purpose to find out an influence of a preparation welding edges on the quality of welding joints. For experiment was used sheetmetal quality S235JR+N and thickness of 15mm. Welding parameters were the same for all samples, because of the avoiding imprecisions during the evaluation of each tests.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	9
Úvod	1
1. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	2
1.1 Nekonvenční metody obrábění	2
1.2 Řezání plazmou	2
1.2.1 Zařízení pro dělení materiálu plazmou	3
1.2.2 Plyny používané pro řezání plazmou	3
1.2.3 Plazmové hořáky	4
1.3 Řezání laserem	6
1.4 Vodní paprsek	7
1.4.1 Princip řezání vodním paprskem	8
1.4.2 Druhy dodávaného množství abraziva	9
1.4.3 Kvalita řezu	9
1.5 Řezání kyslíko – acetylenovým plamenem	10
1.5.1 Doprovodné jevy vznikající při řezání kovu	11
1.5.2 Podmínky řezatelnosti kovových materiálů	11
1.5.3 Plyny použité pro řezání kyslíkem	11
1.5.4 Parametry řezání, rychlost řezání a tlak řezného kyslíku	12
1.6 Svařování	13
1.6.1 Svařování pod tavidlem	13
1.6.2 Technologické parametry svařování	14
1.6.3 Návrh svarového spoje	15
1.6.4 Přídavné materiály pro svařování	16
1.7 Nedestruktivní zkoušky	16
1.8 Kapilární zkouška	17
1.9 Zkouška ultrazvukem	17
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE	18
2.1 Volba základního a přídavného materiálu	18
2.2 Svařování zkušebních vzorků	19
2.2.1 Drážkování uhlíkovou elektrodou	21
2.3 Kapilární zkouška na vzorcích	23
2.4 Ultrazvuková zkouška na vzorcích	23

2.5	Řezání vzorků	24
2.6	Zkoušky tvrdosti dle ČSN EN 1043-1	26
2.7	Mikrostruktura a makrostruktura svarových spojů dle ČSN EN 1321	32
2.8	Zkouška ohybem dle ČSN EN 910	41
2.9	Zkouška tahem dle ČSN EN 895	41
3	Závěr	45
4	Seznam použité literatury.....	47
5	Seznam příloh.....	48

Seznam použitých značek a symbolů

ZNAK	VELIČINA	JEDNOTKA
Ra	Střední aritmetická úchylka profilu	[μm]
NC	Numeral Control	[-]
CNC	Computer Numeral Control	[-]
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	[-]
d	průměr drátu	[mm]
I	Elektrický proud	[A]
U	Elektrické napětí	[V]
TIG	Tungsten Inert Gas	[-]
MIG	Metall Inert Gas	[-]
MAG	Metall Active Gas	[-]
SAW	Submerged Arc Welding	[-]
NDT	Nedestruktivní testování	[-]
SK	Svarový kov	[-]
ZM	Základní materiál	[-]
Rm	Mez pevnosti	[MPa]
Re	Mez kluzu	[kN]
ČSN	česká technická norma	[-]
EN	Evropská norma	[-]
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci	[-]
N	Dusík	[-]
H	Vodík	[-]
CO ₂	Oxid uhličitý	[-]
Ar	Argon	[-]
He	Helium	[-]

C	Uhlík	[-]
Mn	Mangan	[-]
Si	Křemík	[-]
P	Fosfor	[-]
S	Síra	[-]
Cu	Měď	[-]
Ni	Nikl	[-]
Cr	Chrom	[-]
Mo	molybden	[-]
V	Vanad	[-]
Ti	Titan	[-]
Al	Hliník	[-]

Úvod

Svařování patří mezi velmi důležité odvětví v průmyslu. Jelikož je mnoho metod svařování, proto je možno svarové spoje vidět na mnoha konstrukcích a zařízeních. Od svaru se nejčastěji očekává, že budou pevné a bez vad. Z estetických důvodů je v některých případech důležité, aby byly svary zabroušeny a aby na nich nevznikala koroze. Pro dosažení co nejkvalitnějšího svaru, je důležité zvolit správnou metodu svařování, vhodné podmínky a správný přídavný materiál.

Cílem diplomové práce bylo zjistit, jaký vliv má příprava svarových ploch na plechu, na kvalitu svaru. Svarové plochy byly připraveny pomocí tepelných metod dělení, mezi které řadíme řezání kyslíko – acetylenovým plamenem, laserem, plazmou a bez tepelného ovlivnění – vodním paprskem. U vodního paprsku byly vzorky připraveny bez tepelného zpracování a s následným tepelným zpracováním. Pro experiment byl použit plech jakosti S235JR+N tloušťky 15 mm. Svarové plochy byly zkontrolovány kapilární zkouškou, abychom předešli vadám během svařování.

Výše uvedené plechy byly svařovány automatem pod tavidlem (metodou 121). Po svařování byla provedena nedestruktivní kontrola svaru vizuální, kapilární a ultrazvukovou zkouškou. U každého svarového spoje byla dále provedena kontrola makrostruktury a mikrostruktury, zkouška tvrdosti, tahem a ohybem. Závěrem byly vyhodnoceny a srovnány výsledky zkoušek svarových spojů s cílem určit vliv jednotlivých metod na kvalitu svaru.

Výsledky diplomové práce budou cenným přínosem v oblasti svařování a dělení materiálu pomocí různých tepelných metod i metod řezání bez tepelného ovlivnění.

1. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

1.1 Nekonvenční metody obrábění

Tímto pojmem rozumíme metody obrábění, které se od klasického třískového obrábění liší tím, že se zde za pomoci mechanické práce nepoužije úběr materiálu. U třískového obrábění jsme limitováni mechanickými vlastnostmi kovů, jako je pevnost a tvrdost. Nekonvenční metody obrábění těmito vlastnostmi nejsou limitovány, záleží převážně na fyzikálních vlastnostech materiálů (teplota tavení, tepelná vodivost, elektrická vodivost apod.) a na jejich chemickém složení. Mezi tyto technologie patří řezání kyslíkem, plazmou, laserem nebo obrábění vodním paprskem. [1]

1.2 Řezání plazmou

Tato metoda patří mezi nejrozsáhlejší metody dělení kovových i nekovových materiálů v praxi. Princip řezání plazmou spočívá v záporně nabitých elektronech a kladně nabitých iontech, kde hustota těchto dvou elementů je stejná. Plazma vzniká několika způsoby. Prvním způsobem je ohřátí plynu na vysokou teplotu. Druhým způsobem, který se v praxi používá, je využití elektrického výboje mezi anodou a katodou. Při tomto principu je plyn částečně ionizovaný a může dosáhnout teplot 20 000°K, v závislosti na druhu ionizovaného plynu může dosáhnout až 100 000°K. Stabilizace plazmy je důležitý faktor, který ovlivňuje dělení materiálu, proto aby její stabilizace měla být co nejlepší a aby nedocházelo k nepřesnostem během řezání. [1]

Dělení materiálu spočívá na tepelném a dynamickém účinku plazmy. Plazmový paprsek vzniká mezi neodtavující se katodou a řezaným materiálem za pomoci elektrické energie a plazmového plynu. Katoda je umístěna v dělicím hořáku a bývá vyrobena z hafnia, wolframu a dalších materiálů. Na kladný pól se napojí řezaný materiál a vytváří tak anodu. Hustota paprsku vystupující z hořáku je $10^8 - 10^9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Tato hustota energie je měřena jako střední hodnota dopadajícího paprsku na plochu obrobku. Působením paprsku se obráběný materiál odpařuje, sublimuje, taví a rozstříkává. Pomocí ochranného plynu nebo vody je plazmový paprsek stabilizován a chráněn před okolím. [1]

1.2.1 Zařízení pro dělení materiálu plazmou

Zařízení pro dělení materiálu plazmou můžeme rozdělit na ruční a strojní.

Ruční zařízení je konstruováno tak, aby bylo přenosné. Toto zařízení se skládá ze dvou částí a to řezacího hořáku a samotného zařízení (zdroj energie). Hořáky bývají zpravidla výměnné. Řezání pomocí ručního hořáku se používá pro dělení menších tloušťek materiálů, kde pro konstrukční ocel se maximální řezaná tloušťka pohybuje mezi 20 – 30 mm. [1]

Strojní řezání se skládá z několika částí a to zdroje energie, řídicí jednotky, řezacího stolu včetně pohyblivého suportu, řezacího hořáku, kompresoru, filtračního zařízení a směšovací jednotky. Pohyb hořáku nám zajistí suport, který se pohybuje po stole. Řezací stůl má filtrační zařízení, které odsává vzniklé plyny pryč. NC nebo CNC řídicí jednotka dodá pohyb hořáku, kde kabely jsou zapojeny ke zdroji elektrické energie. Plyny z tlakových lahví jsou dodávány do směšovací jednotky. Jediným plynem, který není dodáván z lahví, je vzduch. Přes čistící jednotku je nasávaný vzduch stlačován a dodáván ke směšovací jednotce. Ve srovnání s ručním řezáním je strojní řezání mnohokrát výkonnější. Abychom docílili větší produktivity práce, je možno pracovní stoly osadit dvěma i třemi řezacími hořáky. Tento způsob se používá pro sériovou výrobu, kde se nejčastěji používají tabulové plechy. U strojního zařízení je možno řezat materiály o tloušťce materiálu až 180 mm. [1]

1.2.2 Plyny používané pro řezání plazmou

Podle použití dělíme plazmové plyny do tří skupin [1]:

- **Plazmový plyn** protéká přes plynovou konzolu, která řídí jeho průtok do hořáku. Za pomoci oscilátoru je za vysoké teploty ionizován, kde vzniká plazmový paprsek. Hlavní používané plyny jsou filtrovaný vzduch, helium, jednoatomový argon, dusík, dvouatomový kyslík, oxid uhličitý a směsi argonu a dusíku.
- **Ochranný plyn** chrání řezaný materiál a paprsek plazmy před okolní atmosférou. Používané plyny jsou filtrovaný vzduch, argon, dusík, a směsi dvouatomového kyslíku a dusíku.

- **Fokusační plyn**, ten se používá jen zřídka. Tento plyn se používá především pro svařování, kde docílíme malou tloušťku paprsku a přesné zaostření. Nejčastěji používané plyny jsou argon a směsi argonu. [1]

Každý plazmový plyn má jiný potenciál energie. Tepelná energie se při vzniku plazmy vytváří dvěma pochody a to ionizací a disociací. Ionizace znamená rozpad atomů na částice (ionty a elektrony). Disociace je rozpad molekul na atomy. U helia, argonu a dalších jednoatomových plynů vzniká energie pouze ionizací. Ionizační energie je 2x až 4x násobná oproti disociační energii, to znamená, že teplota různých druhů paprsků je odlišná. [1]

Teploty plazmového paprsku [1]:

- dusíková plazma N₂ – 7 000 °K,
- vodíková plazma H₂ – 8 000 °K,
- argonová plazma Ar – 15 000 °K,
- heliová plazma He – 20 000 °K,
- plazma stabilizovaná vodou – až 35 000 °K.

1.2.3 Plazmové hořáky

Hořáky dělíme podle [1]:

- chlazení (přímé a nepřímé),
- druhu chlazení (kapalinové, plynové),
- druhu plazmového plynu (oxidační, neoxidační),
- použití (ruční a strojní),
- druhu stabilizace,
- druhu elektrody (wolframová, lanthanová, hafniová a thoriová),
- velikosti výkonu,
- průměru výstupní trysky.

Komponenty hořáků bývají převážně výměnné, aby jejich životnost byla co největší. Nejčastěji měněnou součástí v hořáku je výstupní tryska a elektroda, protože

při zapalování oblouku dochází k největšímu opotřebení. Na obrázku 1 je detailní popis hořáku.



Obr. 1 Součásti hořáku [1]

Jelikož při řezání vzniká vysoká teplota a jednotlivé součásti hořáku jsou tepelně namáhány, z tohoto důvodu je vhodné zavést jejich chlazení. Hořáky bývají chlazeny proudem plynu nebo kapalinou (vodou). Vodu do hořáku přivádíme pomocí čerpadla pod stanoveným tlakem. [1]

Výhody [3]:

- provoz jednoho a více hořáků podle série,
- řezání všech elektricky vodivých materiálů,
- řezání vysoce pevné konstrukční oceli s menším tepelným příkonem,
- vysoká řezná rychlost (až 10x vyšší než autogenní),
- libovolné zpracování kvalitního řezu u středních a silných rozměrů plechů s technologií vířivého plynu ve spojení s technickými plyny,
- velmi dobrá automatizace,
- řezání plazmou pod vodou pro velmi malé tepelné ovlivnění řezaného materiálu a malou hladinu hluku v okolí pracoviště.

Nevýhody [3]:

- omezí použití do 160 mm (180 mm) u suchého řezání a 120 mm u řezání pod vodou,
- poněkud širší řezná spára.

1.3 Řezání laserem

Tato metoda je založena na využití energie světelných částic – fotonů. Obecně tento způsob řezání materiálu označujeme jako zesilovač, který generuje elektromagnetické záření za pomoci stimulované emise fotonů. Jedná se o proces, který vychází z kvantové fyziky a termodynamiky. [3]

V dnešní době je možno vidět mnoho laserových zařízení, ale vesměs platí, že každý laser obsahuje tři základní části a to aktivní laserové prostředí, zdroj čerpaní a rezonátor. Stimulované emise jsou důležitým prvkem pro provoz a funkci laseru. Tento jev nastává při vzájemném působení excitovaného kvantového systému (atomu, iontu nebo molekuly) s elektromagnetickým zářením – fotonem. [2] Foton má frekvenci, která odpovídá energetickému rozdílu mezi některým níže položeným stavem kvantového systému a výbuchem. Při tomto procesu dochází k přechodu kvantového systému do energeticky chudšího stavu. Důležité je, že vlastnosti emitovaného fotonu jsou stejné jako u fotonu, který emisi stimuloval. Tento princip nám popisuje podstatu světla. [3]

Způsob řezání [3]:

- **Sublimační řezání** - jedná se o proces odstranění materiálu především odpařením.
- **Tavné řezání** - tento způsob řezání spočívá v roztavení materiálu a pomocí asistenčního plynu je materiál odfoukán.
- **Řezání pálením** - u tohoto způsobu je asistenční plyn z místa odstraněn.

Rychlost řezání laserem závisí na tloušťce a jakosti materiálu, způsobu řezání a výkonu stroje. Kvalita řezu se pohybuje s přesností okolo ($R_a = 3,6$). Tloušťka tepelně ovlivněné oblasti se pohybuje od 0,05 do 0,2 mm. Co se týče šířky řezné spáry, ta je dána druhem laseru, dále pak tloušťkou materiálu a druhem materiálu, ale převážně se tato šířka pohybuje od 0,02 až po 1 mm. [3]

Lasery typu CO_2 řezou konstrukční oceli do tloušťky 20 mm, u korozi-vzdorné oceli tato tloušťka bývá do 10mm a u slitin Al do 5mm. U druhého typu laseru YAG jsou tloušťky o něco menší a to u konstrukční oceli 6 mm, u korozi-vzdorné oceli tato tloušťka bývá do 3 mm a u slitin Al do 2mm. Z toho vyplývá, že lasery CO_2 lze použít pro kruhové a tvarové otvory s nejmenším průměrem 0,2 mm. Dále je tento typ laseru využíván pro nekovové materiály, keramiku, plast a sklo. Lasery YAG jsou určeny pro přesnější

řezání, kde nejmenší průměr může být až 0,025 mm. Tyto lasery se používají na diamanty, keramiku, safíry a kovy s vysokým bodem tavení. [3]

Výhody [3]:

- bez mechanických sil lze tepelnou energii koncentrovat na malou plochu,
- obrábět ve velmi špatně dostupných místech,
- úzké řezy pro úsporu materiálu,
- vysoká produktivita práce ve spojení s CNC řízením,
- vysoká řezná rychlost u tenkých materiálů.

Nevýhody [3]:

- omezení tloušťkou materiálu,
- vysoké investiční a provozní náklady,
- snížení stability procesu u řezání lesknoucích se povrchů materiálů.

1.4 Vodní paprsek

Tato metoda spočívá v oddělování materiálu pomocí kinetické energie vysokorychlostního a vysokotlakého vodního paprsku. Řezání lze provádět čistým vodním paprskem, nebo pomocí abrazivních částic. [3]

Čistý paprsek se používá k řezání málo houževnatých a měkkých materiálů. [3]

Abrazivní řezání je technologický proces, který využívá paprsek vysokotlaké vody a abraziva, které slouží k obrušování materiálu. Zde je možno řezat houževnaté a tvrdé materiály. Abrazivní paprsek, co se týče technologického provedení, může být proveden ve dvou provedeních.

První provedení je založeno na přímém přívodu brusiva. Jedná se o metodu (AWJ). Brusivo je přivedeno ze zásobníku do směšovací komory, ve které je vysokotlakým

vodním paprskem otrhané a urychlované. [3] Tlak vody je od 7 až do 400 MPa a průtok abraziva 1 až 20 kg/min. [3]

Druhé provedení je založeno na přímém vstřikování brusiva. Tato metoda se označuje (ASJ). V tlakové nádobě je stlačena suspenze, která je smíšená s vodou a následně přiváděna do dýzy. U této metody je tlak menší do 100 MPa a průtok suspenze okolo 20 kg/min. [3]

Co se týče porovnání těchto dvou metod, tak ASJ má větší proudovou hustotu a vyšší účinnost částic než AWJ. ASJ technologie sice takových tlaků neumožňuje, ale její výhoda spočívá v tenkosti průměru paprsku a dýzy kompaktní konstrukce. [3]

Druhy použitých paprsků [3]:

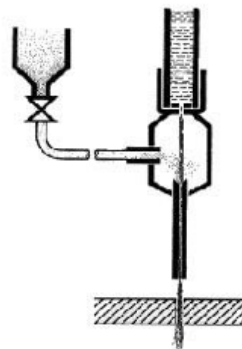
- **Systém pulzního paprsku** - tento systém se používá při řezání, vrtání, lámání a drcení hornin.
- **Systém kontinuálního paprsku** - jedná se o nejrozšířenější metodu dělení materiálu.
- **Systém kavitačního paprsku** - jedná se o lokální porušení materiálu, díky destruktivní kavitační síle. [3]

1.4.1 Princip řezání vodním paprskem

Principem této metody je, že voda přitékající tlustostěnným potrubím do řezací hlavy dodá potřebný tlak. Tento tlak prochází primární tryskou a díky tomu vznikne paprsek o požadovaném průměru cca (0,5 mm). Díky dostatečnému tlaku vody s abrazivem a sekundární trysce dostáváme řezný nástroj. Proto tato metoda slouží k řezání téměř všech materiálů od měkkých, které jsou řezány pouze vodou (guma, tenké plasty, molitan), až po tvrdé, které řezeme s pomocí abraziva (plechy, kameny). U řezání vodou bez abraziva odpadá část sekundární tryskou a se směšovací komůrkou, tyto rozdíly můžeme porovnat na obrázku 2 a 3. [4]



Obr. 2 Řezání bez abraziva [4]



Obr. 3 Řezání s abrazivem[4]

1.4.2 Druhy dodávaného množství abraziva

Mezi nejčastěji používaný granulát je $(5\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Y}_2\text{O}_3)$ nebo $[\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)]_3$, který má vyšší účinek, vyšší cenu, opotřebovává trysku a není vhodný pro recyklaci. Dalším používaným druhem je křemičitý písek, ten na rozdíl od předchozího granulátu má nižší cenu, nižší účinek a není vhodný pro recyklaci. Jako další druhy se používají oxid hlinitý, olivín a ocelová drť nebo broky. [3]

Zrnitost abraziva definuje norma ISO 525-75. Co se týče účinnosti, tak střední velikost zrna (60) je vhodnější než jemná zrna (100 až 150), které se používají spíše pro jemné řezy a velké zrna o zrnitosti (36 až 16). Pro vytvoření vysoce účinného paprsku napomáhají aditiva. Díky aditivu docílíme toho, že zachováme kompaktní jádro a po styku s obráběným materiálem se paprsek netříští. Aditiva mohou být vyrobená z různých polymerů s lineárními molekulami. [3]

1.4.3 Kvalita řezu

Kvalita řezu je ovlivněna mnoha faktory. Jeden z nejdůležitějších faktorů je, že mezi tryskou a řezaným materiálem se musí udržovat přibližně stejná vzdálenost. Kdyby byla tryska příliš nízko, tak by hrozilo uražení trysky a paprsek by nebyl rovný. Kdyby byla tryska příliš vysoko, opět by docházelo k špatnému řezu a k rozptylu abraziva

a následnému otryskávání povrchu krajů řezaných částí. Mezi dalším faktorem je rychlost posuvu řezací hlavy. Kvalitního povrchu docílíme, když rychlost nebude příliš velká. Mezi další faktory patří výtokový průměr trysky (0,75 až 2,5mm), tlak vody, úhel sklonu paprsku, druh abraziva apod. [3]

Výhody:

- vysoká energetická účinnost až 80%,
- relativně studený řez, může řezat materiály citlivé na teplo,
- díky úzkému řezu jsou malé ztráty na materiálu,
- dobrá automatizace v průběhu řezání.

Nevýhody:

- vysoké investiční a provozní náklady,
- zaoblení vnitřních rohu je dáno průměrem paprsku,
- hlučný a mokrý způsob řezání.

1.5 Řezání kyslíko – acetylenovým plamenem

Tento způsob řezání materiálu spočívá v tom, že předehřívací plamen předehřeje řezný materiál. K předehřevu se přednostně používají výstupky a hrany, které se ohřejí na danou teplotu velmi brzy. Teplota ohřevu bývá okolo 1100°C. Ke spalování řezného kovu dochází po otevření proudu řezného kyslíku. V tomto procesu nastává spalování kovu v důsledku uvolňování značného množství tepla. Kyslík začne spalovat materiál v úzkém pruhu a tím vznikne řezná spára. Struska je z řezu vyfukována a částečně ulpívá na hranách řezu.

Při shoření 1kg čistého železa se uvolní okolo 5040 KJ tepla. Pro samotné pokračování je toto množství tepla postačující k řezání, za předpokladu že nedojde ke ztrátám vedením, sáláním a vyzářováním tepla. [5]

1.5.1 Doprovodné jevy vznikající při řezání kovu

Při řezání kyslíkem nastávají některé doprovodné jevy. Tyto jevy rozdělujeme do tří částí:

- **Zpoždění řezu** - tento problém nastává při delších řezech, kde dochází k složení vektoru rychlosti. Tento problém, má za následek při řezání tvarových ploch, že způsobuje zaoblení výpalku. Při optimálních podmínkách by zpoždění nemělo být větší než 10 % tloušťky materiálů.
- **Tvar řezné mezery** - tvar odpovídá průměru řezané hubice, kde v průběhu řezání dochází k mírnému zúžení řezné mezery. Na přední části řezné mezery se vytváří struska, která má tloušťku asi 0,03 mm. Tato struska je důležitá pro povrchové napětí, protože má vliv na tvorbu vln.
- **Tepelné ovlivnění místa řezu** - jako při všech teplotních procesech i u této metody dochází k tepelně ovlivněným oblastem. [5]

1.5.2 Podmínky řezatelnosti kovových materiálů

Při řezání kyslíkem je nutné splnit níže uvedené podmínky [5]:

1. Při spalování kovů se musí uvolňovat dostatečné množství tepla, aby byly kryty ztráty tepla a řezání mohlo nerušeně pokračovat.
2. Co se týče zápalné teploty, tak tato teplota musí být menší nebo rovna teplotě tavení daného kovu.
3. Tavicí teplota musí být menší nebo rovna teplotě tavení daného kovu.
4. Zplodiny hoření by měly být tak tenké, aby je proud kyslíku vypudil z řezné spáry.
5. Při řezání musí vznikat vysoká teplota, a co se týče odvodu řezného kovu, ten musí být dostatečně pomalý. [5]

1.5.3 Plyny použité pro řezání kyslíkem

Nejčastěji používaným plynem je kyslík a acetylen. Kyslík je při řezání kyslíkem nezastupitelný, na rozdíl od acetyleny, kde tento plyn můžeme nahradit například vodíkem,

svítiplynem nebo propanem. Požadavek čistoty kyslíku je min. 99,2 %. Tuto čistotu označujeme stupněm A. Volba plynu ovlivňuje především délku předehřívacího času a tím i ekonomiku celého řezání. Tabulka 1 uvádí délku předehřívacích časů při použití různých plynů.

Tab. 1 Délky předehřívacích časů při použití různých plynů [5]

Tloušťka řezaného materiálu [mm]	Čas ohřevu [mm]		
	Acetylen (C ₂ H ₂)	Vodík (H ₂)	Svítiplyn
20	6 - 7	10 - 12	10 - 14
50	9 - 10	14 - 16	18 - 22
100	15 - 17	18 - 22	22 - 27
150	25 - 28	22 - 27	23 - 33
200	300 - 35	28 - 33	35 - 42

1.5.4 Parametry řezání, rychlost řezání a tlak řezného kyslíku

Parametry řezání značně ovlivní kvalitu řezných ploch, hran a ekonomiku řezání a jsou závislé na tloušťce řezaného materiálu. Lze je rozdělit do dvou skupin. Do první základní skupiny řadíme rychlost řezání, tlak řezacího kyslíku a vzdálenost hubice od povrchu řezného materiálu. Do druhé skupiny patří čistota řezacího kyslíku, velikost nahřívacího plamene, chemické složení a stav povrchu řezaného materiálu. [5]

Rychlost řezání bývá nejčastěji uvedena v dokumentaci k příslušnému řezáku. Větší rychlosti docílíme u přímých řezů než u řezu tvarových, tam jsou rychlosti řezání podstatně menší. Velká rychlost řezání může způsobit přerušení procesu řezání. [5] Natavování horních hran v řezné mezeře způsobuje přebytek kyslíku, což má za následek zpomalení rychlosti řezání. Proto vždy musí existovat rozmezí rychlosti, aby daná rychlost byla optimální.

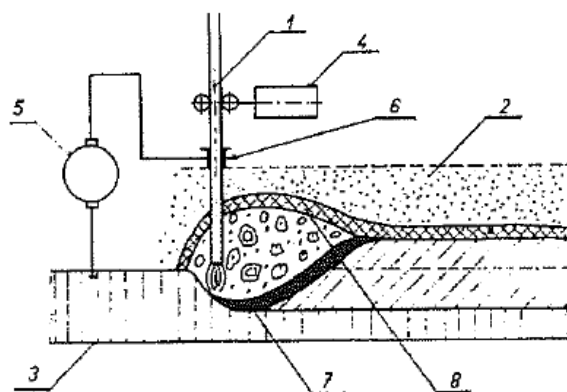
Tlak řezného kyslíku je závislý na tloušťce materiálu. Obvykle bývají tlaky pro řezání oceli nastaveny na pracovním manometru. Tlak se pohybuje od 0,3 do 0,5 MPa a tlak acetylenu je 0,15 MPa. Optimálním tlakem dostaneme ostré hrany a hladké plochy. Nadměrné množství kyslíku způsobuje odvod tepla od řezného materiálu, snižuje se rychlost řezání a dostává se špatná kvalita řezu. Pro řezání se spotřebuje pouze potřebné množství kyslíku a přebytek kyslíku způsobí chlazení v místě řezu. [5]

1.6 Svařování

Jedná se o nerozebíratelné spojení dvou stejných, nebo odlišných materiálů. Svařování může být buď tavné, kde se taví, jak základní, tak přídavný materiál, nebo tlakové, které je vyvoláno deformací kontaktních ploch. Mezi nejčastěji používané technologie svařování patří svařování TIG, svařování MIG/MAG, ruční svařování obalenou elektrodou, svařování pod tavidlem apod. V experimentální části této diplomové práce jsou uvedeny svarové spoje, které byly svařovány metodou 121 (SAW), tedy svařováním pod tavidlem. [5]

1.6.1 Svařování pod tavidlem

Tato metoda jde jinými slovy popsat jako svařování elektrickým obloukem. Elektrický oblouk hoří mezi elektrodou, kterou můžeme nazvat elektrodou holou a svařovaným materiálem, který je pod ochrannou vrstvou tavidla. Tento princip můžeme vidět na obrázku č. 4. Jedná se především o automatizovanou výrobu. Touto metodou se svařují plechy od tloušťky 3 mm a více. Svařovací proud se volí od 200 do 2000A a napětí na oblouku od 20 do 50V. Svařovací rychlost se pohybuje od 12 až 120 m.h⁻¹. Průměr přídavného materiálu se volí od 2 až do 8 mm. [5]



Obr. 4 Princip svařování pod tavidlem [5]

1- svařovací drát, 2 - tavidlo, 3 - svařovaný materiál, 4 - podavač drátů, 5 - zdroj proudu, 6 – kontakt, 7 - roztavený svarový kov, 8 - struska

Tato metoda, ve srovnání s obalenou elektrodou, TIG a MIG/MAG je daleko výkonnější. Automat pod tavidlem roztaví asi 2 až 5 krát více přídavného materiálu než při svařování obalenou elektrodou, TIG a MIG/MAG. Mezi další výhody patří velký průvar do základního materiálu, vysoká kvalita svaru a možnost zmenšení koutových svarů až o 25%. [5]

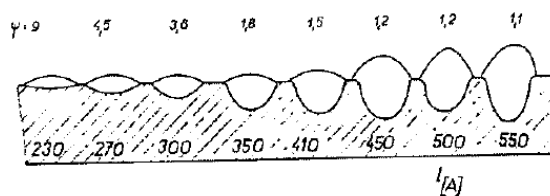
Mezi nevýhody lze zařadit zvýšené nároky na přípravu svarových ploch, široká tepelně ovlivněná oblast, možnost svařovat pouze v polohách PA a PB a obtížné odstranění strusky u vícevrstvých svarů. [5]

1.6.2 Technologické parametry svařování

Technologické parametry, mezi které patří proud, rychlost a napětí, průměr drátu, vlastnosti tavidla apod. výrazně ovlivní tvar příčného řezu svarovou housenkou. Mezi hlavní parametry patří proud I [A], rychlosti [m/hod] a napětí U [V]. Dále mezi vedlejší parametry svařování patří průměr svařovacího drátu, sklon elektrody, sklon základního materiálu, vyložení svařovacího materiálu a vlastnosti tavidla. Tyto všechny hlavní a vedlejší parametry svařování mají vliv na rozměr a tvar svaru. [5]

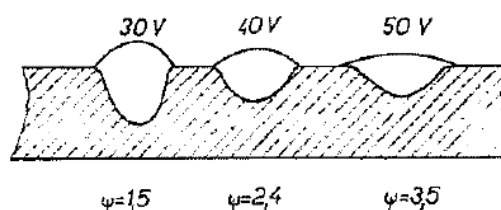
Proud je přímo závislý na množství nataveného kovu. Při zvyšování proudu se zvyšuje proudová hustota, dynamický účinek a účinek elektrického oblouku. Díky tomu vzniká

hlubší průvar do základního materiálu Viz obr. 5. Zvyšování proudu má vliv i na tavení přídavného materiálu. Proto čím větší napětí tím je housenka vyšší, kde šířka housenky zůstává prakticky stejná. [5]



Obr. 5 Změna tvaru svaru v závislosti na zvyšování svařovacího proudu [5]

Obloukový sloupec je závislý na napětí. Teplo, které je vyvinuté v oblouku působí na větší plochu základního materiálu, a proto se housenka zmenšuje a naopak její šířka se zvětšuje. Napětí se prakticky určuje podle svařovacího proudu. Vliv velikosti napětí můžete vidět na obrázku č. 6. [5]



Obr. 6 Změna tvaru svaru v závislosti na zvyšujícím se napětí [5]

Jako posledním hlavním parametrem je rychlost svařování. Při konstantním proudu a napětí, se mění množství tepla se změnou rychlosti. Změna směru elektrického oblouku a dynamické síly jsou závislé na změně rychlosti svařování. Při svařování velmi malých rychlostí do 10 m/hod hoří elektrický oblouk kolmo. Při větších rychlostech mohou vznikat neprůvary po stranách housenek. [5]

1.6.3 Návrh svarového spoje

Tloušťka svařovaného materiálu určuje typ a tvar svarového spoje. Tloušťky do 15 mm lze svařovat jednostranně a při větších tloušťkách je nutno svařovat z obou

stran. Pro velké tloušťky se používá svařování do úzké mezery. Tato metoda je vhodná hlavně proto, že zkracuje dobu svařování a snižuje spotřebu přídatného materiálu. [5]

1.6.4 Přídatné materiály pro svařování

Při svařování automaticky pod tavidlem se používá přídatný materiál a tavidlo.

Přídatný materiál je ve tvaru drátu o průmětech 2 až 5 mm. Elektrody mohou být ve formě plných drátů nebo trubiček. Sortiment normalizovaných drátů pro svařování, zejména u legovaných ocelí je nedostatečný a tím nestačí krýt potřeby průmyslu, proto se vyrábí velké množství drátů, které nejsou normalizovány. Dráty jemnozrnných ocelí blíže specifikuje norma ČSN EN 7561 a dráty korozivzdorných ocelí norma ČSN EN 12073. [5]

Klasifikaci tavidel popisuje norma ČSN EN 760. Tavidla můžeme rozdělit do tří skupin a to tavidla legující, aktivní a neutrální. Neutrální tavidla se používají pro neomezené tloušťky, pro vícevrstvé svařování a pro vhodné typy drátů. Přísně omezeny jsou legující prvky, jako jsou Si a Mn, aby chemické složení svarového kovu bylo totožné ve všech vrstvách. Co se týče aktivních tavidel, ty dodávají do svarového kovu Si jako desoxidant a Mn jako legující prvek. Tento typ tavidla se používá pro jednovrstvé svary. Posledním jsou tavidla legující, ty mají za úkol dodat do svarového kovu legury. [5]

1.7 Nedeštruktivní zkoušky

Nedeštruktivními zkouškami jsou detekovány povrchové nebo vnitřní vady materiálů. Tyto vady mohou vzniknout při výrobě nebo v průběhu provozu a mohou ohrozit bezpečnost provozu nebo životnost strojů. Mezi nedeštruktivní zkoušky patří vizuální, kapilární, rentgenová zkouška a zkouška ultrazvukem. Je důležité, aby tyto zkoušky nepoškodily danou konstrukci. [6]

1.8 Kapilární zkouška

Tato zkouška patří mezi nejstarší defektoskopické zkoušky a dají se pomocí ní zkoušet pouze povrchové vady. Kapilární zkouška je založena na fyzikálním jevu, který lze aplikovat na kovových nebo na nekovových materiálech jako jsou barevné kovy a jejich slitiny, austenitické oceli, plastické hmoty a sklo. [6]

Princip zkoušky spočívá v nanesení penetrantu na povrch materiálu. Nechá se účinkovat 5 až 30 min tak, aby mohl proniknout do případných vad, a následně se šetrně odstraní přebytečný penetrant z povrchu. Na očištěnou část se aplikuje vývojka, která penetrant nasaje ze štěrbin. Vady materiálu vyniknou, když během působení vývojky dojde k znázornění červených skvrn na materiálu. [6]

1.9 Zkouška ultrazvukem

Podobně jako u kapilární zkoušky se jedná o nedestruktivní zkoušení materiálů. U této metody zkoumáme vnitřní vady pomocí šíření ultrazvukových vln v materiálu. Výhodou zkoušení ultrazvukem je, že lze stanovit velikost vad a hloubku, v níž se vady nacházejí. [7]

Principem zkoušky je, že se do materiálu pomocí měniče vyšle ultrazvuková vlna, která se odrazí od materiálu a vrátí se zpět k snímači. Velikost odražených vln je závislá na velikosti překážky. Pro zjištění vad v materiálu se používají různé měniče. Tyto měniče do materiálů vysílají ultrazvukové vlny, které mohou být podélné nebo příčné. Podélné vlny se používají u dvojitých nebo přímých sond. Úhlové sondy zase slouží k příčným vlnám. Dvojité nebo přímé sondy se používají pro měření vad, kde je předpoklad, že budou umístěny rovnoběžně s povrchem, na kterém se bude pohybovat sonda. Pokud budou defekty blízko pod povrchem zkušebního materiálu, nebo bude potřeba změřit tloušťku stěny tak použijeme dvojité sondy. Pro přesnější zjištění defektů se používají úhlové sondy. Tyto sondy se používají převážně při zkoumání vad ve svaru a při zkoušení materiálů. [7]

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

2.1 Volba základního a přídatného materiálu

Plech jakost S235JR + N (tloušťka 15 mm):

Pro experiment byly použity plechy jakosti S235JR + N o rozměrech 15 x 300 x 550 mm (5 kusů). Jedná se o nelegovanou konstrukční ocel se zaručenou svařitelností, která zaručuje vyšší stupeň jakosti, protože se dodává pouze jako uklidněná. Označení JR znamená zkoušku vrubové houževnatosti při teplotě +20°C. Pokud jsou výrobky dodány ve stavu normalizačně žíhaném, musí být ke značce oceli doplněno označení +N. Chemické složení plechu je uvedeno v tabulce 2. [10]

Tab. 2 Chemické složení materiálu S235JR+N [hm %] dle inspekčního certifikátu

C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Al	N	As
0,140	0,520	0,190	0,016	0,013	0,220	0,090	0,130	0,018	0,006	-	0,040	0,010	0,014

Přídavný drát Air Liquide OE - S24.0X0025XB450

Svařovací drát OE - S24.0X0025XB450 Ø 4 mm je určen pro svařování automaticky pod tavidlem. Vhodné tavidlo k tomuto drátu bylo navrženo dle katalogu OP123. Chemické složení drátu je uvedeno v tabulce 3.

Tab. 3 Chemické složení přídatného drátu [hm %] dle inspekčního certifikátu

C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al
0,095	1,079	0,122	0,009	0,01	0,112	0,038	0,031	0,009	0,002	0,001

Tavidlo F.OP123

Na základě doporučení výrobce přídatných materiálů bylo zvoleno hliníko - bazické tavidlo firmy Air Liquide F.OP123 (tabulka 4), které je určeno pro svařování potrubních

ocelí. Díky tomuto tavidlu má svarový kov velmi dobrou smáčivost a správnou tuhost. Dále obsahuje speciální komponenty, které se v průběhu svařování rozkládají a tím vytvářejí ochranný plyn. Tento plyn ochraňuje tavnou lázeň před atmosférickým dusíkem, čímž zaručuje optimální houževnatost svaru. [11]

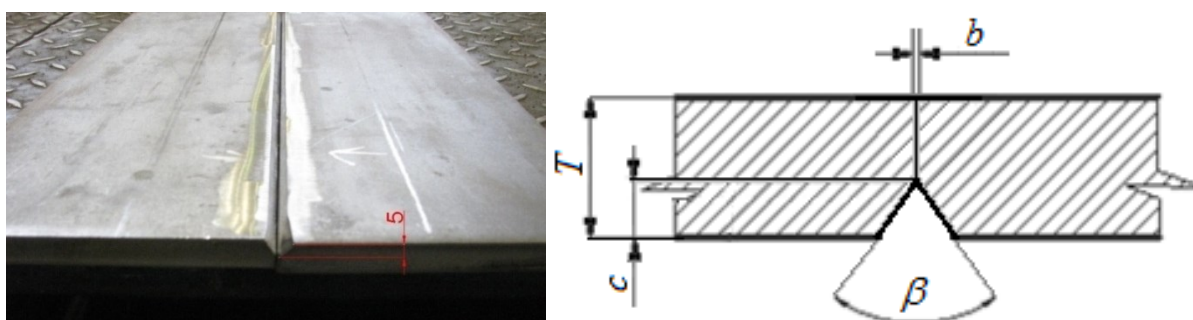
Tab. 4 Chemické složení tavidla [hm %] dle inspekčního certifikátu

C	Mn	Si	P	S
0,084	1,43	0,17	0,019	0,011

2.2 Svařování zkušebních vzorků

Všechny plechy byly rozřezány v polovině jejich šířky a připraveny svarové plochy (obr. 7) pomocí vodního paprsku, laseru, plazmy a kyslíko acetylenového plamene. Pomocí vodního paprsku byly zhotoveny dva vzorky, jeden byl svařen bez tepelného a druhý s tepelným zpracováním. Rozpis jednotlivých vzorků je uveden v tabulce 5.

Kvalita svarových ploch byla zkontrolována penetrační zkouškou, následně byly plochy očištěny a připraveny k další fázi experimentu ke svařování.



Obr. 7 Schéma úkosu

$$T = 15 \text{ mm}, c = 5 \text{ mm}, \beta = 60^\circ, b = 0 \text{ mm}$$

Tab. 5 Označení zkušebních vzorků

Označení vzorku	Příprava svarových ploch	Jakost	Přídavný materiál	Tloušťka	Tepelné zpracování
1	vodním paprskem	S235JR+N	OE-S2 + F. OP 132	15 mm	BEZ TZ
2	vodním paprskem	S235JR+N	OE-S2 + F. OP 132	15 mm	S TZ
3	laserem	S235JR+N	OE-S2 + F. OP 132	15 mm	BEZ TZ
4	plazmou	S235JR+N	OE-S2 + F. OP 132	15 mm	BEZ TZ
5	kyslíko acetylenovým plamenem	S235JR+N	OE-S2 + F. OP 132	15 mm	BEZ TZ

Před samotným svařováním byly ke zkušebním vzorkům přivařeny pomocné plechy, na kterých byl proveden zápal, tak aby nebyly znehodnoceny zkušební vzorky (obr. 8). Tímto bylo předejito vzniku vad při zápalu a dosaženo vyrovnaných parametrů na zkušebních kusech. Pomocné plechy byly stejné tloušťky jako svařované vzorky a po svařování byly odstraněny pomocí brusky.



Obr 8. Nájezdový plech

Svařování vzorků bylo provedeno metodou 121 přidavným materiálem OE-S24.0X0025XB450 (\varnothing 4 mm) a tavidlem F.OP123 Parametry svařování jsou uvedeny v tabulce č. 6.

Tab. 6 Parametry svařování

Umístění housenky	Proud [A]	Napětí [V]	Rychlost svařování [cm/min]
kořen	600 - 620	28	34
mezivrstva	530	26	34
krycí vrstva	560 - 580	28	33

V první fázi byly všechny vzorky svařeny v oblasti kořene (obr. 9) a potom vydrážkovány elektrodou.



Obr. 9 Svařování kořene

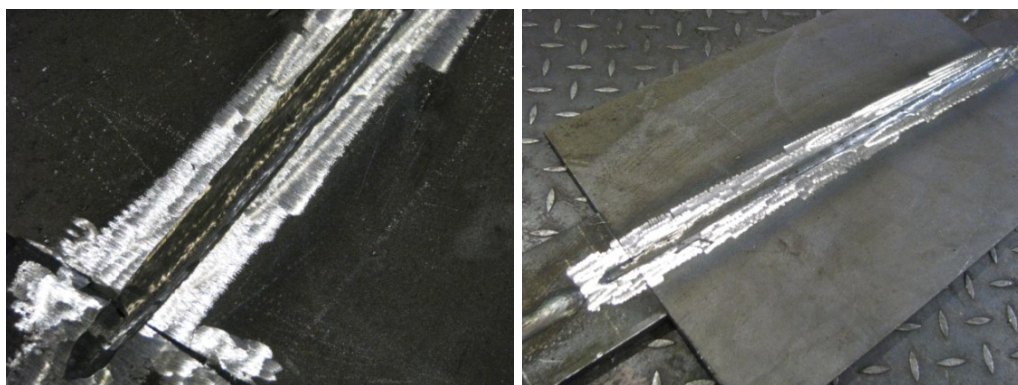
2.2.1 Drážkování uhlíkovou elektrodou

Nejrychlejší a nejlevnější proces drážkování materiálu je obloukové vzduchové drážkování uhlíkovými elektrodami. Tyto elektrody se používají na opravy apod. Uhlíková elektroda se používá jako výkonná tryska k roztavení materiálu. Pomocí vzduchu odfukuje roztavený materiál a zároveň chladí uhlíkovou elektrodu. Tato elektroda se používá pro obloukové vzduchové drážkování nelegovaných, nízkolegovaných ocelí, litin, nerezových ocelí, a jiných kovů. Kompletní sestava pro obloukové vzduchové drážkování

zahrnuje hořák s jednoduchým kabelem. Při používání OK Carbonu dosáhneme nejvyšší možnou výkonnost odstraněním kovu na jednotku délky. [8]

Pro experiment byla použita uhlíková elektroda o rozměrech 10 x 305 mm a hloubka drážky pohybovala kolem 7 mm (obr. 10).

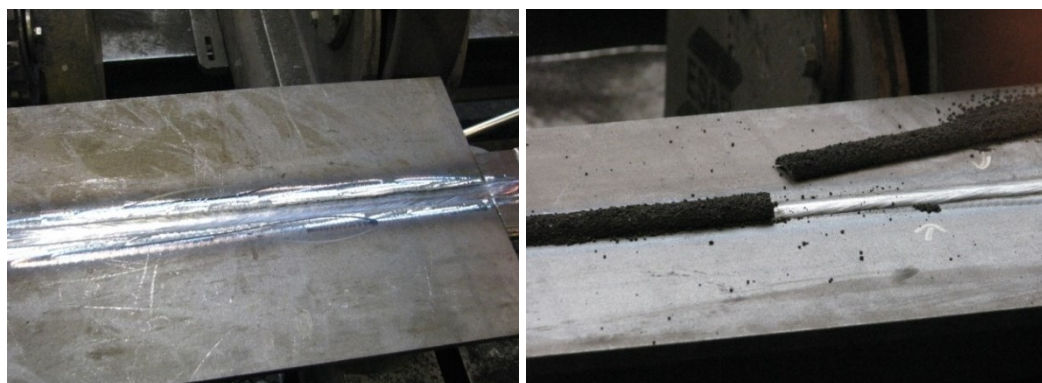
Drážkování bylo provedeno z důvodů předejití vzniku vnitřních vad při svařování vzorků a zajištění dokonalého průvaru. Hloubka drážkování byla ovlivněna tloušťkou plechu a hloubkou svaru. Po vydrážkování byly plechy očištěny a připraveny ke svařování dalších vrstev.



Obr. 10 Vydrážkovaný plech

Druhá housenka byla pokládána na vydrážkovanou část plechu. Parametry svařování mezivrstvy uvádí tabulka 6. Po svařování druhé vrstvy byla provedena krycí vrstva svarového spoje (obr. 11).

Krycí vrstvou byl dokončen svarový spoj, který na základě dodržení postupu svařování napomáhá k úspěšnému dokončení experimentu.

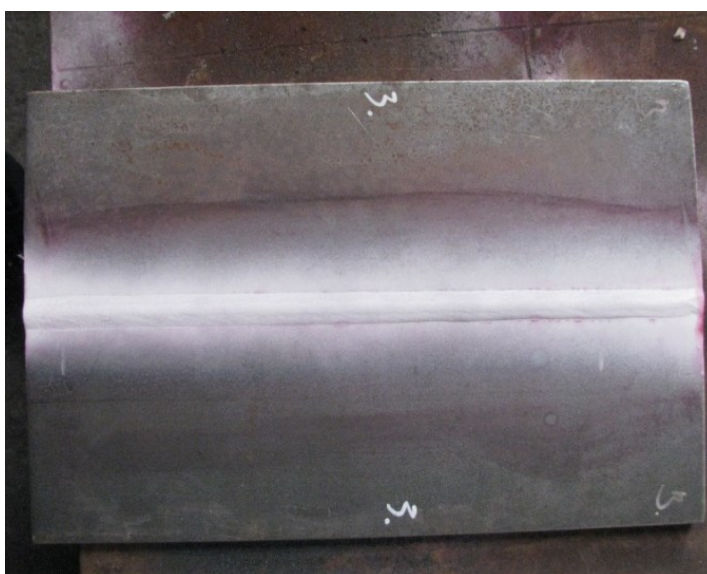


Obr. 11 Svařování vyplňovací a krycí vrstvy

2.3 Kapilární zkouška na vzorcích

Tato zkouška byla provedena ve dvou případech. V prvním případě byla použita kapilární zkouška před svařováním na svarových plochách všech vzorků za účelem předejití předčasným vadám při svařování.

V druhém případě byla provedena na zhotovených svarových spojích a to z obou stran (obr. 12). Při provedení kapilární zkoušky svarové spoje nevykazovaly vady a mohly být podrobeny kontrole vnitřních vad.

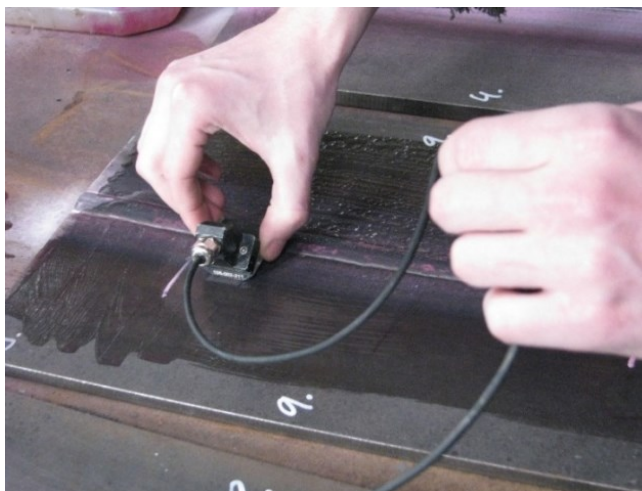


Obr. 12 Penetrace na zkušebním vzorku

2.4 Ultrazvuková zkouška na vzorcích

Druhou nedestruktivní zkouškou byl kontrolován výskyt vnitřních vad. V první fázi byla na vzorky aplikována potírací hmota cecalum A500, která je dodávána v sypké formě a musí se ve správném poměru smíchat s vodou. V druhé fázi byl pomocí sondy kontrolován výskyt vnitřních vad (obr. 13). Jako typ sondy byla zvolena uhlíková sonda MWB 60-4. Tento typ sondy se používá převážně pro kontrolu svaru. Úhel snímání sondy je 60° a frekvence se pohybuje kolem 4MHz.

Ultrazvukovou zkouškou nebyly detekovány žádné vnitřní vady, tudíž mohlo být provedeno další zkoušení svarových spojů.



Obr. 13 Zkouška ultrazvukem na zkušebním vzorku

2.5 Řezání vzorků

Po svařování vzorků a následných NDT zkouškách byly svarové spoje rozřezány dle požadovaných rozměrů pro další zkoušení. Vzorky byly nařezány na pásové pile Pilous ARG 400 dle normy ČSN EN ISO 15614-1 (obr. 14).



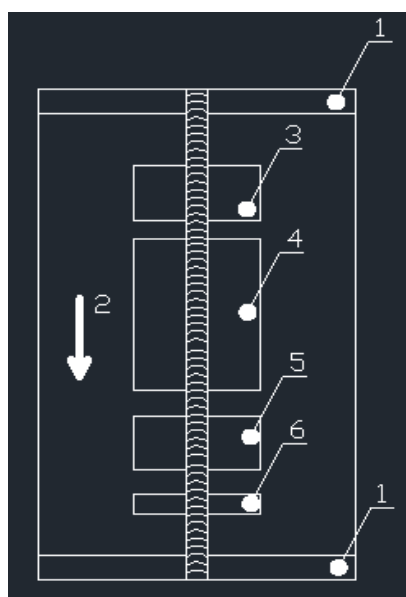
Obr. 14 Řezání vzorků

Předmětem normy ČSN EN ISO 15614-1 je stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů a zkoušení postupu svařování. Dále určuje podmínky pro provádění zkoušek. Tato norma se vztahuje na plamenové a obloukové svařování oceli všech tvarů

a pro obloukové svařování niklu a slitin niklu všech výrobků. Mezi obloukové a plamenové svařování patří metoda 111, 131, 135, 134, 31. [9]

Zkušební svarové spoje musí mít normalizovaný tvar a rozměry. Abychom mohli provést všechny požadované zkoušky, musí být dostačující počet kusů a jejich délka. Pokud by na daných vzorcích byl požadavek na zkoušku rázem v ohybu s vrubem v TOO, pak je nutné označit směr svařování na daném vzorku. Minimální rozměry zkušebních plechů musí být tloušťka x 150 x 350 mm.

Co se týče kontroly a zkoušení, tak tato norma zahrnuje jak NDT tak destruktivní zkoušky. Dále mohou být provedeny i doplňující zkoušky, jako jsou korozní zkoušky, chemický rozbor, mikroskopická kontrola apod. Umístění a odběr zkušebních vzorků je uveden na obrázku 15. Tyto vzorky mohou být odebrány pouze, pokud vyjdou NDT zkoušky.



Obr. 15 Odběr zkušebních vzorků

- 1- odpad 25 mm
- 2- směr svařování
- 3- vzorek pro zkoušku tahem, nebo pro zkoušku ohybem
- 4- vzorek pro zkoušku rázem v ohybu
- 5- vzorek pro zkoušku tahem, nebo pro zkoušku ohybem
- 6- vzorek pro kontrolu makrostruktury a pro zkoušku tvrdosti

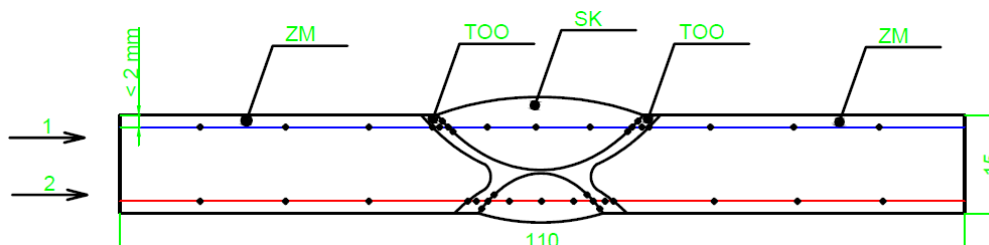
Pro experiment byly svařeny svarové spoje o rozměrech 15 x 300 x 550 mm. Oproti normě byly svarové spoje delší, z důvodu možného zkoušení nad rámec stanovený normou. Ze svarových spojů byly provedené zkoušky tvrdosti, mikrostruktury, makrostruktury, ohybové zkoušky a zkoušky tahem.

2.6 Zkoušky tvrdosti dle ČSN EN 1043-1

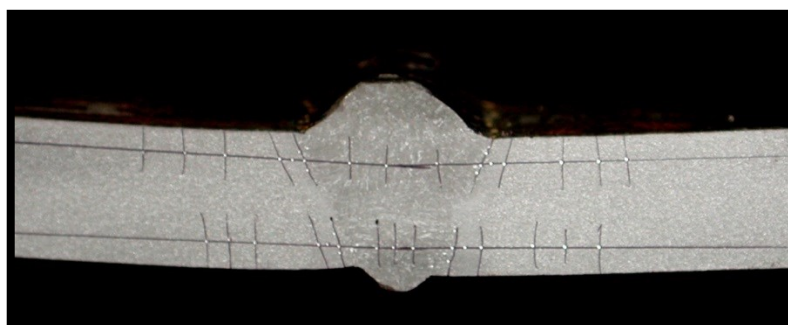
Zkouška tvrdosti byla provedena metodou podle Vickerse (HV10) u všech svarových spojů. Bylo provedeno celkem 38 měření ve dvou liniích u každého vzorku. Jednotlivé vtisky byly umístěny do 2 mm od povrchu a do 2 mm ze strany kořene ve všech oblastech svarového spoje.

Před zahájením měření, byly vzorky vybroušeny a následně naleptány v 4% kyselině dusičné. Po naleptání se na vzorcích zobrazily jednotlivé oblasti, ve kterých bylo provedeno měření tvrdosti.

Jednotlivá měření jsou uvedena na schématickém obrázku 16 a u konkrétního vzorku (obr. 17).



Obr. 16 Místa vpichu ve zkušebním vzorku

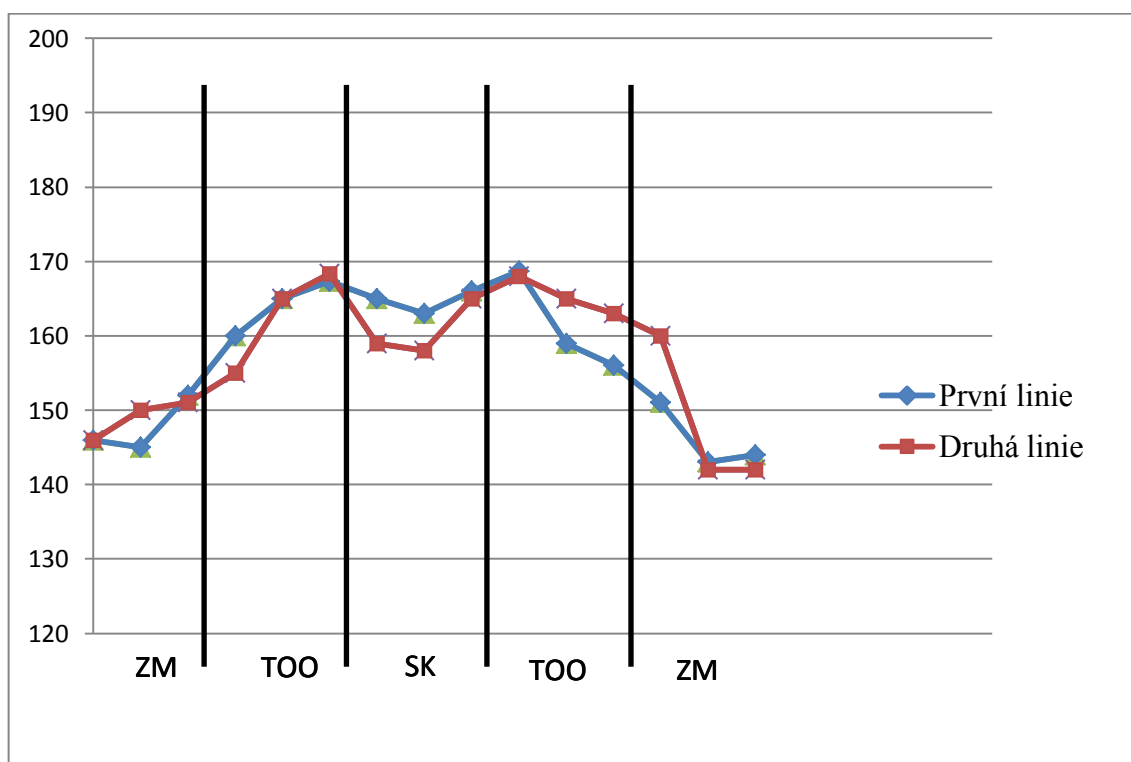


Obr. 17 Místa vpichu ve zkušebním vzorku

Vzorek č. 1

Tab. 7 Zkouška tvrdosti HV10

	ZM			TOO			SK			TOO			ZM				
První linie							167							170			
	146	145	152	160	165	169	165	163	166	164	159	156	151	143	144		
							166							172			
Druhá linie							172							165			
	146	150	151	155	165	166	159	158	165	171	165	163	160	142	142		
							167							168			

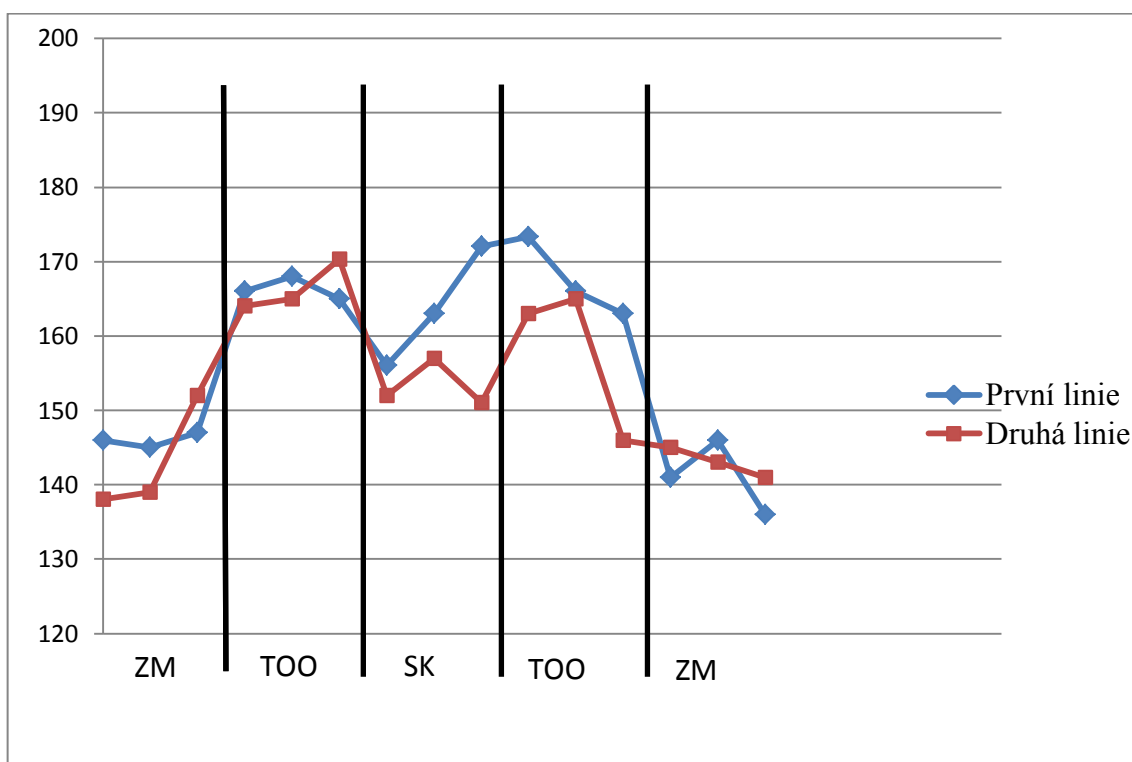


Graf 1 Tvrdosti na vzorku č. 1

Vzorek č. 2

Tab. 8 Zkouška tvrdosti HV10

	ZM			TOO			SK			TOO			ZM							
První linie							173							172						
	146	145	147	166	168	162	156	163	172	173	166	163	141	146	136					
Druhá linie							160							175						
							168							158						
	138	139	152	164	165	172	152	157	151	164	165	146	145	143	141					
						171							167							

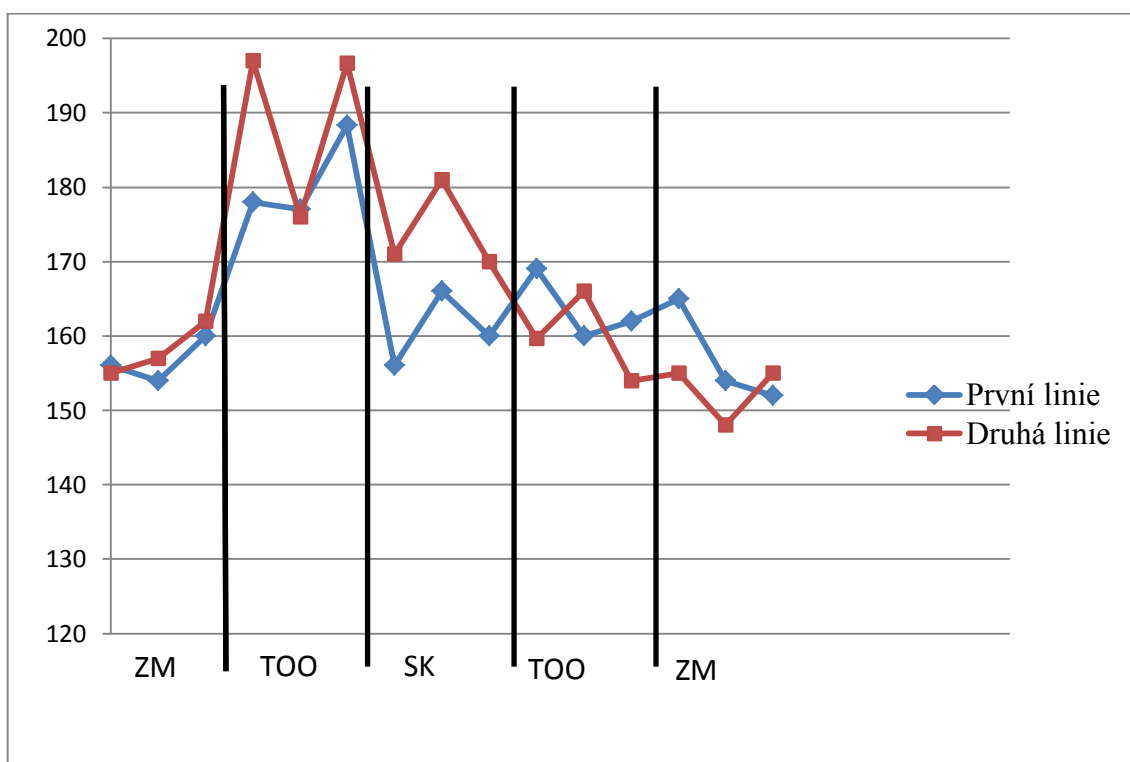


Graf 2 Tvrdomsti na vzorku č. 2

Vzorek č. 3

Tab. 9 Zkouška tvrdosti HV10

	ZM			TOO			SK			TOO			ZM				
První linie							196							166			
	156	154	160	178	177	183	156	166	160	164	160	162	165	154	152		
Druhá linie							186							177			
							196							145			
	155	157	162	197	176	188	171	181	170	168	166	154	155	148	155		
						206							166				

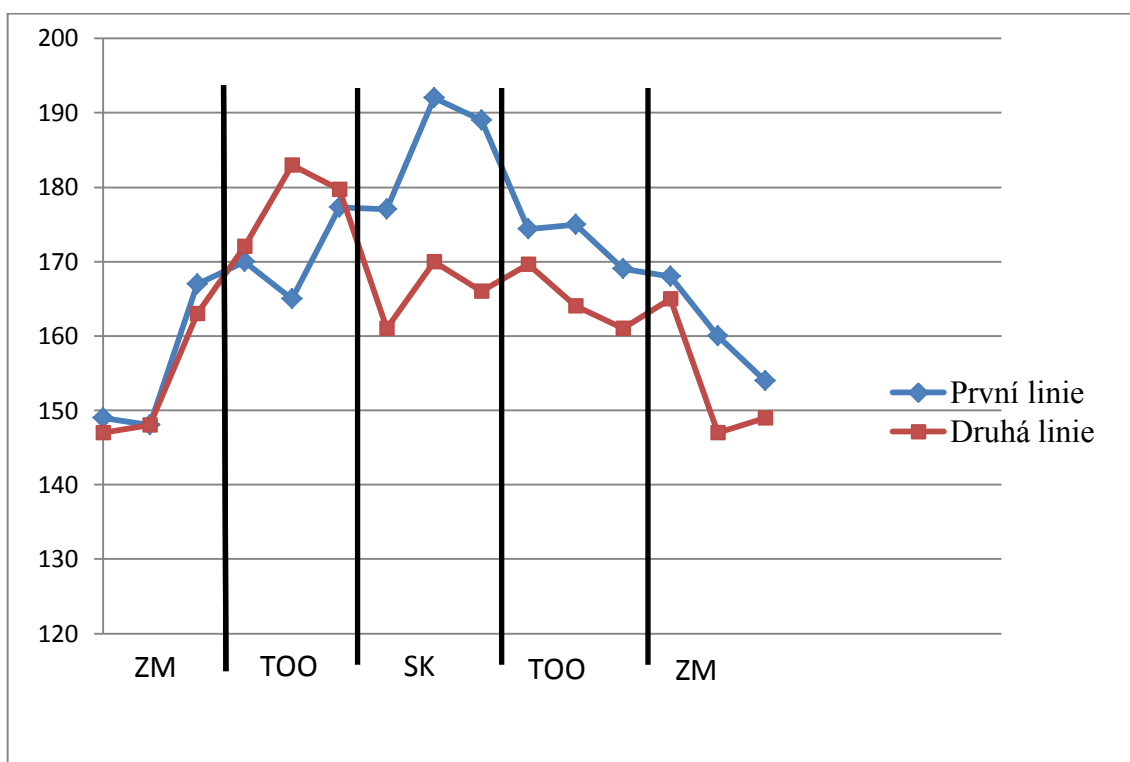


Graf 3 Tvrdosti na vzorku č. 3

Vzorek č. 4

Tab. 10 Zkouška tvrdosti HV10

	ZM			TOO			SK			TOO			ZM							
První linie							177							173						
	149	148	167	170	165	176	177	192	189	172	175	169	168	160	154					
							179							178						
Druhá linie							182							166						
	147	148	163	172	183	180	161	170	166	167	164	161	165	147	149					
							177							176						

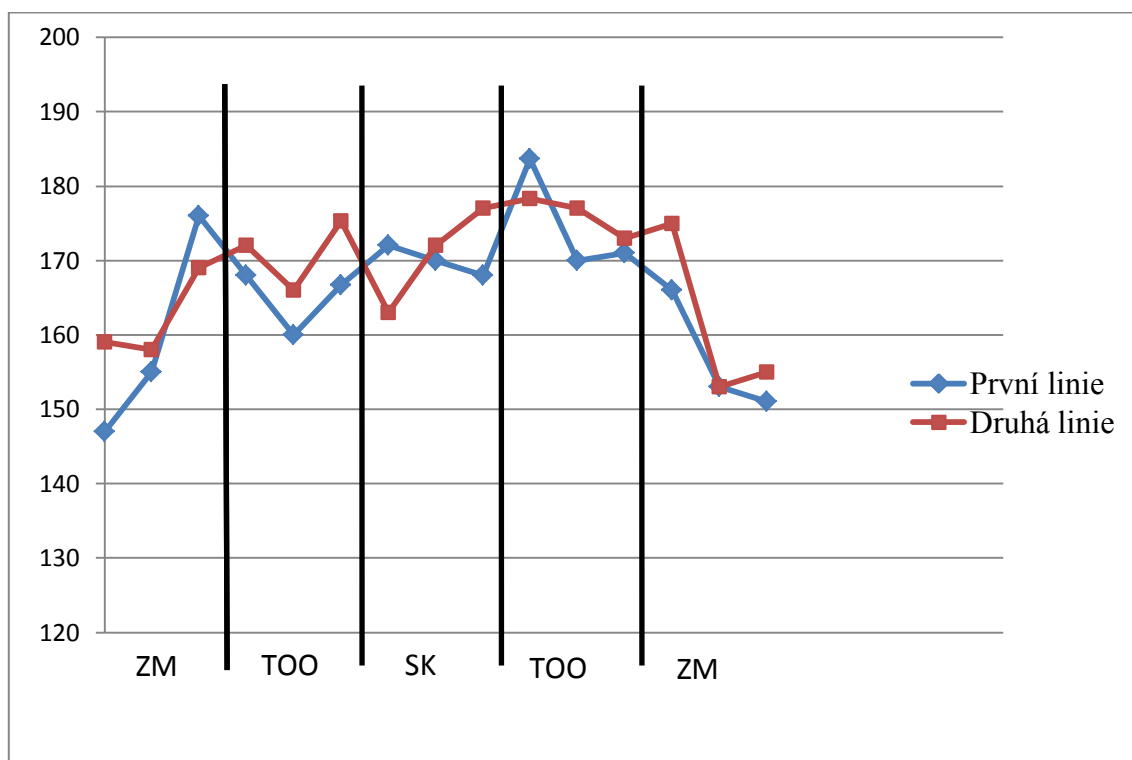


Graf 4 Tvrdosti na vzorku č. 4

Vzorek č. 5

Tab. 11 Zkouška tvrdosti HV10

	ZM			TOO			SK			TOO			ZM							
První linie							161							191						
	147	155	176	168	160	171	172	170	168	180	170	171	166	153	151					
							168							180						
Druhá linie							178							180						
	159	158	169	172	166	179	163	172	177	179	177	173	175	153	155					
							169							176						



Graf 5 Tvrdosti na vzorku č. 5

2.7 Mikrostruktura a makrostruktura svarových spojů dle ČSN EN 1321

V experimentální části byly provedeny rovněž kontroly makrostruktury a mikrostruktury svarových spojů.

Kontrola makrostruktur svarových spojů, se skládala ze dvou částí a to z vlastní kontroly a následně z pořízení fotodokumentace svarových spojů. V první části byly vzorky vybroušeny a následně vyleštěny pomocí vodních brusných papírů a naleptány v 4% kyselině dusičné. Po vyleptání jednotlivých oblastí svarového spoje bylo provedeno vyhodnocení dle příslušných norem.

U vzorků č. 1, 2, 4 a 5 byla makrostruktura v pořádku, u vzorku č. 3 byla zjištěna nepřesnost při svařování. Na obrázku 18, 22, 26, 30, 34 je vidět makrostruktura svarového spoje.

Druhá část byla zaměřena na vyhodnocení mikrostruktury. Vzorky byly rozřezány uprostřed svarového kovu a zkráceny na požadovanou délku. Po rozřezání byly zality do polyfastu a vytvrzeny. Po vytvrzení byly vybroušeny a následně vyleštěny na co nejnižší drsnost a podobně jako u makrostruktury naleptány v 4% kyselině dusičné. Mikrostruktura byla prováděna na mikroskopu Neophot 21.

Vzorek č. 1

Makrostruktura



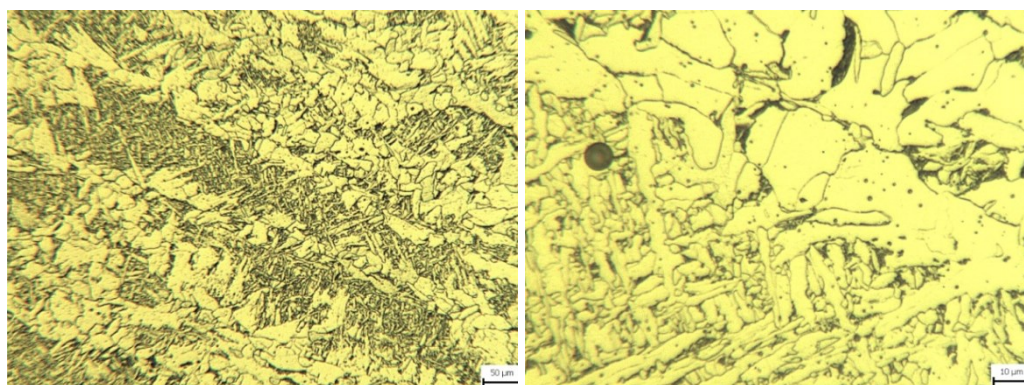
Obr. 18 Makrostruktura svarového spoje vzorku č. 1

Mikrostruktura

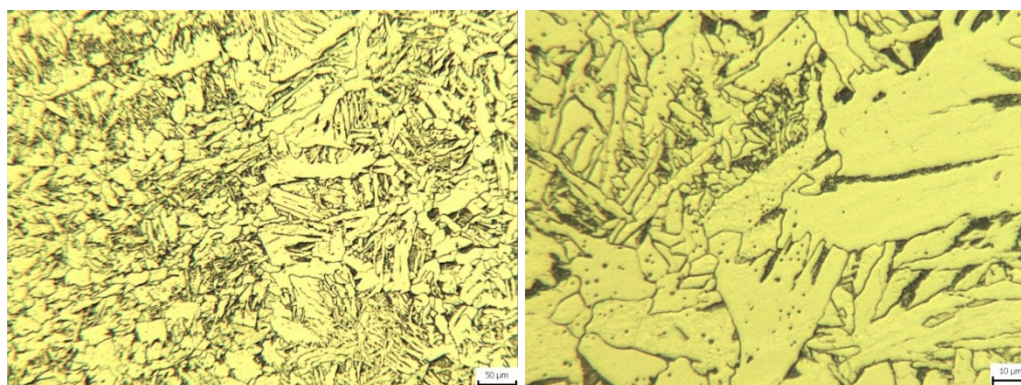
Kontrolou mikrostruktury vzorku č. 1 byla ve svarovém kovu zjištěna lící bainiticko - feriticko - perlitická struktura (obr. 19). V oblastech feritu vytvářejícího se kolem bainitických bloků, se vyskytovalo malé množství jemného perlitu. V matici byly přítomny drobné rovnoměrně rozložené nekovové částice charakteru oxidů a ojedinělých bublin velikosti cca 5 μm .

Hranice ztavení byla tvořena zrny feritu, bloky bainitu a modulemi perlitu (obr. 20).

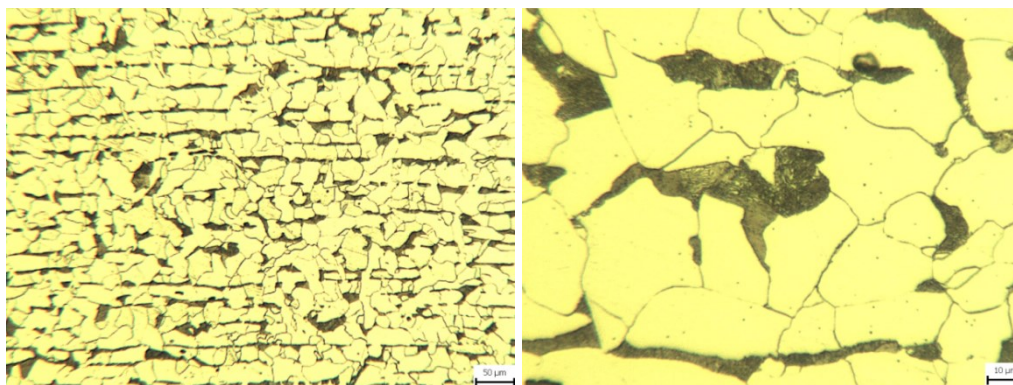
Základní materiál byl rovnoměrný, řádkovitý a tvořen polyedrickými zrny feritu a modulemi bainitu a lamelárního perlitu (obr. 21).



Obr. 19 Vzorek č. 1 Mikrostruktura svarového kovu zvětšena 100x a 500x



Obr. 20 Vzorek č. 1 Mikrostruktura hranice ztavení zvětšena 100x a 500x



Obr. 21 Vzorek č. 1 Mikrostruktura základního materiálu zvětšena 100x a 500x

Vzorek č. 2

Makrostruktura



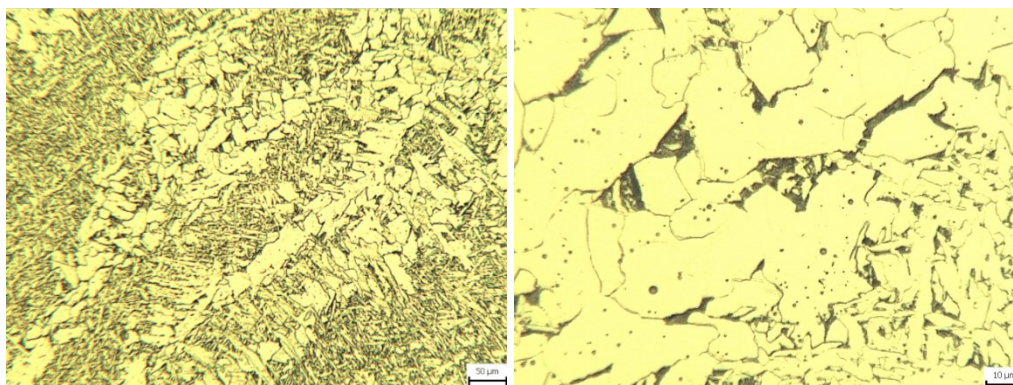
Obr. 22 Makrostruktura svárového spoje vzorku č. 2

Mikrostruktura

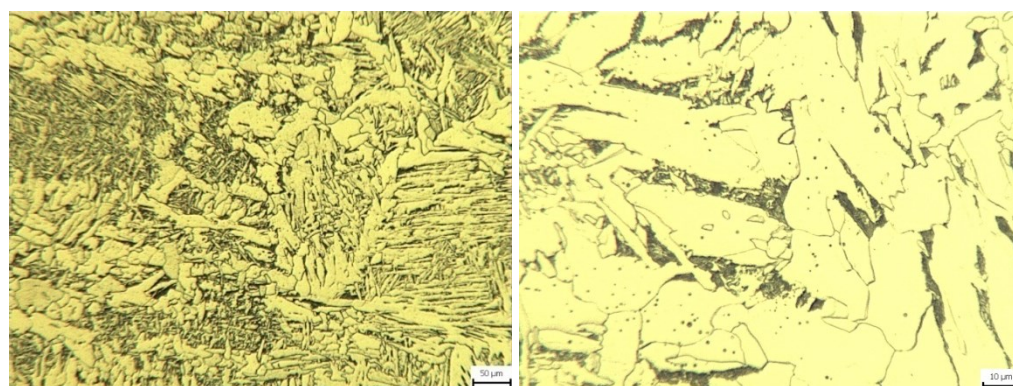
Vzorek č. 2 je v podstatě stejný jako vzorek č. 1. Ve svarovém kovu byla zjištěna lící bainiticko - feriticko - perlitická struktura (obr. 23). V matrici nejsou výskyty póru jako u vzorku č. 1.

Hranice ztavení je podobná jako u vzorku č. 1 mikrostruktura tvořena zrny feritu, bloky bainitu a modulemi perlitu (obr. 24).

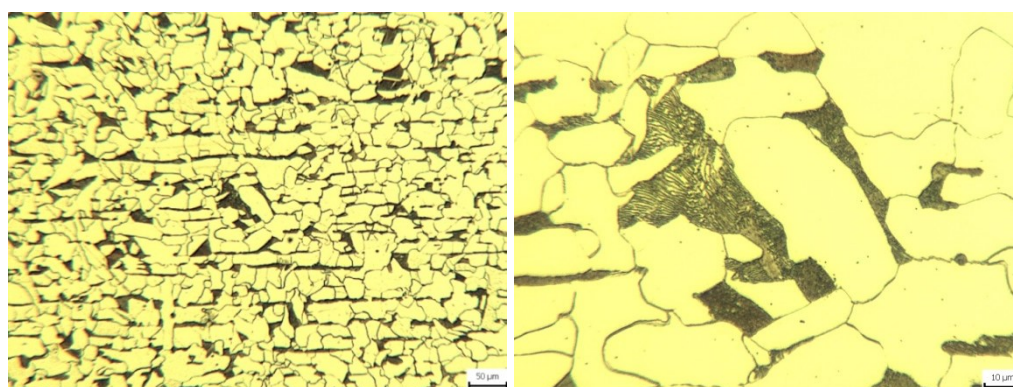
Základní materiál byl rovnoměrný, řádkovitý a tvořen polyedrickými zrny feritu a modulemi bainitu a lamelárního perlitu (obr. 25).



Obr. 23 Vzorek č. 2 Mikrostruktura svarového kovu zvětšena 100x a 500x



Obr. 24 Vzorek č. 2 Mikrostruktura hranice ztavení zvětšena 100x a 500x



Obr. 25 Vzorek č. 1 Mikrostruktura základního materiálu zvětšena 100x a 500x

Vzorek č. 3**Makrostruktura**

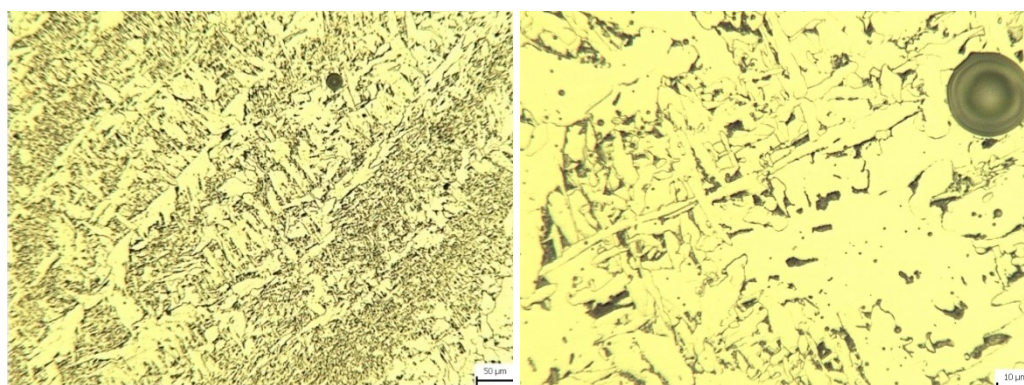
Obr. 26 Makrostruktura svárového spoje vzorku č. 3

Mikrostruktura

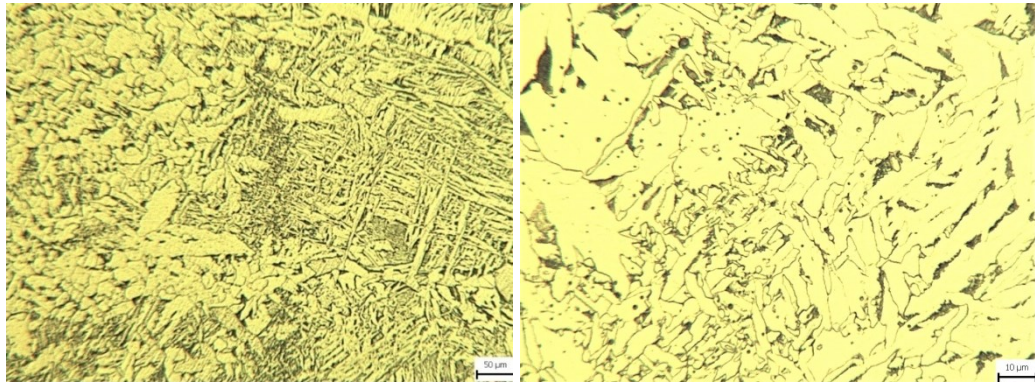
Vzorek č. 3 má stejnou strukturu svárového kovu jako vzorek č. 2 a vzorek č. 1 licí bainiticko - feriticko - perlitickuo. Ve svárovém kovu se vyskytují póry o velikosti 12-13 μ m. V oblasti kořene na hranici housenek se vyskytl vměstek o velikosti cca 50 μ m. (obr. 27).

Hranice ztavení byla tvořena zrny feritu, bloky bainitu a modulemi perlitu (obr. 28).

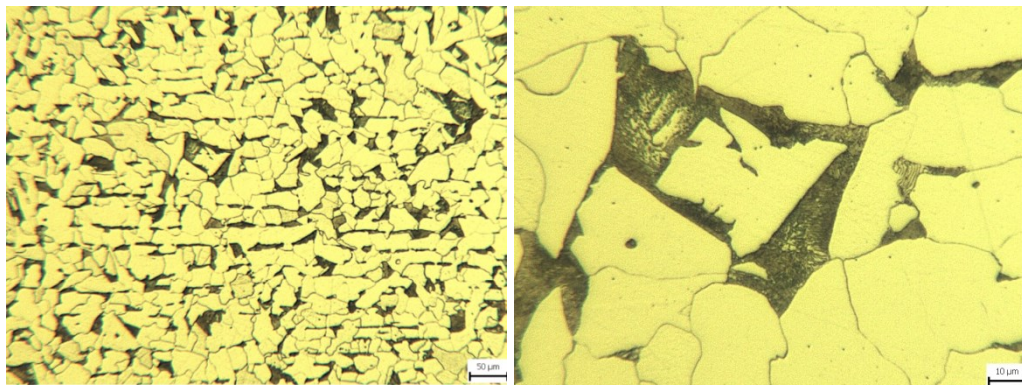
Základní materiál byl rovnoměrný, řádkovitý a tvořen polyedrickými zrny feritu a modulemi bainitu a lamelárního perlitu (obr. 29).



Obr. 27 Vzorek č. 3 Mikrostruktura svarového kovu zvětšena 100x a 500x



Obr. 28 Vzorek č. 3 Mikrostruktura hranice ztavení zvětšena 100x a 500x



Obr. 29 Vzorek č. 3 Mikrostruktura základního materiálu zvětšena 100x a 500x

Vzorek č. 4

Makrostruktura



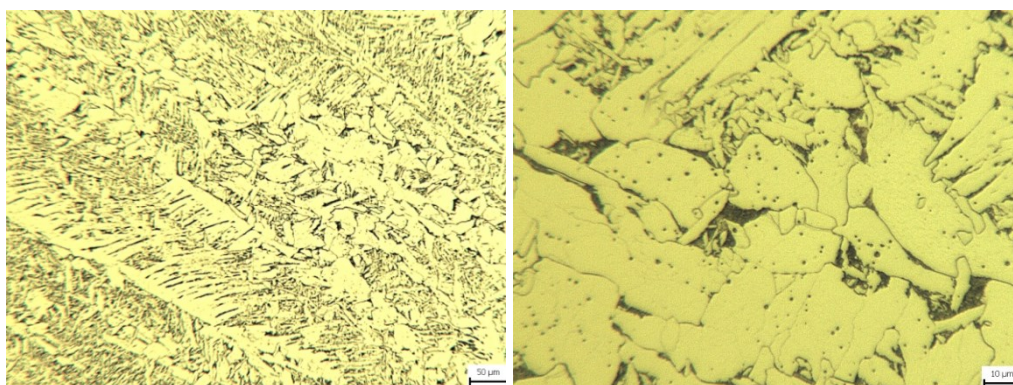
Obr. 30 Makrostruktura svárového spoje vzorku č. 4

Mikrostruktura

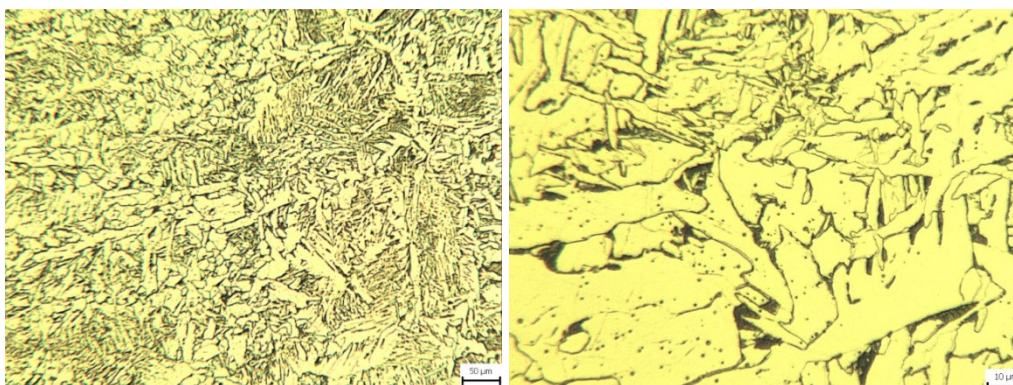
Kontrolou mikrostruktury vzorku č. 4 byla ve svarovém kovu zjištěna lící bainiticko - feriticko - perlitická struktura (obr. 31)..

Hranice ztavení byla tvořena zrny feritu, bloky bainitu a modulemi perlitu (obr. 32).

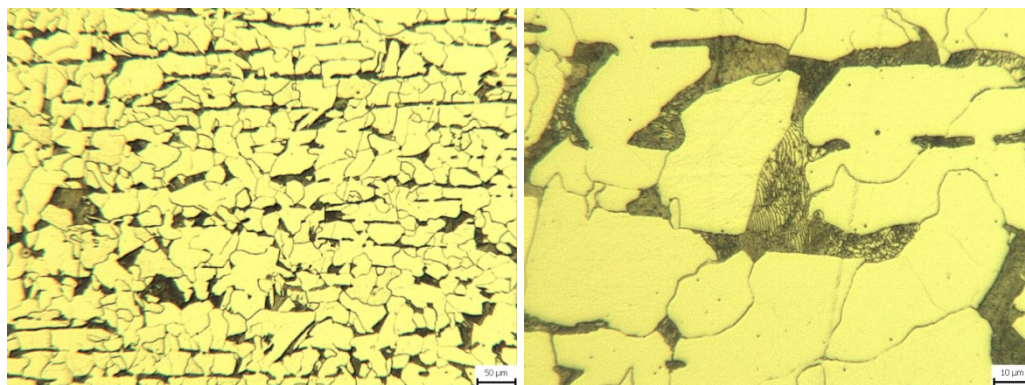
Základní materiál byl rovnoměrný, řádkovitý a tvořen polyedrickými zrny feritu a modulemi bainitu a lamelárního perlitu (obr. 33).



Obr. 31 Vzorek č. 4 Mikrostruktura svarového kovu zvětšena 100x a 500x



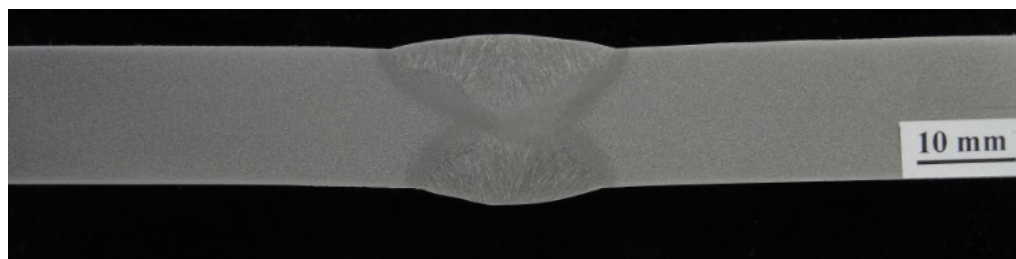
Obr. 32 Vzorek č. 4 Mikrostruktura hranice ztavení zvětšena 100x a 500x



Obr. 33 Vzorek č. 4 Mikrostruktura základního materiálu zvětšena 100x a 500x

Vzorek č. 5

Makrostruktura



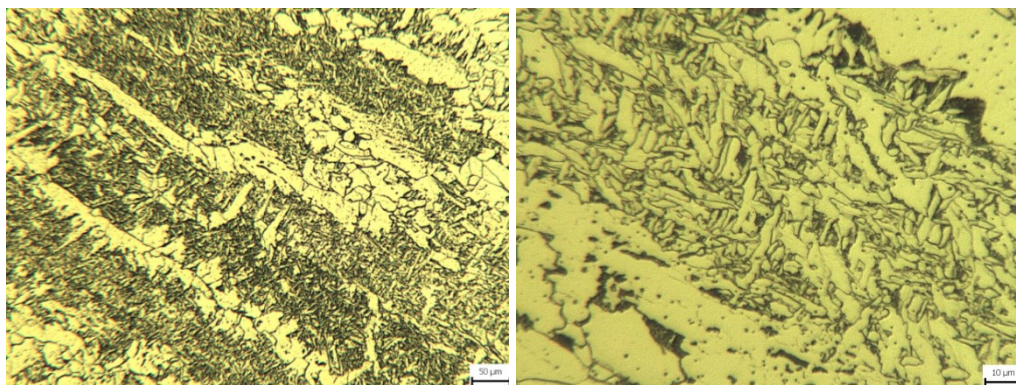
Obr. 34 Makrostruktura svárového spoje vzorku č. 5

Mikrostruktura

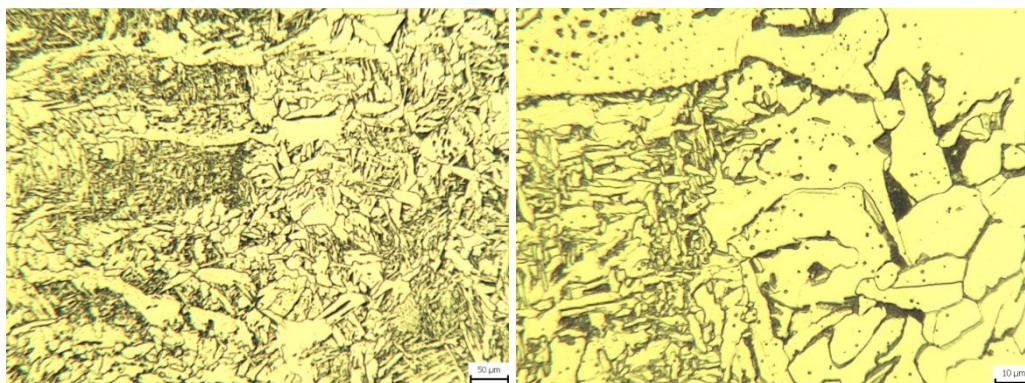
Vzorek č. 5 je totožný jako vzorek č. 4. a vzorek č. 2. U těchto tří vzorků je struktura svarového kovu licí bainiticko – feriticko - perlitická. obr. 35).

Hranice ztavení byla tvořena zrny feritu, bloky bainitu a modulemi perlitu (obr. 36).

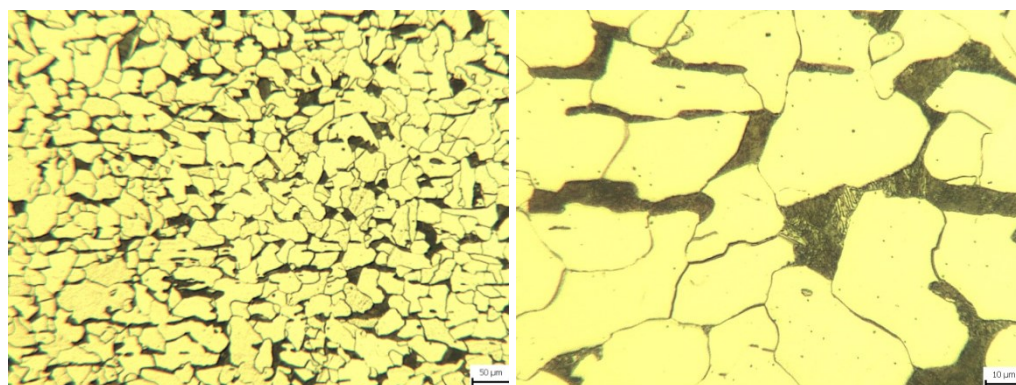
Základní materiál byl rovnoměrný, řádkovitý a tvořen polyedrickými zrny feritu a modulemi bainitu a lamelárního perlitu (obr. 37).



Obr. 35 Vzorek č. 5 Mikrostruktura svarového kovu zvětšena 100x a 500x



Obr. 36 Vzorek č. 5 Mikrostruktura hranice ztavení zvětšena 100x a 500x



Obr. 37 Vzorek č. 5 Mikrostruktura základního materiálu zvětšena 100x a 500x

2.8 Zkouška ohybem dle ČSN EN 910

Další zkouškou byla zkouška ohybem, která byla prováděna na vzorcích o rozměrech 15 x 60 x 300 mm. Principem zkoušky bylo zjistit výskyt trhlin na svarových spojích při zatížení. Celkem se na jednom svarovém spoji prováděly čtyři zkoušky a to dvě ze strany povrchu a dvě ze strany kořene. Zkouška se prováděla při teplotě +20 °C. Průměr ohýbacího trnu byl 45mm a vzdálenost mezi podpěrnými válečky byla 90 mm. Zkušební vzorky byly ohýbaný na úhel 180°.

Zkouška ohybem u svarových spojů č. 1 – 5 byla vyhovující.

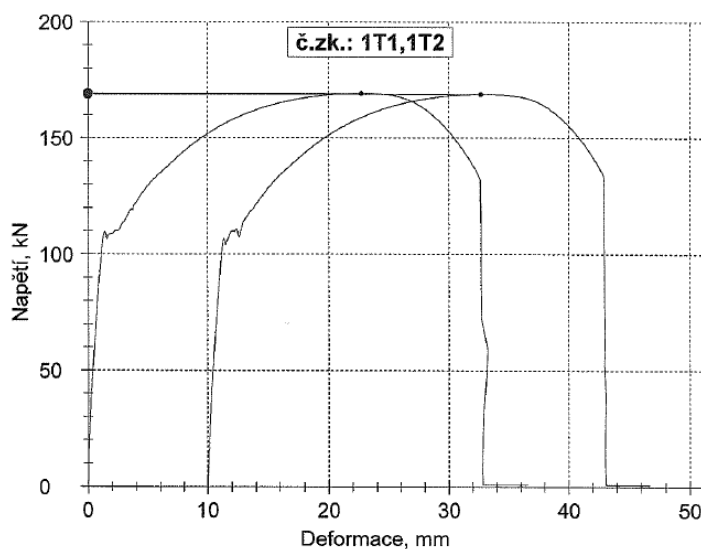
2.9 Zkouška tahem dle ČSN EN 895

Tahovou zkoušku jsme provedli v trhacím stroji, který umožnil provést deformaci vzorků a následně vyhodnotit jednotlivé zkoušky. Při této zkoušce je vzorek podroben tahové deformaci, jejíž velikost roste s časem. Tato zkouška byla prováděna celkem dvakrát na jednom zkušebním plechu, aby výsledky byly co nejpřesnější. Ve vzorcích budeme vyhodnocovat mez pevnosti [MPa], místo lomu, zatížení při mezi kluzu [kN], a deformaci [mm]. Zkušební teplota byla u všech vzorků 20°C.

Vzorek č. 1

U první zkušební tyče byla šířka 25mm, tloušťka 14,7 mm a její průřez byl 367.5mm². Mez pevnosti byla naměřena 460 MPa a hodnota zatížení při mezi kluzu vyšla 169 kN. Z grafu je dále patrné, že deformace vyšla 32,6mm. Zkušební tyč praskla mimo svár.

U druhé zkušební tyče byly hodnoty v celku totožné. Šířka byla 25 mm, tloušťka 14,7 mm, průřez 367,5, meze pevnosti 460 MPa, zatížení při mezi kluzu 169 kN, pouze deformace vyšla 33mm. Stejně jako u prvního vzorku tyč praskla mimo svár.

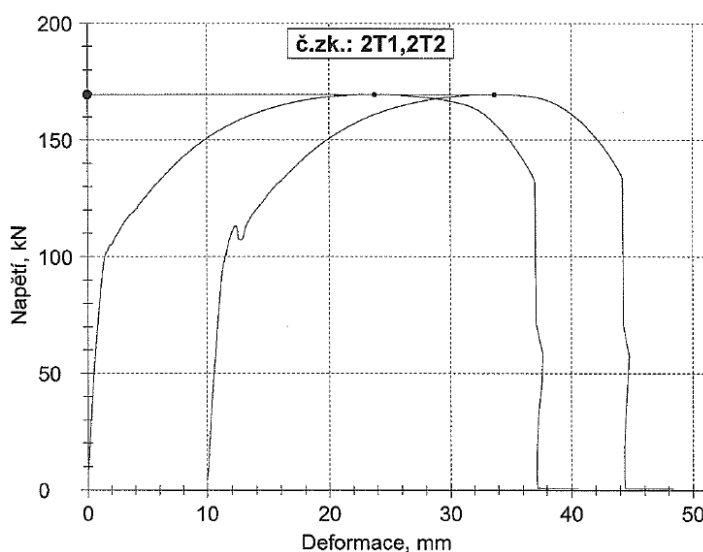


Graf 6 Naměřené hodnoty tahovou zkouškou u vzorku č. 1

Vzorek č. 2

U druhého zkušební vzorku byly hodnoty podobné jako u vzorku č. 1. První zkušební tyč měla šířku 25mm, tloušťku 14,7 mm a její průřez byl 367.5mm^2 . Mez pevnosti vyšla 460 MPa a zatížení při mezi kluzu bylo 169 kN. Zkušební tyč praskla mimo svár a z grafu bylo zjištěno, že deformace u první zkušební tyče je 37.4mm, což je delší než u vzorku č. 1.

U druhé zkušební tyče se výsledky mírně lišili. Šířka, tloušťka a průřez byly totožné, ale mez pevnosti byla naměřena 463 MPa a zatížení při mezi kluzu bylo 170 kN. Zkušební tyč praskla mimo svár a z grafu bylo zjištěno, že deformace u druhé zkušební tyče je 34.4mm.

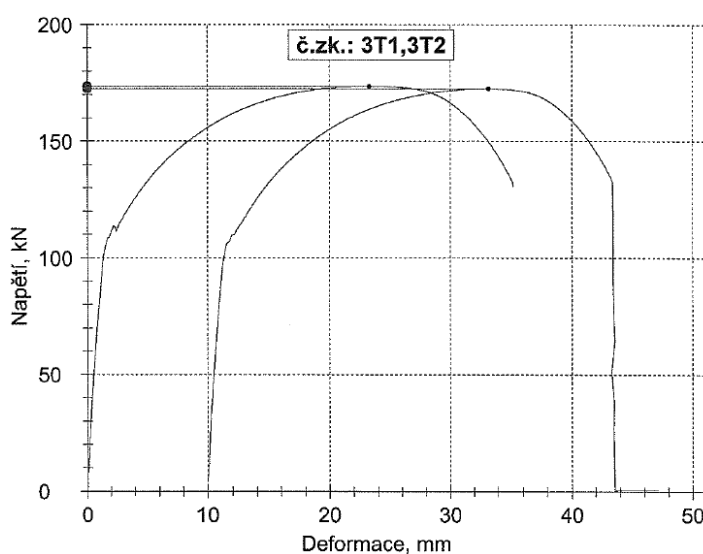


Graf 7 Naměřené hodnoty tahovou zkouškou u vzorku č. 2

Vzorek č. 3

Třetí vzorek má oproti předchozím vzorkům mírně odlišné hodnoty. U první tyče byla šířka 25,1mm, tloušťka 14,6 mm a průřez 366.5 mm². Mez pevnosti vyšla 475 MPa a zatížení při mezi kluzu je 174 kN. Deformace u tohoto vzorku není z grafu patrná. Stejně jako v předešlých případech, zkušební tyč praskla mimo svár.

U druhé zkušební tyče byla šířka 14,7 mm, průřez 369 mm² a tloušťka 14,6 mm. Mez pevnosti vyšla 469 MPa a zatížení při mezi kluzu bylo 173 kN. Z grafu je dále patrné, že deformace je 33,8mm. Prasknutí bylo mimo svár.

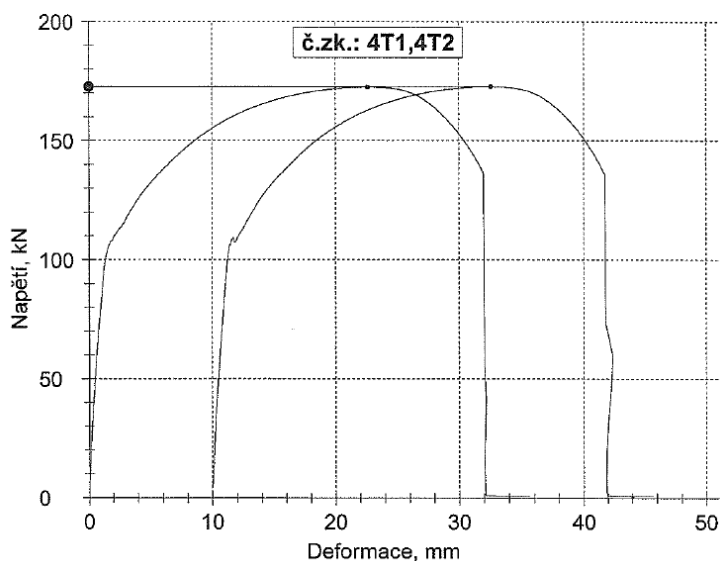


Graf 8 Naměřené hodnoty tahovou zkouškou u vzorku č. 3

Vzorek č. 4

U čtvrtého zkušebního vzorku jsme naměřili tyto hodnoty. První zkušební tyč měla šířku 25mm, tloušťku 14,4 mm a její průřez byl 360 mm². Meze pevnosti vyšla 478 MPa a zatížení při mezi kluzu bylo 172 kN. Zkušební tyč praskla mimo svár a z grafu bylo zjištěno, že deformace u první zkušební tyče je 32.2mm.

U druhé zkušební tyče se výsledky mírně lišili. Šířka byla 25 mm, tloušťka 14,7 mm a průřez vyšel 367,5 mm². Mez pevnosti vyšla 471 MPa a zatížení při mezi kluzu bylo 173 kN. Zkušební tyč praskla mimo svár a z grafu bylo zjištěno, že deformace u druhé zkušební tyče je 31.9mm.

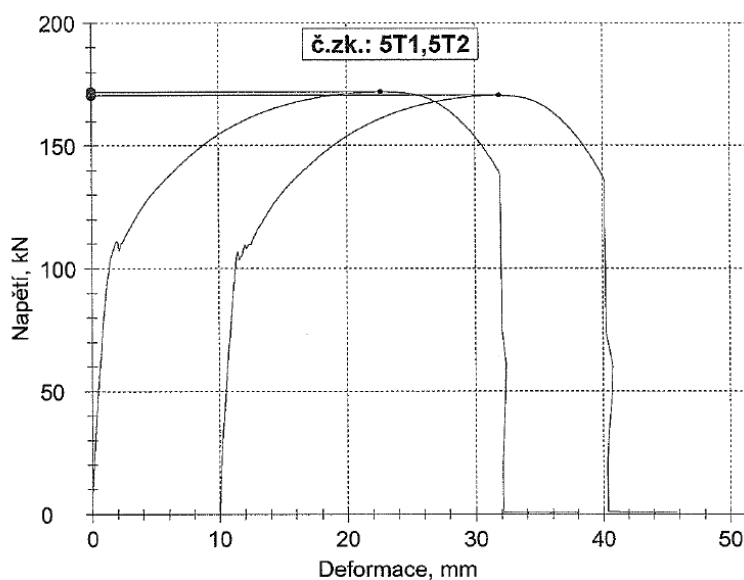


Graf 9 Naměřené hodnoty tahovou zkouškou u vzorku č. 4

Vzorek č. 5

Poslední pátý vzorek má následující hodnoty. U první tyče byla šířka 25mm, tloušťka 14,7 mm a průřez 367,5 mm². Mez pevnosti vyšla 468 MPa a zatížení při mezi kluzu bylo 172 kN. Z grafu bylo zjištěno, že deformace je 32,2 mm. Stejně jako v předešlých případech, zkušební tyč praskla mimo svár.

U druhé zkušební tyče byla šířka 15,1 mm, průřez 366,5 mm² a tloušťka 14,6 mm. Mez pevnosti vyšla 464 MPa a zatížení při mezi kluzu bylo 170 kN. Z grafu je dále patrné, že deformace vyšla 30,6mm. Přetržení tyče bylo mimo svár jako u všech případů.



Graf 10 Naměřené hodnoty tahovou zkouškou u vzorku č. 5

3 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala vlivem přípravy svarových ploch pomocí tepelných metod dělení materiálů a metody bez tepelného ovlivnění na kvalitu svarových spojů.

V teoretické části byly popsány druhy řezání materiálu jejich výhody a nevýhody, použití a další specifikace u jednotlivých metod. Následoval rozbor svařovací metody 121 (SAW), která byla uplatněna při svařování svarových spojů a popis metod NDT zkoušek, jejich provedení a funkčnost.

Experimentální část byla zaměřena na přípravu svarových ploch, svařování vzorků a jejich rozřezání na zkoušky. Jako materiál by zvolen plech jakosti S235JR+N o tloušťce 15 mm, u kterého byly připraveny svarové plochy vodním paprskem, vodním paprskem + žíhání, laserem, plazmou a kyslíko – acetylenovým plamenem. Drát pro svaření vzorků byl zvolen od firmy Air Liquide OE-S2 4.0X0025XB450. Vhodné tavidlo k danému svařovacímu drátu bylo zvoleno dle katalogu Air Liquide F.OP123.

V první části byla provedena penetrační zkouška na připravených svarových plochách, z důvodu předejití předčasných vad při svařování. Svarové plochy byly bez znatelných vad a bylo započato svařování. Jako první byl svařen kořen, který se následně vydrážkoval pomocí uhlíkové elektrody. Po vydrážkování byly plechy svařeny vyplňovací a krycí vrstvou. Celkem byly provedeny tři housenky.

Svarové spoje byly zkontrolovány vizuální, kapilární a ultrazvukovou zkouškou, které vyloučily výskyt vad. Následovalo nařezání vzorků na pásové pile dle normy ČSN EN ISO 15614-1.

Na připravených vzorcích byla provedena kontrola makro a mikrostruktury a měření tvrdosti HV10. U vzorků 1, 2, 4 a 5 byly svarové spoje v pořádku, pouze u vzorku č. 3 byla nepřesnost při drážkování a následném svařování. Kontrola mikrostruktury prokázala obdobnou vnitřní strukturu všech svarových spojů. Svarový kov vykazoval licí bainiticko – feriticko - perlitickou strukturu. Hranice ztavení byla tvořena zrny feritu, bloky bainitu a modulemi perlitu. Základní materiál byl přes průřez celkem rovnoměrný, řádkovitý a byl tvořen polyedrickými zrny feritu a modulemi bainitu a lamelárního perlitu.

Ve výsledku byly vzorky v podstatě totožné, pouze u vzorku 1 a 3 se nacházely defekty charakteru bublin.

Další zkouškou byla zkouška tvrdosti. Tato zkouška byla provedena metodou dle Vickerse HV10. Na každém vzorku bylo provedeno celkem 38 měření a to tak, že 19 měření bylo na horní části vzorku a 19 měření bylo na spodní části u kořene. Nejmenší tvrdost byla naměřena u vzorku č. 2 a největší u vzorku č. 4. Z toho vyplývá, že nejmenší tvrdost byla naměřena na vzorku řezaném vodním paprskem + žíhaní a největší tvrdost byla naměřena na vzorku páleném plazmou.

Mezi poslední prováděné zkoušky byla zkouška ohybem a zkouška tahem. Zkouška ohybem vyšla bez známek trhlin. Největší mez pevnosti vyšla u vzorku č. 4 a to 478 MPa. Nejmenší mez pevnosti vyšla u vzorku č. 1 a to 460 MPa.

Výsledkem diplomové práce je, že zkušební vzorky byly svařeny bez vad. Zkoušky ukázaly, že vzorek č. 4 (pálený plazmou) má největší mez pevnosti a největší tvrdost. Naopak u vzorku řezaném vodním paprskem vyšla tvrdost a mez pevnosti nejmenší.

4 Seznam použité literatury

- [1] SEDLÁK. *Technologie řezání plazmovým paprskem*. BRNO, 2011. Vysoké učení technické v brně.
- [2] OPĚLA. *Identifikace vlivu technologických parametrů na topografii povrchu generovaných laserovým obráběním*. Ostrava, 2015. VŠB - Technická univerzita Ostrava.
- [3] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [4] Moderní technologie pro zpracování materiálů. [Http://konstrukce.webz.cz/](http://konstrukce.webz.cz/) [online]. TURNOV: STŘEDNÍ UMĚLECKOPRŮMYSLOVÁ ŠKOLA TURNOV [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://konstrukce.webz.cz/sups/7tool.html>
- [5] AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001. ISBN 80-85771-81-0.
- [6] Zkoušky bez porušení materiálu. [Http://www.sssebrno.cz/](http://www.sssebrno.cz/) [online]. Evropský sociální fond v ČR [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/kapilarni_zkousky.pdf
- [7] Akreditovaná zkušební laboratoř pro oblast nedestruktivního zkoušení. [Http://www.bvd-ndt.cz/](http://www.bvd-ndt.cz/) [online]. ALL RIGHTS RESERVED, 2010 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.bvd-ndt.cz/cz/ultrazvuk.php>
- [8] Weldis. [Http://www.weldis.cz/](http://www.weldis.cz/) [online]. Snadnacesta.eu: ALL RIGHTS RESERVED, 2016 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.weldis.cz/svarovaci-material/drazkovaci-elektrody/dc-4x305-mm.html>
- [9] ČSN EN ISO 15614-1 (050313). *Stanovení a kvalifikace postupů svařování - Zkouška postupu svařování - Část 1: Obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. 2005.

- [10] POROVNÁNÍ KONSTRUKČNÍCH OCELÍ. *Http://www.bolzano.cz/* [online]. Bohdan Bolzano, s.r.o.: Kladno, 2016 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: http://www.bolzano.cz/assets/files/HM%20nove/Porovnani_konstrukcnich_oceli.pdf
- [11] *Katalog přídatných materiálů*. Praha 9: OERLIKON, 2013.
- [12] KOUKAL, J. Charakteristika ocelí pro tlaková zařízení, jejich svařitelnost a degradace vlastností. In *Sborník referátů TLAK 2007, 20.-22.2.2007, Praha, Líbeznice, Medim, s.r.o., 2007*.
- [13] KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich svařitelnost*. Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: Zeross, 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
- [14] STRNADEL, B. *Nauka o materiálu I*. Ostrava: VŠB - TU, 2008. 280s. ISBN 978-80-248-1842-9.
- [15] KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T. *Svařování I*. Ostrava: VŠB-TU 2005, 136 s. ISBN 80-248-0870-6.
- [16] KOUKAL, J., SCHWARZ, D., HAJDÍK, J. *Materiály a jejich svařitelnost* (Učební texty pro kurzy mezinárodních svářečských inženýrů, technologů a pro výuku teorie svařování na vysokých školách). Český svářečský ústav a VŠB-TU Ostrava, Ostrava srpen 2009. 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [17] ČSN EN ISO 15609-1 (050312). *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Stanovení postupu svařování - Část 1: Obloukové svařování*. 2005.

5 Seznam příloh

Příloha č. 1 Fotografie zkušebních vzorků

Obr. P. č. 1. 1 Příprava vzorku před svařováním

Obr. P. č. 1. 2 Příprava vzorku na monitoru

Obr. P. č. 1. 3 Přesnost svařování na displeji

Obr. P. č. 1. 4 Svařování vzorku metodou 121

Obr. P. č. 1. 5 Svařování mezivrstvy metodou 121

Obr. P. č. 1. 6 Svařování poslední housenky

Obr. P. č. 1. 7 Svařený vzorek s pomocným plechem

Obr. P. č. 1. 8 Očištěný a připravený vzorek na NDT zkoušky

Obr. P. č. 1. 9 Penetrační zkouška na vzorcích (nanášení penetrantu)

Obr. P. č. 1. 10 Penetrační zkouška na vzorcích (očištění penetrantu)

Obr. P. č. 1. 11 Penetrační zkouška na vzorcích (nanášení vývojky)

Obr. P. č. 1. 12 Vyhodnocení penetrační zkoušky

Obr. P. č. 1. 13 Penetrační zkouška provedena na všech vzorcích

Obr. P. č. 1. 14 Zkouška ultrazvukem

Obr. P. č. 1. 15 Zkouška ultrazvukem provedena na všech vzorcích

Obr. P. č. 1. 16 Řezání zkušebních vzorků

Obr. P. č. 1. 17 Nařezané zkušební vzorky na mikro a makrostrukturu

Příloha č. 2 Chemické složení

Obr. P. č. 2. 1 Inspekční certifikát

Obr. P. č. 2. 2 Product certificate přídavný drát OE-S2

Obr. P. č. 2. 3 Product certificate tavidlo F. OP 132