

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2024**

**KAREL JAN  
KALČÍK**



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

**Laserové svařování tenkých  
pozinkovaných plechů**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**AUTOR:** Karel Jan Kalčík

**VEDOUCÍ PRÁCE:** Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE

**STUDIJNÍ PROGRAM:** B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

**STUDIJNÍ OBOR:** 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

**Praha 2024**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kalčík** Jméno: **Karel Jan** Osobní číslo: **501311**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Laserové svařování pozinkovaných plechů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Laser welding of galvanized sheets**

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce bude vytvořit tupý, koutový a přeplátovaný svar pozinkovaných plechů s využitím ruční laserové svářečky. V teoretické části bude řešena bezpečnost práce s využitím ručních laserových zdrojů. Z této rešerše vzniknou dokumenty, které budou využity v provozech s ručními laserovými zdroji. Pro svary budou využity plechy S235 JR s různou tloušťkou a s různou tloušťkou zinkové vrstvy. Bude vyhodnocena jakost svaru jeho mechanické vlastnosti a korozní vlastnosti. Výsledky budou využity jak ve společnosti dodávající nové ruční laserové svářecí zdroje, tak i pro konkrétní aplikace v průmyslu.

Seznam doporučené literatury:

Katayama, S.: Handbook of laser welding technologies. Woodhead Publishing, 2013. ISBN 9780857092649  
Lawrence, J. R.: Advances in Laser Materials Processing: Technology, Research and Applications  
Woodhead Publishing, 2017. ISBN 9780081012529  
Bowman M.: Sheet Metal Work. The Crowood Press, 2014. ISBN: 9781847977793.  
Kuklík, V., Kudlacek J.: Hot-Dip Galvanizing of Steel Structures. Butterworth-Heinemann, 2016. ISBN 9780081005385

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**prof. Dr. Ing. Antonín Kříž ústav strojírenské technologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **16.10.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.01.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2024**

prof. Dr. Ing. Antonín Kříž  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolářik, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) katedry

doc. Ing. Miroslav Španěl, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Prof. Dr. Ing. Antonína Kříže, IWE, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne: .....

.....

Podpis autora

## Poděkování

Rád bych poděkoval Prof. Dr. Ing. Antonínu Křížovi, IWE za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě Fotizon s.r.o., jmenovitě panu Jaroslavu Doušovi za poskytnutí plechů k provedení experimentu a firmě LaserTherm s.r.o., jmenovitě panu Drahomíru Cvachovci za možnost provedení experimentu s ruční svářečkou Larisa v jejich firmě.



# Anotace

<b>Název diplomové práce:</b>	Lasertové svařování tenkých pozinkovaných plechů
<b>Autor práce:</b>	Karel Jan Kalčík
<b>Vedoucí práce:</b>	Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE
<b>Konzultant:</b>	
<b>Akademický rok:</b>	2023/2024
<b>Vysoká škola:</b>	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
<b>Ústav:</b>	12133 – Ústav strojírenské technologie
<b>Vedoucí ústavu:</b>	Doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Rozsah práce:</b>	76 stránek, 1 tabulka, 51 obrázků
<b>Klíčová slova:</b>	laser, pozink, plech, bezpečnost, zdroj

## Abstrakt:

Bakalářská práce se zabývá technologií ručního laserového svařování na tenkých pozinkovaných plechách. Teoretická část bakalářské práce se zabývá popisem laserových zdrojů, ochranných plynů, legislativy, bezpečnosti, dopadu pozinkování při svařování a prodejců ručních laserových zařízení. Praktická část bakalářské práce se zabývá třemi typy svarů – tupý, rohový a přeplátovaný. Mezi další provedené zkoušky se řadí korozní zkouška v umělé atmosféře, zkouška mikrotvrlosti dle Vickerse a tahová zkouška.

# Annotation

<b>Title of the final thesis:</b>	Laser welding of thin galvanized sheets
<b>Author:</b>	Karel Jan Kalčík
<b>Supervisor:</b>	Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE
<b>Consultant:</b>	
<b>Academic year:</b>	2023/2024
<b>University:</b>	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
<b>Department:</b>	12133 – Department of Manufacturing Technology
<b>Head of department:</b>	Doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Extent:</b>	76 pages, 1 table, 51 pictures
<b>Keywords:</b>	laser, zinc, sheet, safety, source

## **Abstract:**

The bachelor thesis deals with the technology of manual laser welding on thin galvanized sheets. The theoretical part of the bachelor thesis deals with the description of laser sources, shielding gases, legislation, safety, impact of galvanizing in welding and vendors of handheld laser equipment. The practical part of the bachelor thesis deals with the three types of welds - butt, corner and overlaid. Other tests carried out include corrosion test in artificial atmosphere, Vickers microhardness test and tensile test.



# Obsah

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE .....	13
2. OBECNÉ ČÁSTI RUČNÍCH LASEROVÝCH ZAŘÍZENÍ.....	14
2.1 Ruční laserové zdroje.....	15
2.1.1 Nd:YAG Laser .....	15
2.1.2 Diodový laser .....	16
2.1.3 Vláknový laser.....	18
2.2 Ochranné plyny v aplikaci laserového svařování .....	19
2.2.1 Argon .....	19
2.2.2 Helium .....	19
2.2.3 Dusík .....	19
2.2.4 Ceny a tlakové láhve plynů.....	20
2.2.5 Shrnutí plynů.....	20
3. LEGISLATIVA RUČNÍCH LASERŮ .....	21
3.1 Potenciální nebezpečí .....	21
3.1.1 Nebezpečné záření .....	22
3.1.2 Vznik požáru.....	22
3.1.3 Dýmy a mlhy.....	22
3.1.4 Úraz elektrickým proudem .....	22
3.2 Zdravotní následky .....	22
3.2.1 Poškození očí .....	22
3.2.2 Popáleniny .....	24
3.2.3 Poškození dýchacích cest .....	24
3.3 Bezpečnostní požadavky.....	25
3.3.1 Ochrana očí.....	25
3.3.2 Ochrana kůže .....	26

3.3.3	Ochrana dýchacích cest.....	26
3.3.4	Bezpečnost ručních laserových strojů .....	26
3.3.5	Bezpečnostní prostředí .....	27
4.	VLIV POZINKOVÁNÍ NA SVAŘOVÁNÍ .....	28
4.1	Žárové pozinkování .....	28
4.1.1	Žárové pozinkování ocelových pásů .....	28
4.2	Problémy pozinkovaných plechů při svařování.....	29
4.2.1	Odpařování zinku a jeho vliv.....	29
4.2.2	Odstranění zinkové vrstvy .....	31
4.2.3	Částečná změna typu svaru .....	31
4.2.4	Použití distančních podložek.....	31
4.2.5	Pulzní frekvence svařování.....	32
5.	PRODEJCI RUČNÍCH LASEROVÝCH STROJŮ.....	33
5.1	Celosvětoví prodejci.....	33
5.1.1	Fanuci Global Group (FGG) .....	33
5.1.2	HGTECH (Huagong Tech).....	34
5.1.3	HWIEIC .....	35
5.2	Výrobci ručních laserových zařízení v ČR.....	36
5.2.1	Narran Laser Precision.....	36
5.2.2	LaserTherm .....	36
6.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	38
6.1	Příprava vzorků .....	38
6.1.1	Příprava vzorků pro metalografickou analýzu .....	39
6.2	Svar na tupu .....	40
6.2.1	Svar na tupu bez „přežehlení“ .....	42
6.2.2	Svar na tupu s „přežehlením“ .....	43
6.2.3	Svar na tupu s dvojím „přežehlením“ .....	44

6.3	Přeplátovaný svar.....	46
6.3.1	Koutově přeplátovaný svar .....	50
6.4	Rohový svar .....	51
6.5	Korozní zkouška v umělé atmosféře – zkouška solnou mlhou .....	52
6.6	Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse HV0,1 .....	55
6.7	Tahová zkouška.....	58
7.	ZÁVĚR.....	61
	Bibliografie .....	65
	Seznam tabulek .....	70
	Seznam obrázků .....	71
	Přílohy .....	73
	Seznam příloh.....	76

## Seznam zkratek

zkratka	vysvětlení
TIG	Svařování elektrickým obloukem s netavitelnou elektrodou
$Y^3Al^5O^{12}$	Yttrium aluminium granátu
$Nd^{3+}$	Ionty neodymu
GaAs	Arsenid galia
GaN	Nitrid galia
UV	Ultrafialové záření
NIR	Blízké infračervené
MIR	Střední infračervené
$SiO_2$	Oxid křemičitý
$Yb^{3+}$	Itterbium
LBO	Lithium triborate
KTP	Potassium titanyl phosphate
DPI	Body na palec
Ar	Argon
He	Helium
$N_2$	Dusík

# 1. ÚVOD A CÍL PRÁCE

Ruční laserové svařování je jedna z mála, ne-li jedinou novodobou technologií, která vychází z robotické verze laserového svařování. Ruční laserové svařování představuje efektivní a inovativní metodu spojování různorodých materiálů. Po zásadní revoluci, která proběhla v prvním desetiletí 21. století, se metoda postupně začíná rozšiřovat z Asie do celého světa. Hlavní přednosti robotického laserového svařování, mezi které patří např. rychlost, stabilita nebo minimální deformace vneseným teplem u ručního laserového svařování, zůstávají. Ruční laser má v porovnání s klasickými metodami svařování lepší výsledky u svařování tenkých materiálů.

V době, kdy se výrobní podniky potýkají s narůstajícím tlakem na efektivitu a kvalitu výroby, je nezbytné zkoumat nové technologie – ruční laserové svařování jako potenciální klíčový prvek u zlepšení výroby.

Tato bakalářská práce si proto klade za cíl prozkoumat ruční laserové svařování v oblasti obecných částí ručních laserových strojů, legislativě spojené s bezpečností a technologií svařování tenkých pozinkovaných plechů. Bakalářská práce bude rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část se zaměří na obecné části ručních laserových zařízení s různými druhy laserových zdrojů a plynů. Další kapitola bude věnována legislativě, kde budou popsány bezpečnostní hrozby, ochranné pomůcky a zdravotní následky v případě nedodržení bezpečnostních stanovisek. Následuje kapitola, která bude popisovat dopad pozinkování při ručním laserovém svařování. Poslední kapitola teoretické části bude popisovat celosvětové i lokální výrobce ručních laserových strojů.

Praktická část bakalářské práce se věnuje ručnímu svařování tenkých pozinkovaných plechů. Pro experiment byly vybrány dva materiály, na kterých se zkoumaly tři typy svarů: tupý svar, rohový svar a přeplátovaný svar. Tyto svary byly podrobeny makroskopickému výbrusu s vyhodnocením. Cílem praktické části je dosáhnout svary třídy jakosti B, tedy té nejvyšší. Následují další zkoušky, mezi které patří mikrotvrdost, tahová zkouška nebo korozní zkouška v umělé atmosféře.

## 2. OBECNÉ ČÁSTI RUČNÍCH LASEROVÝCH ZAŘÍZENÍ

Mezi nejdůležitější část ručního laserové stroje je bezpochyby laserový zdroj. Jeho funkčnost přímo ovlivňuje finální podobu svárů a životnost stroje. U ručních svářecích strojů se objevuje jeden hlavní typ laserového zdroje, jedná se o pevnolátkové lasery. Využívané jsou hlavně díky své kompaktnosti, vysokému výkonu a rychlosti svařování.

K laserové interakci se svařovaným materiálem, je zapotřebí tzv. optická dutina, která obklopuje laser. Je vyrobena ze dvou zrcadel, kterým se liší odrazivost. Kvůli tomu i zrcadla fungují jako zesilovací prvek pro laserový paprsek. První ze dvou zrcadel odráží všechno světlo do dutiny, druhé zrcadlo umožňuje, aby mohl paprsek opustit dutinu. [1]

Dlouhodobé svařování bez chladících přestávek je zajištěno pomocí chladicího systému. Ruční laserové svařování je kompaktní a vyzařuje velké množství tepla do malého prostředí. Důležité je ochránit tenké součásti uvnitř stroje, aby nedocházelo k přehřívání součástí. Jsou dvě nepoužívanější chlazení, chlazení vzduchem a kapalinou. Nejpoužívanější je destilovaná voda, která je vhodná do teplot nad 0 °C. Dále se mohou přímo používat speciální chemické kapaliny či chladící vody. [1] [2]

K emitování energie je zapotřebí kvalitní zdroj napájení. Zdroj je hlavním prvkem ručních laserových strojů. Dochází zde k přeměně z elektrického proudu na laserový paprsek. Musí být zajištěna stálá hustota výkonu při svařování, jinak může dojít při jakékoli změně (i krátkodobé) k nevratnému poškození optik laseru.

Ke svařování je použita svařovací hlava. Skládá se ze třech hlavních částí. Zaostřovací čočka, ochranný plyn a ochranná tryska způsobují to, že je koncentrovaný laserový paprsek dodán do svařovaného spoje.

Systém dodávky plynu je součástí ručních laserových strojů. Umožňují bezpečný a hladký průběh svařování. Chrání oblast svařovací lázně i samotnou čočku proti rozstříku. Více o procesních plynech v kapitole 2.2. [1]

## 2.1 Ruční laserové zdroje

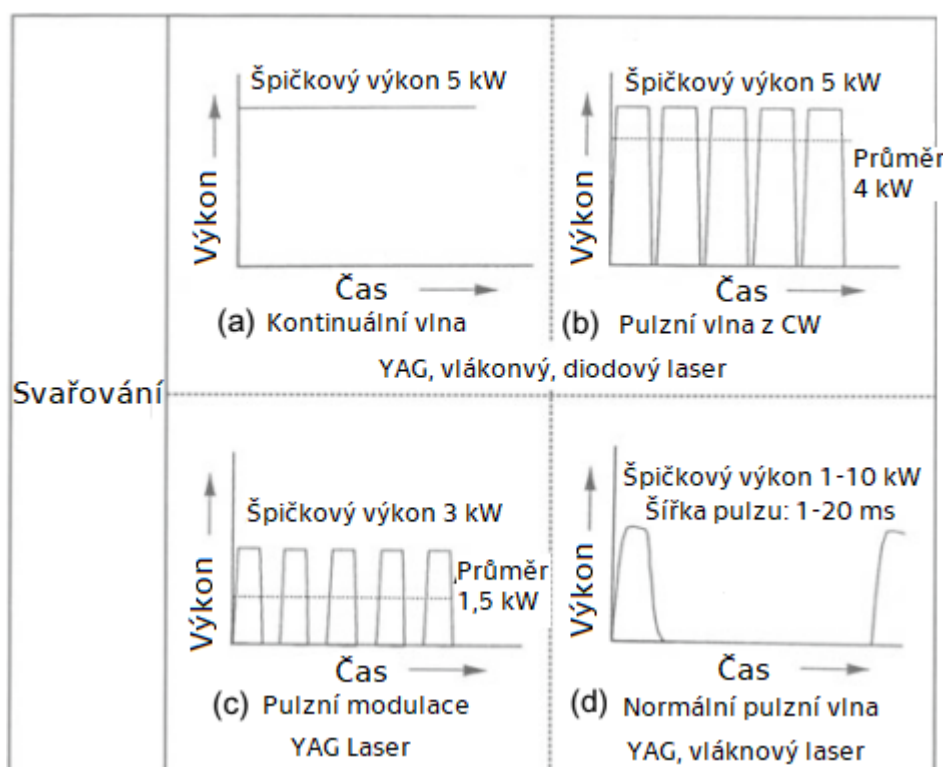
Laserové zdroje jsou jedny z důležitějších částí, proto si v této kapitole popíšeme jejich rozdělení, základní principy fungování, klady a zápory, které mohou nastat a ovlivnit svařování.

### 2.1.1 Nd:YAG Laser

Jedná se o typ pevnolátkového laseru, kde aktivní materiál zprostředkovává izotropní krystal  $Y_3Al_5O_{12}$ , který je sycený  $Nd^{3+}$ . [3]

Laser pracuje o vlnové délce 1064 nm. Nd:YAG zdroj má délku 100 – 150 mm na délku a průměr přibližně 10 mm. Je několik způsobů čerpání excitovaných fotonů, provádí se za pomoci oblouku lampy, zábleskové lampy nebo diodové lampy. Pro svařované díly se používá přímý optický systém nebo vláknový přenosový optický systém, viz obr. 2. Pro nízké ztráty při přenosu laserového paprsku se převážně užívá přenosu pružných vláken.

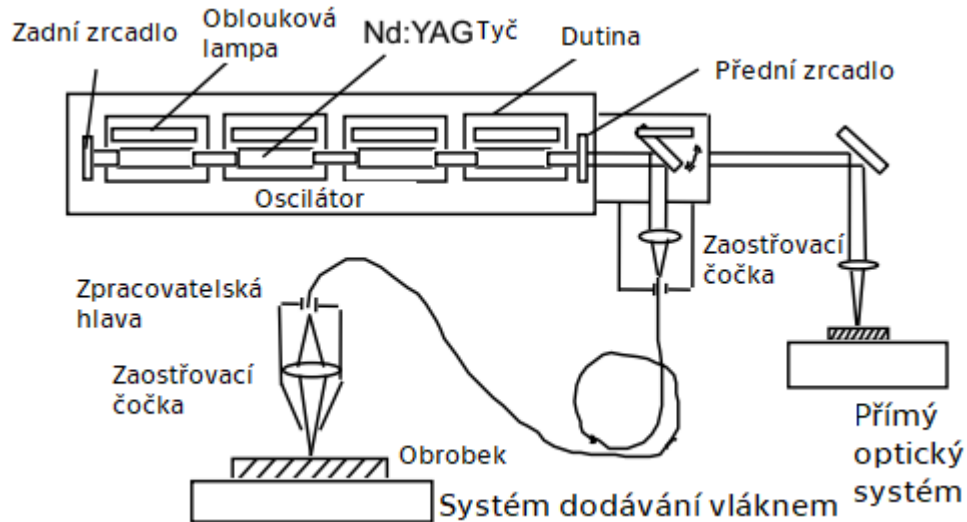
Nd:YAG laser může být provozován v různých režimech pulzní charakteristiky svařování, zobrazených na obr. 1.



Obr. 1- Pulzní charakteristika výkonu laseru [8]

Tento typ laserového zdroje je výhodný používat převážně pro tenké materiály, kde nabízí i vysokou rychlost zpracování svařovaných dílů. Jednoduchost je i v obsluze a údržbě. Laseru nabízí vysoké možnosti DPI a pořizovací cena je nižší než u jiných typů. Již od středních tloušťek materiálu je Nd:YAG laser nedostatečný, produkce svařování se stává pomalou a neefektivní. [4]

Nd:YAG lasery disponují širokou škálou výkonností. Výkony jsou od 0,25 W do 600 W. Pro chlazení se využívá vzduchové i vodní chlazení. Nízko výkonné lasery využívají chlazení vzduchem. Lasery s výkony od 50 W do 150 W mají možnost použít vzduchové nebo vodní chlazení. Od 150 W výše se již využívá vodní chlazení. [5]



Obr. 2 - Schéma Nd:YAG laseru [8]

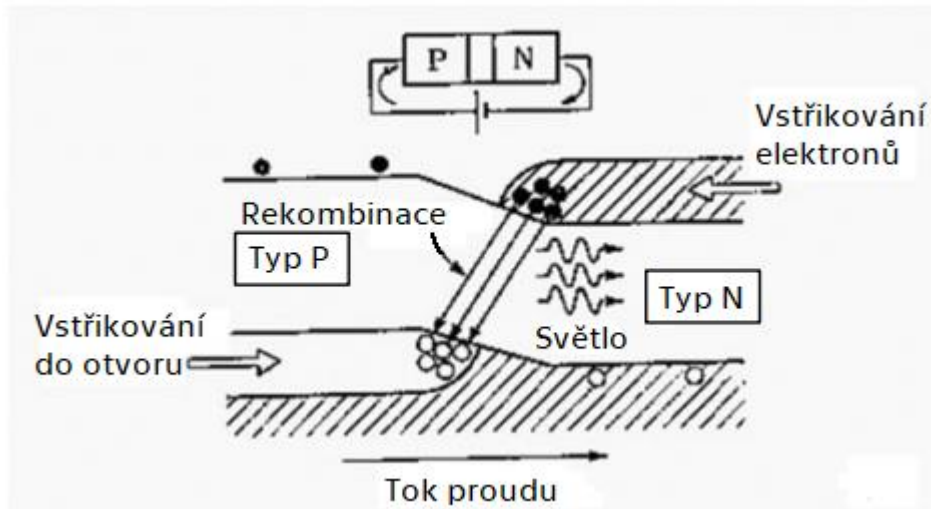
## 2.1.2 Diodový laser

Je kompaktní zařízení v pevné fázi, které generuje koherentní světlo z polovodičových materiálů, viz obr. 3. Lasery jsou konstruovány za užití materiálů jako GaAs nebo GaN. Jsou přizpůsobeny tak, aby mohly vyzařovat světlo v různých vlnových délkách, tedy od UV přes NIR až k MIR. Diodový laser dokáže pracovat v režimu kontinuální vlny či pulzního zářiče obdobně jako u Nd:YAG laseru, viz obr. 1.

Mezi hlavní přednosti diodového laseru patří jeho kompaktnost a možnost regulace vlnových délek s přesnou kontrolou výkonu laseru. Taktéž laser



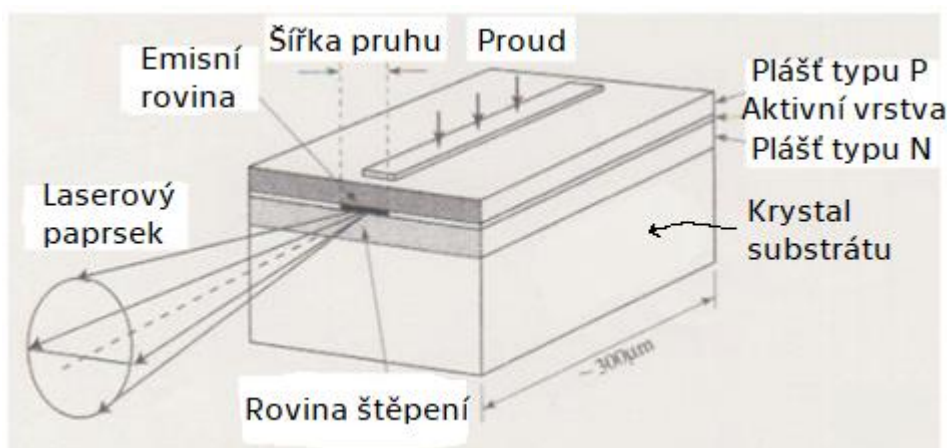
disponuje dlouhou životností, a vzhledem k rychlosti vývoji tohoto typu laseru došlo k dalším zlepšením výkonu, účinnosti či kvalitě paprsku. [6]



Obr. 3 - Mechanismus diodového laseru [8]

Diodový laser má několik nedokonalostí. Mezi ně patří například citlivost na kolísání teploty, kde je potřeba udržovat konstantní teplotu. Pořizovací cena je vyšší a výsledný výkon je nižší než u jiných typů laserů např. u vláknového. Divergence paprsků je větší v porovnání se srovnatelnými zařízeními – omezuje schopnost zaostření. [6]

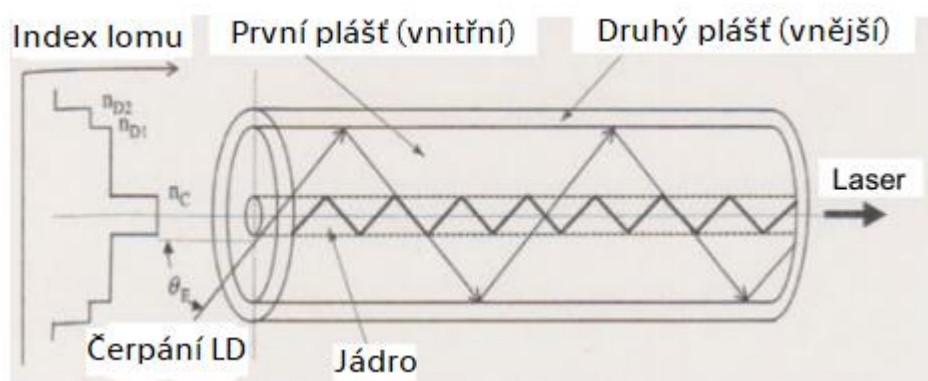
Výkonnosti u ručních diodových laserů jsou značně nižší než u vláknových laserů. Výkony se pohybují v rozmezích od 100 W do 150 W. Diodové lasery jsou chlazeny vzduchem. [7]



Obr. 4 - Ilustrace diodového zařízení [8]

### 2.1.3 Vlákno laser

Laser je vyzařován čerpáním laserové diody z vlákna, který má obvykle průměr v rozmezí 0,1 – 0,2 mm vyrobeného z vysoce čistého  $\text{SiO}_2$ .  $\text{SiO}_2$  je obvykle dopován prvkem  $\text{Yb}^{3+}$ . Vlnová délka se liší kvůli dopovanému prvku, u dopování ytterbiem je vlnová délka 1070 nm. U dopování erbiem je vlnová délka 1500 nm. Největší vlnovou délku, 2000 nm, má vlákno dopované thuliem. Lasery používající raman, mají možnost upravovat vlnové délky v rozmezí 1100 až 1700 nm. U laseru se využívá vlákno s dvojnásobným opláštěním, viz obr. 5. [8] [9] [10]



Obr. 5 - Dvouplášťová vrstva pro vláknový laser [8]

Vlákno obsahuje jak zrcadlo s úplným odrazem, tak i zrcadlo s částečným odrazem, díky tomu není potřeba nastavovat laserový paprsek, a proto je obsluha snadná. Právě jednoduchost celého zařízení je výhodná pro zaškolení personálu. Jedná se o kompaktní stroj, které se hodí do malých prostor ve výrobě. Jde svařovat širokou paletu různorodých materiálů, od obyčejné konstrukční oceli po nerez, titan, hliník a měď. Vláknové lasery patří mezi vysoce efektivní lasery s vyhovujícím poměrem cena/výkon a nízkými provozními náklady. [11]

Použitelné výkony jsou u vláknových laserů v rozmezí od 500 W do 3 000 W. Pro chlazení se využívají 2 způsoby – chlazení vzduchem a chlazení vodou. Vzduchem chlazené lasery se využívají na méně výkonných laserech. Pomyslná hranice přechodu na vodní chlazení je 1 500 W. [12]

## 2.2 Ochranné plyny v aplikaci laserového svařování

Používají se pro ochranu svařované lázně. Inertní plyny zabraňují okolní atmosféře vnášet vzdušnou vlhkost do svarové lázně. Vlhkost způsobuje vznik pórovitosti, popřípadě trhlin ve svarovém spoji. Inertní plyny chrání i čočky ve svařovací hlavě. Mezi nejpoužívanější ochranné plyny patří Ar a He, méně používaným je N<sub>2</sub>. [13]

### 2.2.1 Argon

Patří mezi jednoatomové plyny. Jedná se o inertní plyn, který je těžší než vzduch. Měrná hmotnost argonu je 1,67 kg.m<sup>-3</sup>. Hustota vzduchu je oproti argonu při stejných podmínkách pouze 1,22 kg.m<sup>-3</sup>. Právě větší hmotnost napomáhá při klesání ke svařovací lázni. Běžně nastavujeme průtok při svařování okolo 20 litrů za minutu pro ideální ochranu. Argon patří mezi náchylné plyny k ionizaci a při určité hustotě vznášené energie je možné, že dojde ke vzniku plynového plazmatu tzn. Ionizovaný ochranný plyn. [13] [14] [15]

### 2.2.2 Helium

Obdobně jako argon patří helium mezi jednoatomový inertní plyn. Měrná hmotnost plynu 0,179 kg.m<sup>-3</sup>. Malá hmotnost helia je bohužel negativní vlastnost, díky které plyn stoupá vzhůru a snižuje tak ochranu svarové lázně. Je možné ji odstranit zvýšením průtoku plynu k hodnotě 35 litrů za minutu. U helia dochází k minimální ionizaci ochranného plynu a díky tomu nedochází k tvorbě plynového plazmatu. Helium samo o sobě zvyšuje přenos výkonu do svařovaného materiálu, tím dochází k větší hloubce závaru. [13] [14] [15]

### 2.2.3 Dusík

Jedná se o molekulu, kde plyn nejdříve disociuje, následně na povrchu zpětně rekombinuje. Hlavní výhodou rekombinace je větší tepelná vodivost a tím i dosažení většího tepla ve svarové lázni. Větší teplo zapříčiňuje lepší svařování vysoce tepelně vodivých materiálů. Na druhou stranu Dusík ve svarové lázni u ocelí vytváří nežádoucí nitridy, které zvyšují křehkost svaru, a tím snižují houževnatost. Proto jako ochranný plyn není pro svařování pozinkovaných plechů ideální. [14] [16]

## 2.2.4 Ceny a tlakové láhve plynů

Velikost lahví se odvíjí od požadavků zákazníků. Nejpoužívanější jsou 20, 30 a 50 litrové nádoby.

Pro označování tlakových lahví se používají různorodé barvy. Každý prvek má jinou barvu hrdla kvůli rozeznatelnosti. Argon je označován tmavě zelenou barvou, helium hnědou barvou a dusík barvou černou. [17]

Pro lepší manipulaci a cenovou výhodu lahví se pro ruční laserové svařování vyplatí používat láhve o objemu 50 l/200 bar. Ceny lahví se u každého plynu liší. U argonu je cena okolo 8 000 Kč za láhev. Helium je podstatně dražší až 64 000 Kč. Nejlevnější je lahev dusíku, která je pouze 5 000 Kč. [18]

## 2.2.5 Shrnutí plynů

Dusík je pro aplikaci na pozinkované plechy nevhodný, proto nebude porovnáván s argonem a heliem. Jednoznačně je argon cenově výhodnější než helium. Pro sériovou výrobu se vyplatí používat právě argon. Pro vědecké výzkumy či speciální zakázky se používá helium kvůli hloubce průvaru. V rámci mechanických vlastností svařenců jsou rozdíly zanedbatelné. [15]

### 3. LEGISLATIVA RUČNÍCH LASERŮ

Svařování je proces, při němž dochází k vytvoření trvalého a nerozebíratelného spoje dvou i více součástí. Ke svařování je zapotřebí způsobilý personál pro svařování, plánování a kontrola svářečské výroby. Svářeči a svářečský operátoři jsou vždy kvalifikováni odpovídajícími zkouškami pro klasické metody svařování. Zkoušky jsou rozděleny do několika proměnných sektorů. Metoda svařování určuje, pro jaký daný typ svařování bude svářeč proškolen. Dále jsou dva typy svařovaného výrobku, plech nebo trubka. U každého typu svařovaného výrobku záleží, jaký typ svaru bude svářeč vařit. Jedná se o tupý nebo koutový svár. Mezi další sektory patří skupina přídavného materiálu, typ přídavného materiálu, rozměry zkušební vzorku, poloha svařování a detaily provedení svarů. Svářeči a svářečský operátoři jsou oprávněni provozovat pouze takové svařování, které odpovídá jejich kvalifikaci. [19] [20]

Ruční laserové svařování vzniklo z robotického laserového svařování. Pro ruční laserové svařování již existují staré normy, které ovšem v dnešní době nevyhovují standardům z bezpečnosti. Ruční laserové svařování patří do skupiny třídy 4. Jedná se o třídu s největší výkoností pro ruční laserové stroje, kde nároky na bezpečnost jsou nejrozsáhlejší. V rámci legislativy se již nejedná o robotické laserové svařování. Proto je potřeba, aby svářeč svařovací na ruční laserové svářečce disponoval kvalifikační zkouškou obdobně jako u klasických metod. V této kapitole za pomoci novější normy – EN ISO 11 553-2 budou uvedeny základní informace, které jsou pro bezpečnost ručního laserového zařízení nezbytné. V průběhu kapitol bude popsán potenciální nebezpečí spojené s následky, které mohou vzniknout při ručním laserovém svařování. V závěrečné části kapitoly jsou uvedeny bezpečnostní požadavky pro výrobu. [19] [20] [21]

#### 3.1 Potenciální nebezpečí

Každý typ ručního svařování obsahuje určité potenciální nebezpečí a laserové ruční svařování není výjimkou. Nároky na bezpečnost jsou oproti jinému typu svařování podstatně náročnější. Následují hlavní možnosti nebezpečí, které mohou nastat při svařování ručním laserem.

### **3.1.1 Nebezpečné záření**

Při svařování dochází ke vzniku viditelného i neviditelného záření. Při interakci záření s materiálem dochází ke vzniku vysoké úrovně nebezpečného záření. Právě toto záření se rozšiřuje do pracovního prostoru a může rychle způsobovat trvalé poškození očí nebo kůže.

### **3.1.2 Vznik požáru**

Laserový paprsek vyzařovaný s velmi vysokou energií a malou velikostí zaměřeného bodu může způsobit zažehnutí požáru v případě zasažení hořlavého materiálu. Jedná se jak o přímý zasažení, tak i o odražené paprsky záření.

### **3.1.3 Dýmy a mlhy**

Lasery sami o sobě dobře odpařují kovy. Při odpařování vznikají výpary a mlhy, které jsou převážně neviditelné a představují zásadní nebezpečí pro dýchací cesty.

### **3.1.4 Úraz elektrickým proudem**

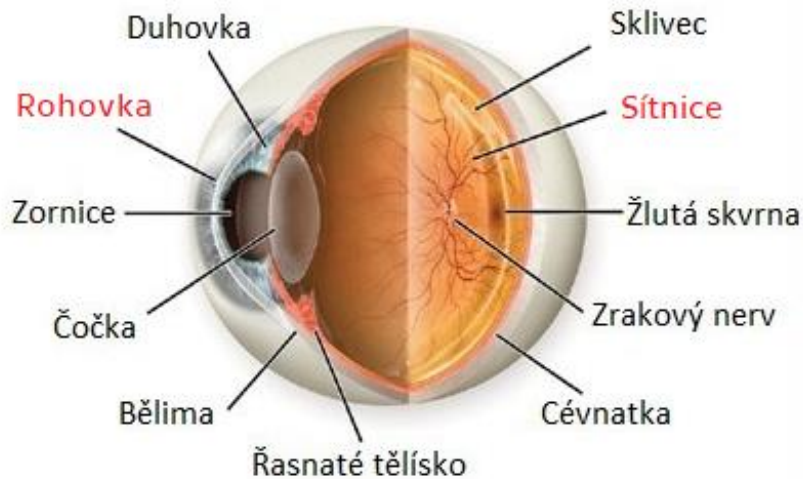
Každý ruční svářecí stroj pracuje s velkými elektrickými výkony. Je potřeba dodržovat předem stanovené bezpečnostní omezení, převážně vydané výrobcem, aby nedošlo k případným zraněním elektrickým proudem. [22]

## **3.2 Zdravotní následky**

U každé pracovní činnosti je nutné dbát takových opatření, aby nedošlo k částečným či trvalým následkům. Tato kapitola popisuje zdravotní následky, které mohou nastat při zanedbání zásad bezpečnosti práce.

### **3.2.1 Poškození očí**

Přímé i odražené záření během svařování může způsobit trvalé poranění sítnice nebo rohovky, viz obr. 6., které vede k trvalému poškození oka a jeho funkčnosti vidění.



Obr. 6 – Zobrazení oka [38]

Pro oči je škodlivý tepelný faktor laseru, díky kterému může nastat částečné oslepnutí. Každá vlnová délka, od ultrafialové po infračervenou má svoje specifické poškození očí, viz obr. 7.

Spektrální oblast	Oko
Ultrafialová C (180 nm až 280 nm)	Zánět rohovky
Ultrafialová B (280 nm až 315 nm)	
Ultrafialová A (315 nm až 400 nm)	Fotochemický šedý zákal
Viditelná (400 nm až 780 nm)	Fotochemické a tepelné poškození sítnice
Infračervená A (780 nm až 1 400 nm)	Šedý zákal, spálení sítnice
Infračervená B (1,4 $\mu\text{m}$ až 3,0 $\mu\text{m}$ )	Zkalení rohovky, šedý zákal, spálení rohovky
Infračervená C (3,0 $\mu\text{m}$ až 1 mm)	Jen spálení rohovky

Obr. 7 – Patologické vlivy na oko [39]

V nejhorších případech může dojít k poškození sítnice, kde paprsky přímé nebo odražené vytvoří na sítnici otok nebo jizvu. Zde dojde k částečné ztrátě vidění, která se projevuje mnoha způsoby. Ztrátou vidění na blízko, úplná ztráta ostrosti vidění nebo nemožnost rozlišovat jemné tvary a předměty. U poškození rohovky dochází k ostré bolesti za očima, pocitu cizího tělesa v oku, slzení, zhoršení zraku – kvůli zakalení rohovky, případně i světloplachost. Při včasném neléčení může dojít k trvalé ztrátě zraku. [23] [24] [25]

### 3.2.2 Popáleniny

Poškození kůže způsobují pouze lasery třídy 4, kde záleží na energii laserů. K poškození pokožky může dojít dvěma způsoby, přímým soustředěním pokožky do ohniska paprsku nebo přejetí pokožkou v laserovém paprsku. Pod viditelným spektrem dochází pouze k opálení pokožky s viditelným zrychlením stárnutí pokožky. Od viditelného spektra do infračerveného spektra dochází převážně ke ztmavnutí pigmentu pokožky, fotosenzitivní reakci a spálení pokožky. Od infračerveného spektra víš dochází pouze ke spálení pokožky viz obr. 8. [26]

Nefokusovaný, 1600-W, 1030-nm laser



Obr. 8 – Zobrazení přejetí prstu v paprsku laseru [26]

### 3.2.3 Poškození dýchacích cest

Při svařování dochází k uvolňování dýmů, zplodin a aerosolů, které na sebe navážou různé nečistoty ze svařovaného materiálu. Jedná o nečistoty jako barvy, oleje, čisticí prostředky dokonce i plyn, který se používá při svařování. Může dojít k podráždění očí, kůže, ale hlavně dýchacích cest. Problémy se mohou dostavit okamžitě, ale také po mnoha letech. Každý svařovaný materiál vyvolává jiné symptomy. [27]

Zinkové zplodiny ze svařování se nemají vůbec vdechovat. Vdechnutím zinkových zplodin se může vyvolat horečka tzv. zinkový zápal. Mezi hlavní symptomy, které se zpravidla objevují několik hodin po vystavení těchto spalin jsou únava, slabost, pocit sucha v nose a v krku, bolest svalů a kloubů, horečka, kovová chuť v ústech, třes a nechutenství. [27]



Mezi více nebezpečné materiály se řadí například berylium, kde vdechované složky jsou vysoce toxické, které tvoří nevratné změny na plicích – berylium je považován za karcinogenní prvek. U olova může dojít k otravě olovem, při dlouhodobém vdechování i ke smrti. Chrom je specifický tím, že některé jeho formy tvoří rakovinu dýchacích cest. [27]

### 3.3 Bezpečnostní požadavky

Pro bezpečný provoz je zapotřebí dodržovat bezpečností ustanovení vydané normou EN ISO 11 553-2. Tato norma popisuje základní bezpečnostní ochranné pomůcky a zabezpečení ručních laserových strojů. [21]

#### 3.3.1 Ochrana očí

Při práci s ručním laserovým strojem je zapotřebí dbát na kvalitní ochranu očí, zde již nestačí obyčejné svařovací kukly používané pro klasické svařování. Každý typ laserového zdroje má jinou vlnovou délku svého emitovaného záření. Proto je potřeba přesně znát emitovanou vlnovou délku laseru a k tomu přizpůsobit ochranné brýle nebo ochrannou kuklu, viz obr. 9. Certifikované brýle mají označení viditelné na těle brýlí nebo na sklíčku. [21] [28]



Obr. 9 – Ochranné brýle – vlnové délky 650-1100 nm [40] a ochranná kukla – vlnové délky 915-1180 nm [41]

### **3.3.2 Ochrana kůže**

Kůže musí být zakryta ochrannými pomůckami. Prvotně se jedná o ohnivzdorné rukavice, které přichází nejbližší do kontaktu se svařováním. Následně je potřeba dbát na ochranu zbytku odkryté pokožky. Nejlépe je používat dlouhé zapnuté rukávy, ochranné obleky, kožené zástěry případně čepice na ochranu odkrytých částí hlavy. Dále se musí při nošení brýlí stále využít klasická ochranná kukla pro bezpečnost proti emitovaným paprskům, rozstříkům nebo jiskrám. [21] [28]

### **3.3.3 Ochrana dýchacích cest**

Svařování musí probíhat v dobře odvětrávaném pracovním prostoru, aby nedošlo ke vdechování výparů. Odvětrávání zajišťuje systém odsávání výparů, který je vhodný umístit u svařovaných dílů. Pro lepší ochranu svářeče je možné použít přímo filtračně-ventilační jednotku, pod kterou stále musí být ochranné brýle pro správnou vlnovou délku. Jako doplněk je možné použít ventilační jednotku v pracovním prostoru, která čistí nasávaný vzduch. [21] [28]

### **3.3.4 Bezpečnost ručních laserových strojů**

U každého ručního laserového stroje musí být obsažen viditelný indikátor připravenosti laseru. Samotný indikátor musí být umístěn tak, aby byl v zorném poli svářeče. Dále musí mít každé ruční laserové zařízení optické či akustické indikační zařízení, které detekuje spuštěné laserové záření. Obě výstražné zařízení musí být jasně viditelná i při použití ochrany očí.

V případě, že ruční svařovací laser obsahuje zaměřovací laser, výkon zaměřovacího paprsku nesmí překročit hodnoty pro laser třídy 2.

Důležitou součástí je nouzové tlačítko zastavení. Tlačítko musí být ve tvaru červeného tlačítka a musí být snadno a rychle dostupný v bezprostřední blízkosti dosahu svářeče. Takové nouzové tlačítko musí zajišťovat deaktivaci generování laseru a automaticky zabránit vyzařování laseru. Dále musí přímo deaktivovat ruční laserové zařízení – tedy přímo odpojit od pohonu napájení a v určených časových limitech také uzavřít přívod plynů.

V případě, že je svařovací hlava umístěna více než 2 metry od laserového zařízení prostřednictvím systému dodávání paprsku a případný přístup k ovládacím prvkům není lehce přístupný, je zapotřebí, aby bezpečnostní prvky

byly obsaženy na těle svařovací hlavy. V případě, že to není proveditelné je alternativně možné použít bezpečnostní jednotku umístěnou v těsné blízkosti svářeče, tedy buď v jeho dosahu při svařování nebo upevněním jednotky k tělu svářeče. [21]

### **3.3.5 Bezpečnostní prostředí**

Jedná se o uzavřenou místnost převážně nazývanou laserem řízená oblast, která chrání veškerý ostatní personál před nepřímým a přímým zářením. Vstup do místnosti musí být kontrolován dveřními zámky připojenými k ovládacím prvkům ručního laserového stroje, aby v případě otevření dveří došlo k okamžitému zastavení stroje a vyzařovaného laserového záření.

Je potřeba zajistit vhodné zábrany proti šíření laserových paprsků z místnosti. To znamená, že v případě jakýchkoli oken je potřeba použít bezpečnostní materiál, který odolá přímým a nepřímým paprskům. V okolí uzavřené místnosti by měly být výstražné značky, převážně a vstupů a výstupů. Dále je nutné upozornit obsluhu, že při vstupu do kontrolované oblasti existuje významné nebezpečí pro poškození zraku.

Měl by být jmenován pracovník pro bezpečnost laseru, který se bude starat o bezpečnost a její dodržování. [21] [28]

## 4. VLIV POZINKOVÁNÍ NA SVAŘOVÁNÍ

Jsou dva hlavní způsoby výroby pozinkovaných plechů. Jedná se o elektrogalvanické a žárové zinkování. Převážně se ale používá žárové zinkování z několika zásadních důvodů. Žárové zinkování dokáže vytvořit silné rovnoměrné vrstvy zinku, které mají dobrou odolnost proti korozi. Výrobní náklady jsou menší než u elektrogalvanického pozinkování. Zároveň galvanizované plechy mají horší vlastnosti v případě radiační ochrany, odvodu tepla a odolnosti proti oxidaci. Proto se tato kapitola bude zabývat pouze plechy, které jsou žárově pozinkované. [29] [30]

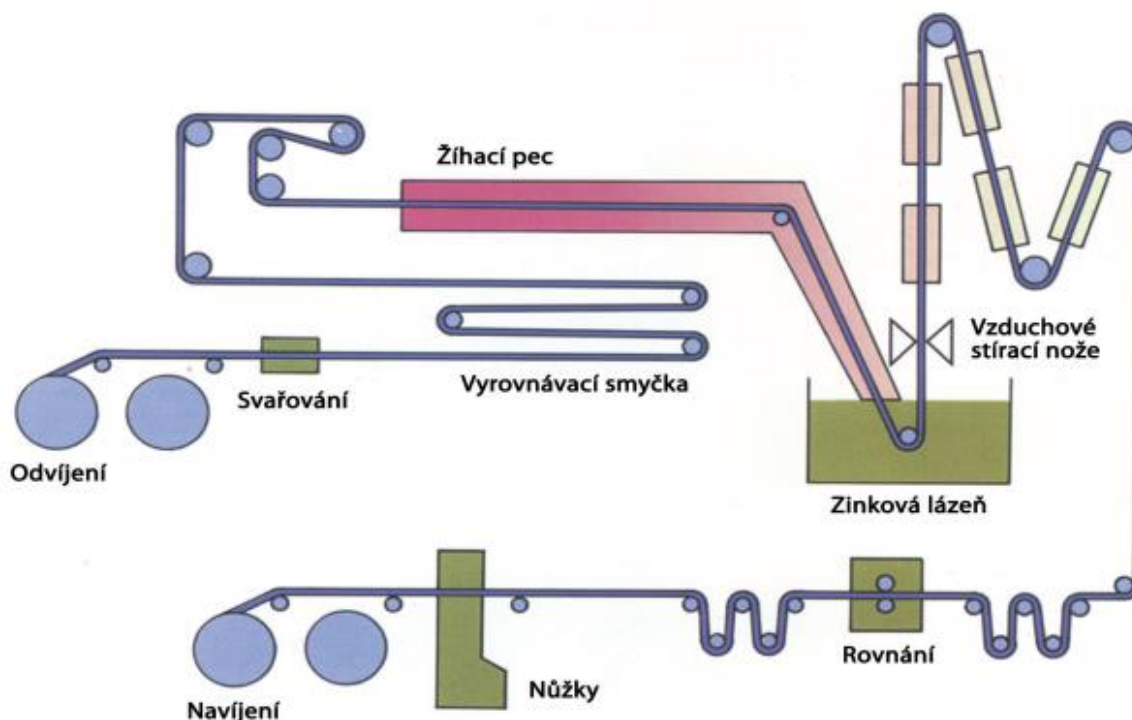
### 4.1 Žárové pozinkování

V roce 1741 francouzský chemik Malouin pochopil, že zinek dokáže ochránit ocel před korozi. V roce 1837 došlo k prvnímu patentu žárového zinkování od dalšího Francouze Sorela, který pro tavidlo použil chlorid amonný. [31]

#### 4.1.1 Žárové pozinkování ocelových pásů

Tenké plechy se žárově zinkují v uzavřeném systému kontinuálních zařízení. Vstupním materiálem je za studena válcovaný tenký plech, který je skladován ve svitcích. Tyto svitky se svařují k sobě, aby vznikl tzv. nekonečný pás pro následné zinkování.

Pás se nejdříve moří nebo oxiduje. Pak následuje redukce povrchu při 950 °C, při které se pás zbaví oxidů. Souběžně dochází k žíhání a v důsledku toho ke změkčení oceli. Poté je povrch pásu čistý a pod ochranou atmosférou vstupuje přímo do zinkovací lázně, viz obr. 10. Po pár sekundách v lázni vystupuje pás kolmo vzhůru a táhne se přes několik vzduchových stíracích nožů. Tyto vzduchové nože jemným proudem vzduchu stírají přebytečnou zinkovou vrstvu na požadovanou tloušťku.



Obr. 10 – Schéma kontinuálního žárového zinkování plechů [31]

Následně pás pokračuje přes sekce chlazení, rovnání a úpravy, ve které dochází k ochraně pozinkovaného pásu proti vzniku bílé rzi. Po těchto procesech následuje plech na stříhání s využitím formátovacích nůžek, kde se pás přímo stříhá na požadovaný formát, popřípadě se pás navíjí přímo na svitky. [31]

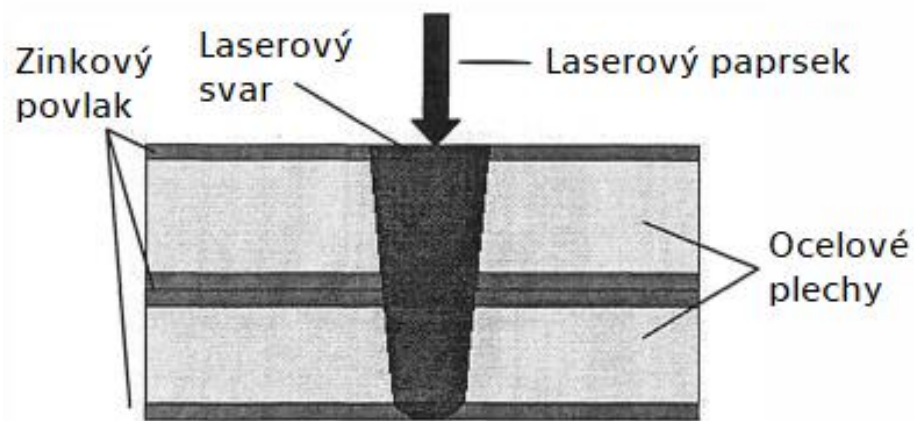
## 4.2 Problémy pozinkovaných plechů při svařování

Důležitým faktorem při ručním laserovém svařování pozinkovaných plechů jsou teploty tavení u oceli a teplota varu zinku. Teplota tavení oceli je cca 1530 °C napříč tomu teplota varu zinku a následné odpaření jsou podstatně nižší. Teplota odpařování zinku se pohybuje okolo 906 °C. Tyto rozdílné teploty zapříčiňují, že vzniká zinková pára, která má mnohem větší objem než původní vrstva. Tento negativní efekt ovlivňuje samotné svařování, a proto se mu samostatně věnuje tato kapitola. [30]

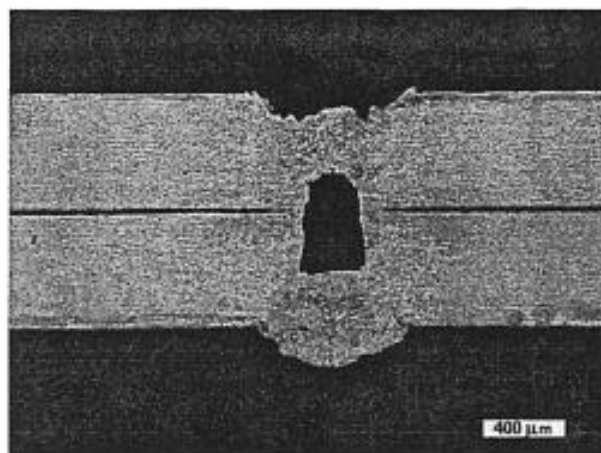
### 4.2.1 Odpařování zinku a jeho vliv

Vliv odpařování zinku je nejvíce patrný při svařování pozinkovaných plechů na způsob přeplátování, viz obr. 11. Pokud se podaří vyprodukovanou zinkovou párou uvolnit z místa svaru (svarové lázně), nebudou nastávat problémy

s pórovitostí. Jakmile množství vyprodukovaných zinkových par bude větší, než se dokáže uvolnit, mohou vznikat vnitřní tlaky, které mohou vést k nestabilní svarové lázni, případně ke vznikům velkých pórů a drsnému povrchu, viz obr. 12. V krajním případě může dojít k vypuzení svarové lázně. Tím vznikne přerušovaný spoj se silnými rozstříky. [30]



Obr. 11 – Schéma svařování přeplátováním [30]



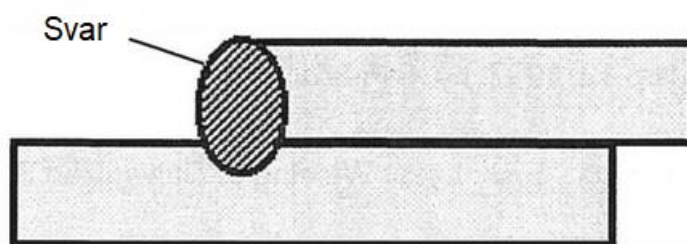
Obr. 12 – Pórovitost bez odstranění zinkové vrstvy [30]

## 4.2.2 Odstranění zinkové vrstvy

Tyto negativní efekty odpařování zinkové vrstvy lze odstranit dvěma způsoby. Prvním způsobem je laserové odstranění zinku z povrchu. Lze to provést přímo funkcí ručního laserového svařovacího stroje, který dokáže očistit oblast spoje před svařováním. Dále lze odstranit pozinkovanou vrstvu mechanicky, např. broušením. U této metody je potřeba odebrat pouze pozinkovanou vrstvu bez zásahu do struktury oceli. [30]

## 4.2.3 Částečná změna typu svaru

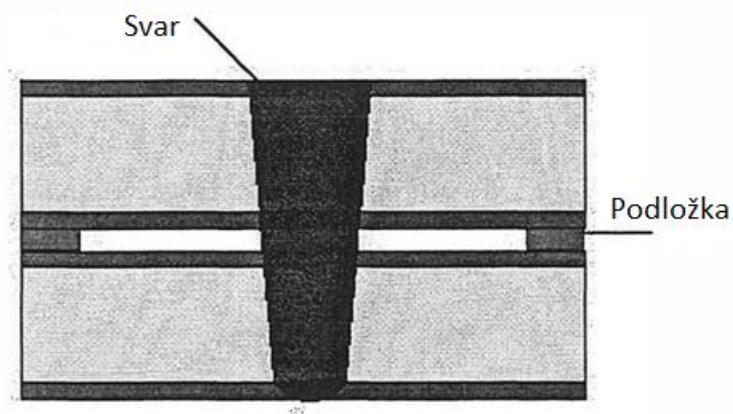
Alternativou pro přeplátovaný svar je použití koutového přeplátovaného svaru viz obr. 13. Plechy jsou orientovány stejně jako u přeplátovaného svaru, tedy poleženy na sebe. Samotné svařování probíhá obdobně jako u přeplátovaného svaru s tím rozdílem, že svarová lázeň je na okraji horního plechu. Odpařený zinek má lepší možnosti úniku. Svarová lázeň je méně ovlivňována zinkovou párou než v případě obyčejného přeplátovaného svaru. [30]



Obr. 13 – Schéma koutového přeplátovaného svaru [30]

## 4.2.4 Použití distančních podložek

Vytvořením distanční mezery se umožní zinkovým parám k úniku prostorem mezi svařovanými plechy viz obr. 14. Zinková pára pak nebude mít tendenci procházet svarovou lázní v oblasti horního materiálu. Díky tomu nebude docházet k silným rozstříkům ze svarové lázně. Mezery mezi plechy jsou obvykle v rozmezí od 0,1 mm do 0,2 mm. U laserového svařování jsou mezery mezi svařovanými plechy nežádoucí, vedou ke snížení mechanických vlastností svařovaného spoje. Tyto malé mezery mezi přeplátovanými plechy však nemají zásadní vliv na svar. [30]



Obr. 14 – Schéma přepřátovaného svaru za užití distančních podložek [30]

#### 4.2.5 Pulzní frekvence svařování

Malé množství zinkové páry unikne během každého laserového pulsu. Uniká skrz svarovou lázeň, a to již při téměř nulovém výkonu laseru. Nevytvoří se tak vysoký tlak, který by svarovou lázeň rozstříkoval do okolí. Každá tloušťka materiálu, rozdílná vrstva pozinkované vrstvy nebo rychlost svařování ovlivňuje optimální frekvenci pulzů. Při svařování dochází k malým změnám parametrů, které se velmi obtížně kontrolují. [32]



## 5. PRODEJCI RUČNÍCH LASEROVÝCH STROJŮ

Ruční laserové stroje se prvotně dostaly do povědomí začátkem 21. století. Postupným vylepšováním technologie se ruční laserové svářečky začínají více uplatňovat ve výrobních provozech. Zásadní podíl na vývoj a vylepšení měli výrobci z Asie. Posledních pár let se do vývoje vlastních ručních laserových strojů zapojilo několik firem, které posunuly hranici na vyšší úroveň. Jednak u samotné technologie ručního laserového svařování, tak i v oblasti bezpečnosti.

### 5.1 Celosvětoví prodejci

Na světě se již vyskytuje mnoho výrobců ručních laserových strojů. Velké společnosti rozšiřují svojí marketingovou síť do všech koutů celého světa, proto působí i v Evropě/ČR. Tyto významné společnosti zde budou představeny.

#### 5.1.1 Fanuci Global Group (FGG)

Společnost Fanuci se zaměřuje na pokročilé svařování a čištění ručními laserovými stroji. Během několikaletého vývoje vláknových laserů se společnosti podařilo dosáhnout více jak 20 patentů, které poskytují smysluplná vylepšení. Všechny hlavní komponenty si Fanuci vyvinula a zároveň patentovala. V roce 2023 se Fanuci transformovala na Fanuci Global Group. Své pobočky má na třech kontinentech. V Asii se jedná o Čínu, v Evropě je pobočka v Polsku a poslední je v Americe. Vyráběné produkty jsou s vláknovým zdrojem a jsou označovány FANUCI, ULTRON a FANULT. Každý produkt je vyráběn dle specifikací požadavků každého regionu. Výkony ručních laserových strojů začínají od 1000 W a končí u 3000 W. Zároveň Fanuci nabízí ochranné pomůcky pro svářeče. [33]



Obr. 15 – Fanuc 4.0 PRO Portable Laser Welding Machine [33]

### 5.1.2 HGTECH (Huagong Tech)

Jeden z největších dodavatelů laserových zařízení v Číně. HGTECH používá vlastní technologická výzkumná centra. Spolupracuje s univerzitou Huazhong, která se zabývá vědou a technikou. HGTECH byla založena v roce 1977. Hlavní produkty pokrývají výrobu od řezání laserem, svařování laserem až po čištění nebo značkování laserem. S rostoucím podílem na mezinárodním trhu se rozšiřují i marketingová síť. Své vlastní zástupce má HGTECH již v několika státech po celém světě. Patří mezi ně Tchaj-wan, Velká Británie, Německo, Polsko, Maďarsko, USA, Argentina a mnoho dalších.

HGTECH nabízí bezplatnou instalaci zařízení, proškolení personálu a uvedení do provozu. Na stroje se poskytuje roční záruka a celoživotní údržba. Náhradní díly mimo opotřebovaných nabízí HGTECH zdarma po dobu záruky. Update softwaru je zdarma a taktéž celoživotní. Ruční laserové svářečky jsou nabízeny ve třech výkonnostních variantách s vláknovým zdrojem. Počínaje výkonem 500 W, 750 W až 1000 W. [34]



Obr. 16 – Handheld CNC Fiber Laser Welding Machine [34]

### 5.1.3 HWIEIC

Čínská společnost je přidružená k Insup Group. HWIEIC se zabývá výrobou a prodejem zařízení na řezání a svařování. Přidružením k Insup Group získala pokročilou technologii, kterou zužitkovala k výrobě svých vlastních produktů. Ruční laserová svářečka je označována v kategorii HS Series. Výkony jsou podobné jako u konkurence, tedy od 1000 W do 3000 W. Ruční laserová svářečka kombinuje svařování, řezání a čištění. HWIEIC nabízí laserové zdroje od 4 hlavních výrobců. Jedná se o Raycus, Reci, Max a IPG, záleží na požadavcích zákazníka. [35]



Obr. 17 – HS Series [35]

HWIEIC zajišťuje tříletou záruku na celý stroj a dvouletou záruku pro stroje s lasery do 6 kW. Aktualizace softwaru laserového stroje je bezplatná a sama firma zajišťuje celoživotní údržbu. [35]

## 5.2 Výrobci ručních laserových zařízení v ČR

V České republice je několik firem, které se zabývají vlastním návrhem a výrobou ručních laserových zařízení.

### 5.2.1 Narran Laser Precision

Česká firma založená v roce 2013. Narran vyvíjí a zároveň vyrábí vlastní laserové systémy. Zajišťuje nejen před záruční a pozáruční servis strojů, ale i ochranné pomůcky. Zároveň zajišťuje pravidelné školení v oblasti bezpečnosti na laserových strojích.

Narran nabízí ruční laserový svařovací stroj pod názvem CHORS. Vhodné aplikace pro tento stroj je čištění a svařování na kovových materiálech. Průměrný výkon je 1500 W. [36]



Obr. 18 – Ruční laserové svářečka CHORS [36]

### 5.2.2 LaserTherm

LaserTherm s.r.o. je ryze česká firma založena v roce 2010. Zabývá se využitím laserové technologie v průmyslu. Ruční laserový stroj pro ruční svařování se nazývá Larisa. Jedná se o vláknový laser s výkonem 1500 W. Stroj nabízí možnost svařování, laserového čištění a řezání. LaserTherm společně

s technologií poskytuje servisní podporu a nezbytné školení k obsluze. Výběr ochranných pomůcek a následné školení z bezpečnosti provádí LaserTherm individuálně u každého zákazníka. [37]



*Obr. 19 – Ruční laserová svářečka LARISA [42]*

## 6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V bakalářské práci byly využity poznatky společnosti LaserTherm s.r.o. Cílem bakalářské práce bylo tyto poznatky odzkoušet a výsledky analýz prokázat jednak správnost nastavených parametrů a dále určit okrajové podmínky využitelnosti. S ohledem na komercializaci výsledků a komerční prostředí nelze v bakalářské práci uvádět konkrétní parametry svařování. Pro potřeby posouzení a případnou další optimalizaci bylo i v rámci výstupů bakalářské práce s těmito parametry pracováno, ale nemohou být v práci konkretizovány.

Experiment navazuje na získané teoretické znalosti v oblasti svařování pozinkovaných plechů a je jejich problematice. Převážně u přeplátovaných plechů, kde je odpařování zinku nejkritičtější. Cílem bylo dosáhnout kvality svarů třídy jakosti B dle ČSN EN ISO 3834, tedy svarů s nejpřísnějšími kritérii. Tyto kritéria platí pro výrobu a montáže, dílenské i externí. Norma určuje způsoby, jak prokazovat schopnosti výrobce vyrábět výrobky při stanovené jakosti. Mezní hodnoty vad dle zvolené úrovně kvality se pro svarové spoje zhotovené elektronovým a laserovým svařováním budou kontrolovat dle normy s označením ČSN EN ISO 13919-1. Pro posouzení vhodnosti této metody svařování byly využity laboratorní testy. První z nich je exploatace v korozním prostředí 3 % roztoku NaCl po dobu 21 dní (500 hodin) a následovalo vizuální vyšetření povrchu svařených vzorků. Byly provedeny i další testy, které měly popsat dosažené vlastnosti využitelné v praxi. Byla provedena zkouška mikrotvrdosti a tahová zkouška.

### 6.1 Příprava vzorků

Pro účel experimentu byly vybrány dva typy materiálů s rozdílnými tloušťkami plechů a zinkových vrstev. Materiály použité pro experiment byly: ocel S320 GD Z140 o tloušťce 2 mm a ocel DX 51 Z275 o tloušťce 0,9 mm. Zinková vrstva má označení Z140 a Z275 bez další specifikace na kvalitu povrchu a zinkového vzhledu. Každý plech je opatřen jinou vrstvou gramáže zinku - 140 g/m<sup>2</sup> a 275 g/m<sup>2</sup>, tj. každý plech má jinou tloušťku zinkové vrstvy. Vzorky byly nastříhány strojem TC 5000R (Trumpf) do požadovaných rozměrů. Rozměry plechů byly 300x150 mm, viz obr. 20 a 100x80 mm.

### 6.1.1 Příprava vzorků pro metalografickou analýzu

K metalografické analýze svarových spojů je potřeba vzorky připravit vhodným postupem. Ten obsahuje 4 procesy přípravy.

Nejdříve je svařený vzorek rozřezán na kotoučové pile od firmy Struers chlazené vodou na vzorky o velikosti cca 1 cm. Citlivý rozřez je důležitý z toho důvodu, aby nevznikaly defekty, které by byly mylně vyhodnoceny ve vazbě k použité technologii. Svarový spoj je ideální mít uprostřed. Vzorky se zbaví otřepů, aby při položení na rovnou plochu svíraly s podložkou úhel 90°. To je důležité proto, aby bylo možné sledovat skutečné rozměry svaru v dané průmětně. Připravené vzorky jsou vloženy do malých držáků.



Obr. 20 – Vzorek 300x150 mm – výchozí rozměr plechu

Vzorky v držácích se vloží na pracovní plochu CitoPress-1, vyrobené od firmy Struers. Vzorky se zasypou zalisovávací hmotou o objemu cca 1,5 násypky. Na horní vrstvu zalisovávací hmoty se vloží napsané označení s přiměřenou vrstvou jiné zalisovávací hmoty chlorofast, který zaručí průhlednost vrstvy až k vloženému označení. Stroj pod tlakem a teplotou zasypané vzorky stlačí a následně ochladí. Doba ohřevu je 4,5 minuty s teplotou 180 °C a tlakem 250 barů. Chlazení probíhá 3 minuty při vysoké rychlosti. Celková doba zalití vzorku je 7,5 minuty.

Vyjmuté vzorky následně pokračují na brusné a leštící zařízení Saphir 250 A2 - ECO. Nejdříve se provede broušení puků. Brusné kotouče se používají v pořadí P200, P1200, P2000, a nakonec P4000 při stejném výkonnostním nastavení. Přítlak pro broušení je 30 N na 90 sekund při 300 otáčkách za minutu.

Po broušení je voleno metalografické leštění. Pro leštění se používají speciální leštící kotouče MD DAC a MD NAP. U leštění s kotoučem MD DAC se používá smáčedlo a diamantový monokrystal o velikosti 1000 nm. Síla přítlaku zůstává jako u broušení, čas se prodlužuje na 270 sekund a otáčky jsou poloviční oproti broušení. Finální leštění probíhá na kotouči MD NAP. U finálního leštění se nepoužívá smáčedlo, pouze mastermed. Mastermed je  $\text{Al}_2\text{O}_3$  o velikosti částic 250 nm. Leští se po dobu 210 sekund nebo do požadovaného výsledku.

Vyleštěný vzorek je potřeba před pozorováním na mikroskopu naleptat, aby byla zviditelněna struktura. K naleptání se použije 1% Nital. Doba leptání je 45 sekund. Po naleptání je potřeba vzorkům zabránit dalšímu nežádoucímu leptání. Vzorky se proto nejdříve omyjí vodou a poté se položí do ultrasonické čističky s lihem, který zastaví proces leptání.

## 6.2 Svar na tupo

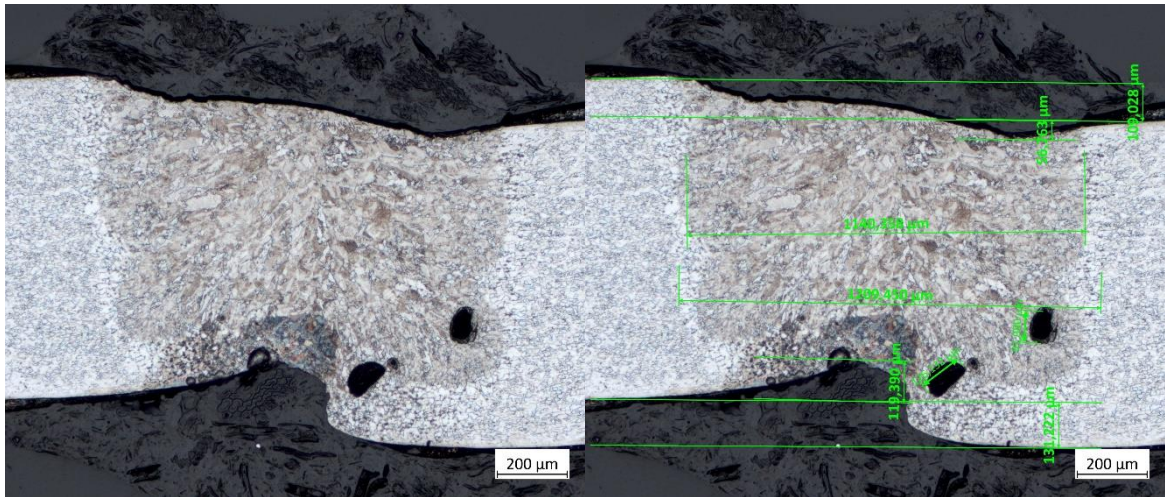
K experimentu byly použity plechy o tloušťce 0,9 a 2 mm. V průběhu experimentu se došlo k závěru vyzkoušet několik typů zpracování tupých svarů. Vzorky se svařovaly s rozdílnou orientací střížných ploch i různými rychlostmi svařování. U procesu výroby se vyzkoušely různé počty svaření vzorků. Samotné svaření vzorků, svaření vzorků s „přežehlením“ a svaření vzorků s „dvojím přežehlením“. „Přežehlení“ je hovorové označení používané v provozech. V této bakalářské práci bude toto označení rovněž použito z důvodu jeho výstižnosti a stručné identifikace provedené operace. Z hlediska procesu se jedná o opětovné vnesení energie při stejném výkonnostním nastavení do svaru. Zde ale nevzniká nová svarová lázeň. Svarová lázeň je pouze vnesenou energií ovlivněna.

Vzorky svařené se střížnými hranami nahoru (otřepy směřovaly k laserové optice), viz obr. 21, se během experimentu přestaly používat. Při svařování docházelo k silným rozstříkům zapříčiněným otřepy střížných hran, viz obr. 22. Obdobně bylo během experimentu zjištěno, že vysoká rychlost svařování negativně ovlivňuje schopnost dosáhnout bezpórovitého svaru. Odpařovaný zinek se nedokáže včas uvolnit přes svarovou lázeň, viz obr. 23.



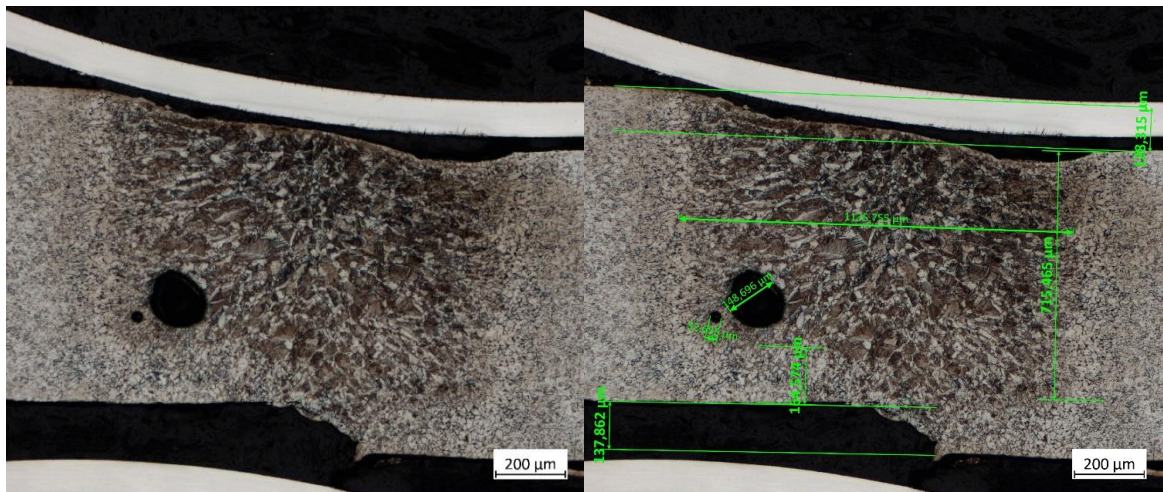


Obr. 21 – Orientace střížných hran plechu směrem nahoru



Obr. 22 – DX 51 Z275 0,9 mm – vzorek se střížnými hranami nahoře

Pro určení mezní hodnoty vad pro stupně jakosti se aplikuje norma ČSN EN ISO 13919-1. Na obrázku 22 je viditelné přesazení o velikosti 0,11 mm. U kořene se objevuje vada 516 – označována jako pórovitost kořene. V kořenové oblasti dále došlo k deformaci svařovaných plechů a k vadě označované 515 – hubený kořen. Během svařování docházelo k silným rozstříkům, zapříčiněným střížnými hranami formátované směrem nahoru. Tento svar nespĺňuje podmínky jakosti třídy B.

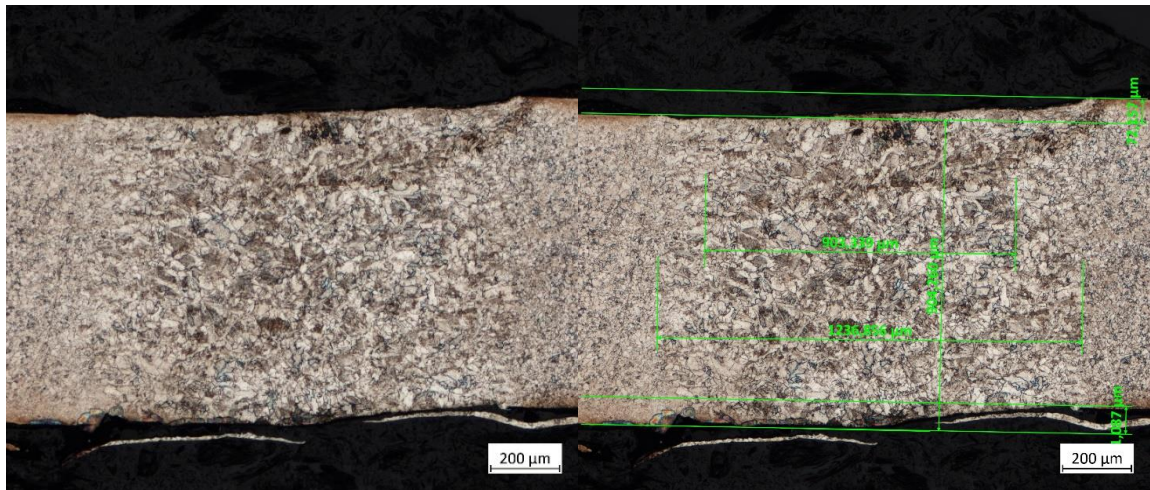


Obr. 23 – DX 51 Z275 0,9 mm – zrychlený čas svařování



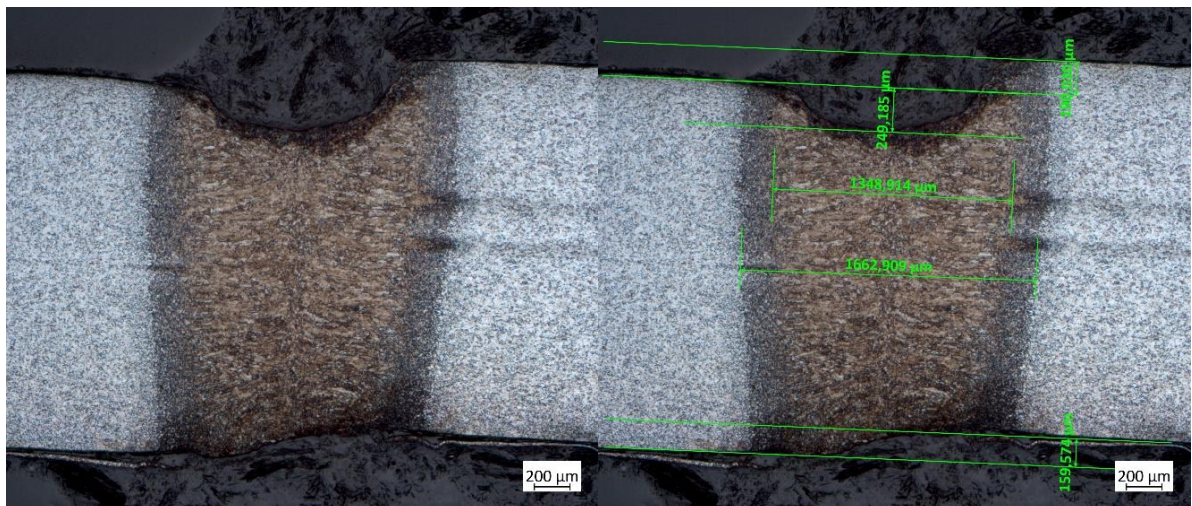
Na obrázku 23 je viditelné přesazení o velikosti 0,13 mm na horní straně svaru. U kořene je přesazení o velikosti 0,137 mm. U kořene svaru je dále viditelná střižná hrana, která není vhodná pro následné operace ve výrobě. Na levé straně svaru se objevuje pór o velikosti 0,15 mm. Přípustná hranice pro jednotlivý pór je 0,21 mm. Svar nevyhovuje třídě jakosti B ani C, ale až třídě jakosti D.

### 6.2.1 Svar na tupo bez „přežehlení“



Obr. 24 – DX 51 Z275 0,9 mm – svar na tupo bez „přežehlení“

Pro určení mezní hodnoty vad pro stupně jakosti se aplikuje norma ČSN EN ISO 13919-1. V makrografickém snímku, viz obr. 24 se neobjevují vnitřní vady, které by byly nepřijatelné pro stupeň jakosti B. Přesazení mezi plechy má hodnotu 0,072 mm a vada je označována číslem 507 – lineární přesazení. Lineární přesazení je dle normy pro stupeň jakosti B přípustné do 0,29 mm. Tupý svar ručně laserově svařený na 0,9 mm materiálu vyhovuje třídě jakosti B.



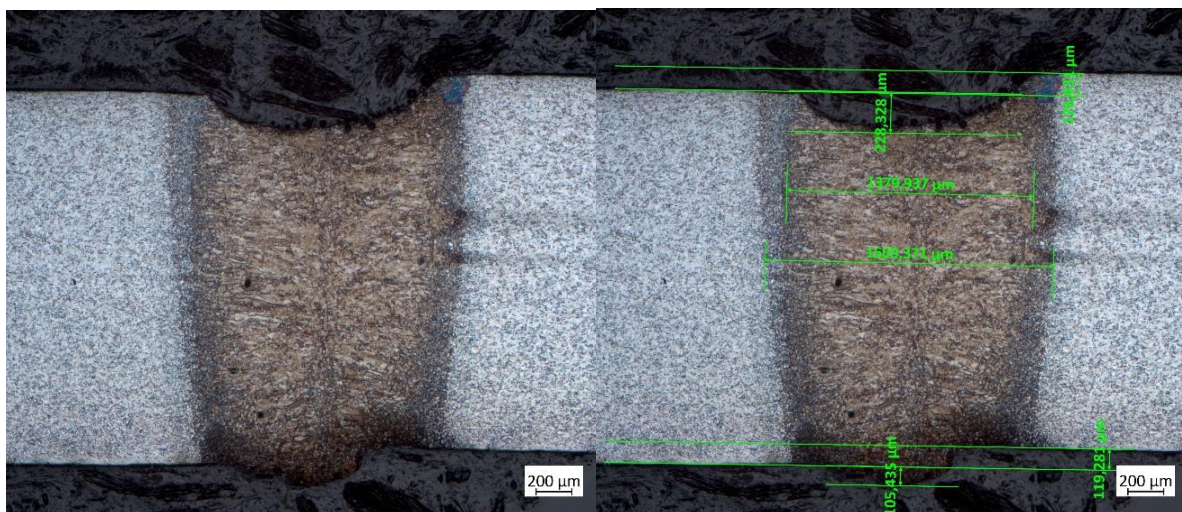
Obr. 25 – S320 GD Z140 2,0 mm – svar na tupo bez „přežehlení“

U makrografického snímku, viz obr. 25 se objevuje vada číslo 507. Hodnota přípustná pro stupeň jakosti B se díky tloušťce plechu zvětšila na 0,4 mm. Lineární přesazení má hodnotu 0,19 mm. Další vada je má identifikaci 511 – neúplné vyplnění svaru. Pro stupeň jakosti B je maximální přípustná hodnota 0,2 mm. Naměřená hodnota je 0,249 mm. Svar tedy nesplňuje stupeň jakosti B. Pro stupeň jakosti C je maximální přípustná hodnota 0,4 mm. Tuto hodnotu již svar splňuje. Klasický tupý svar ručně laserově svažený na 2 mm materiálu vyhovuje třídě jakosti C.

### 6.2.2 Svar na tupo s „přežehlením“

Jakost svaru u materiálu DX51 Z275 o tloušťce 0,9 mm je již po klasickém svažení na třídě B. U přežehlení nedošlo ke změnám, které by negativně ovlivnily třídu jakosti B. Svar s jedním „přežehlením“ vykazuje strukturu shodnou se stavem po normalizačním žíhání.

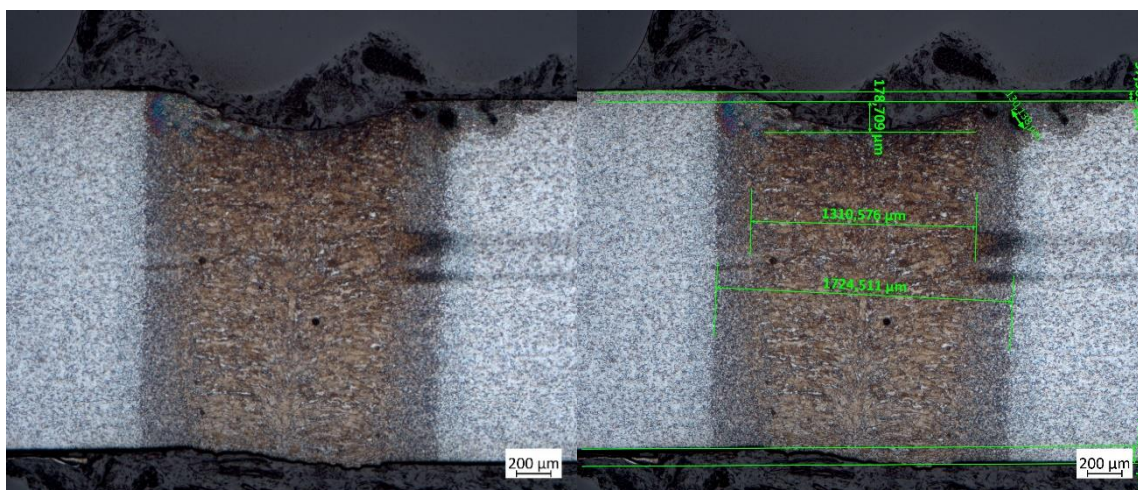
Makrografický snímek, viz obr. 26 představuje zlepšení oproti obr. 25. Přesazení má hodnotu 0,13 mm. Neúplného vyplnění svaru dosáhlo hodnoty 0,23 mm. Na makrografickém snímku se objevil shluk pórů. Vada je označována číslem 2013. Shluk pórů je menší jak 2% pórovitosti a zároveň je rozměr jednotlivých pórů menší než 0,6 mm. Svar disponuje v rámci pórovitosti třídu jakosti B. Nadměrný průvar – označován číslem 504 je o velikosti 0,1 mm. Přípustná hodnota pro třídu jakosti B je 0,5 mm. U svaru došlo ke zlepšení, nicméně se třída jakosti nezměnila. Svar patří do třídy jakosti C.



Obr. 26 – S320 GD Z140 2,0 mm – svar na tupo s „přežehlením“



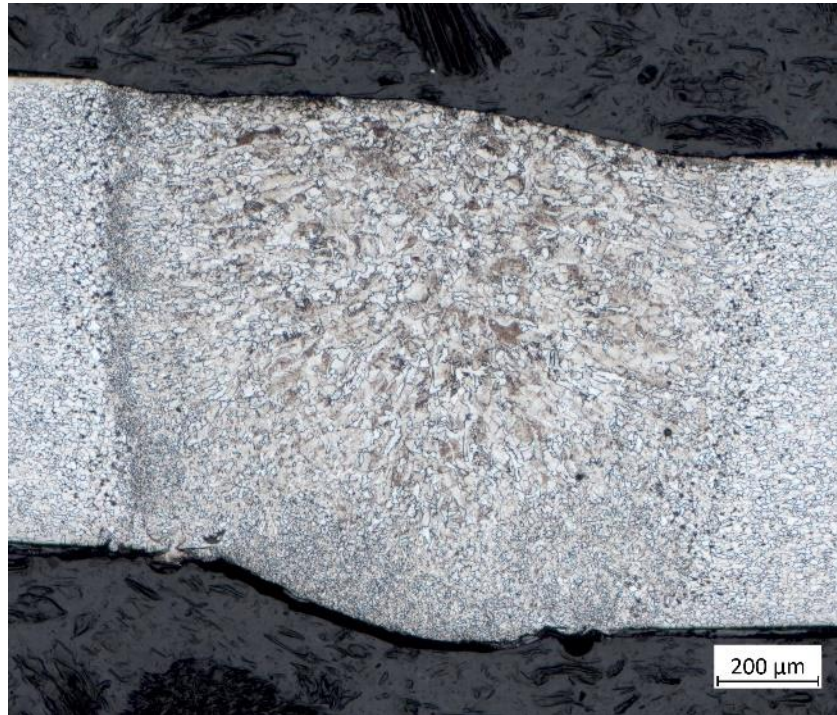
### 6.2.3 Svar na tupo s dvojitým „přežehlením“



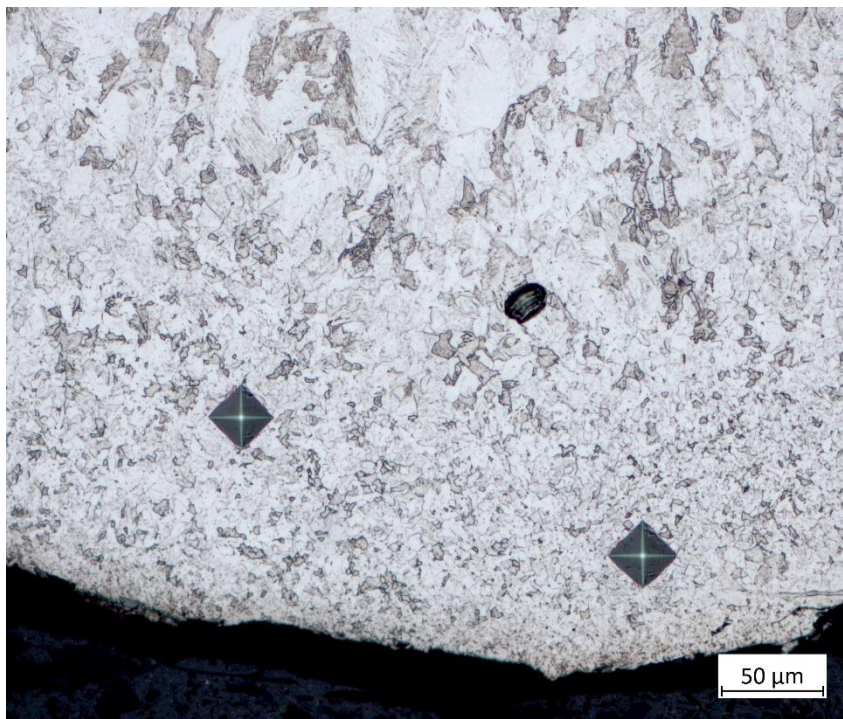
Obr. 27 – S320 GD Z140 2,0 mm – svar na tupo s dvojitým „přežehlením“

Neúplné vyplnění svaru má u vzorku, viz. obr. 27, který byl svařen a dvakrát přežehlen, hodnotu 0,06 mm. Svařovaný vzorek v rámci neúplného vyplnění svaru spadá do třídy jakosti B. Pórovitost se objevila u horní hrany, ale mimo svar. Příčinou bylo nepřesné přežehlení hotového svaru. Je zapotřebí dodržet stejnou kontinuální linii podél svaru, aby nedocházelo k nežádoucímu tepelnému ovlivnění v okolí svaru. Umístěním póru nebude docházet k ovlivňování svaru v rámci kvality a pevnosti. Tento typ svaru, svařovaný bez přídavného drátu je v rámci třídy jakosti nejlepší. Jediný splňuje podmínku pro třídu jakosti B.

Za zmínku stojí obr. 28. u materiálu DX 51 Z275 došlo při zavaření s dvojitým „přežehlením“ ke zmenšení zrn tzv. normalizačnímu žíhání vlivem opakovaného působení tepla. Průběh mikrotvrdosti vzorku o 0,9 mm s dvojitým „přežehlením“ je popsán v kapitole 6.6.



Obr. 28 – DX 51 Z275 0,9 mm – zavaření vzorku s dvojitým „přežhelením“



Obr. 29 – DX51 Z275 0,9 mm – struktura charakteristická tepelnému zpracování normalizačního žíhání



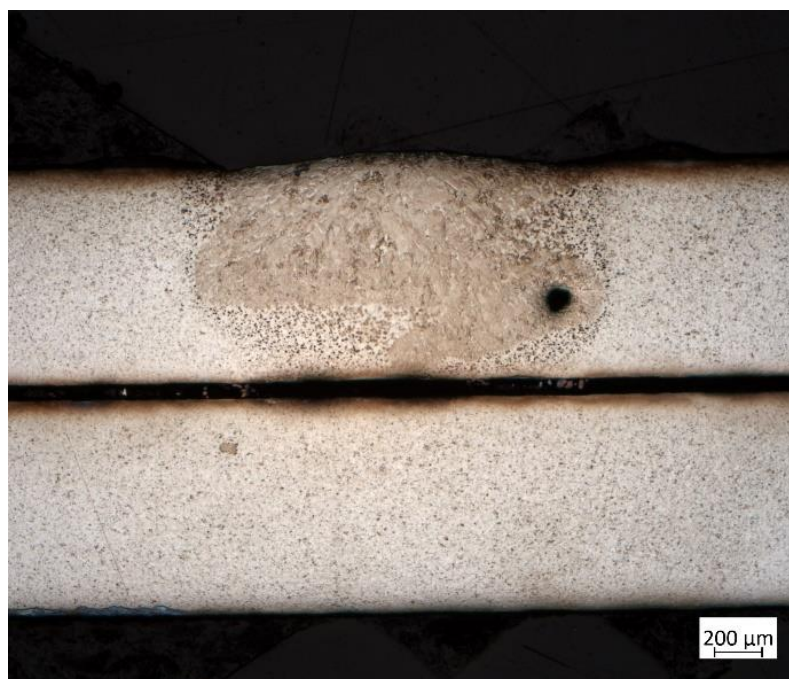
### 6.3 Přeplátovaný svar

Během experimentu se po svaření několika vzorků nepovedlo docílit přeplátovaných svarů, které by odpovídaly kvalitě jakosti třídy B, dokonce neodpovídaly ani jakosti C nebo D.

Přeplátovaný svar v experimentu potvrzuje tvrzení, že se doposud nepovedlo kvalitně a pro automatizačně svařit přeplátované pozinkované plechy. [30]

V průběhu experimentu se použily různé metody svařování popsané v teoretické části, viz kapitola 4.2. Byly provedeny svary bez distančních podložek, s distančními podložky, a i se změnou na pulzní charakteristiku svařování.

U materiálu DX 51 Z275 tloušťky 0,9 mm byly u svařování použity distanční podložky. Při svařování došlo k neprůvarům, viz. obr. 30. Při malé úpravě svařovacích parametrů vznikly masivní póry mezi svařovanými plechy, viz obr. 31 a expanzí svarových lázní do prostoru, viz obr 32.



Obr. 30 – DX 51 Z275 0,9 mm – neprůvar



Obr. 31 – DX 51 Z275 0,9 mm – masivní pórovitost



Obr. 32 – DX 51 Z275 0,9 mm – expanze svarové lázně

Změnou na pulzní charakteristiku svařování nebylo možné svařit pozinkované plechy. Při svařování docházelo k propalování obou plechů i při správném nastavení parametrů. Po korekci parametrů nebylo možné dosáhnout požadovaného svaru.

U svařování materiálu S320 GD Z140 o tloušťce 2 mm byly provedeny svary bez distančních kroužku, bez a s laserovým očištěním zinkové vrstvy. Při svařování pozinkovaných plechů bez distančních kroužků docházelo k tvorbě vnitřních trhlin, viz obr. 33 a vzniku masivních pórů, viz obr. 34. U svařených vzorků bez odstranění zinkové vrstvy se obdobně, jak u materiálu DX 51 Z275 objevovala expanze svarové lázně do prostoru, viz obr. 35.

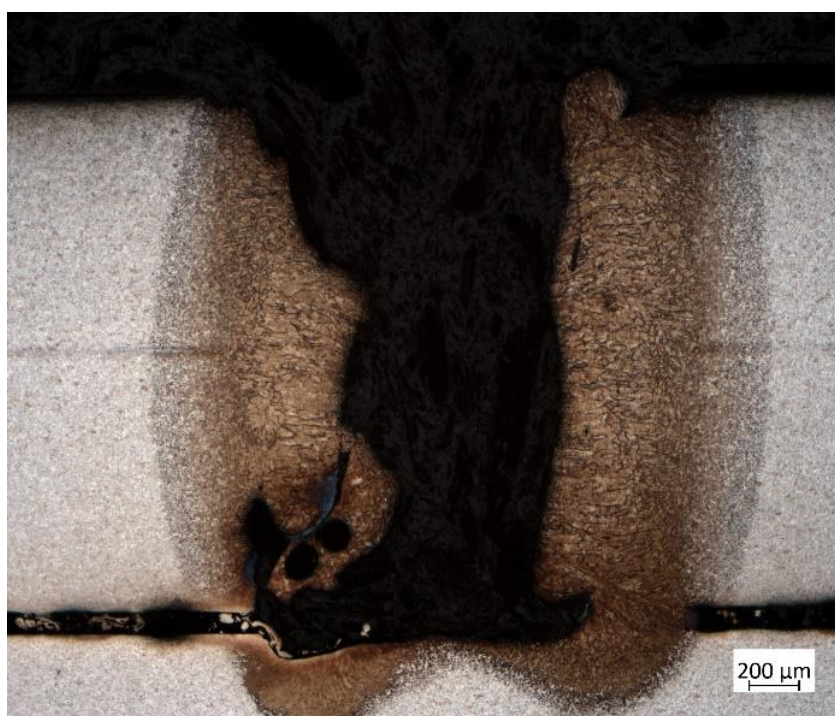


Obr. 33 – S320 GD Z140 2,0 mm – vnitřní trhliny



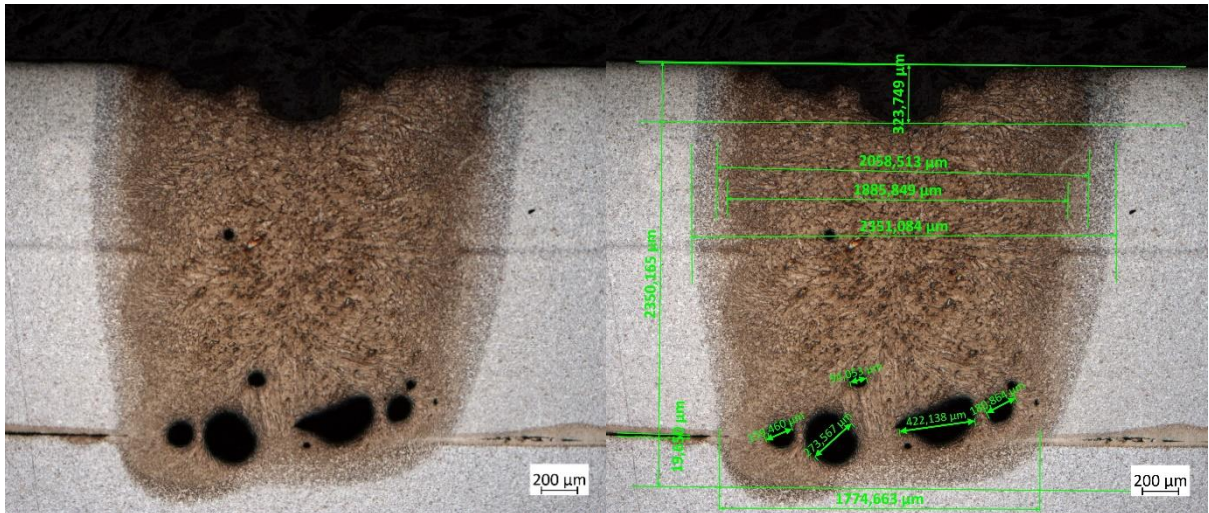


Obr. 34 – S320 GD Z140 2,0 mm – masivní pórovitost



Obr. 35 – S320 GD Z140 2,0 mm – expanze svarové lázně



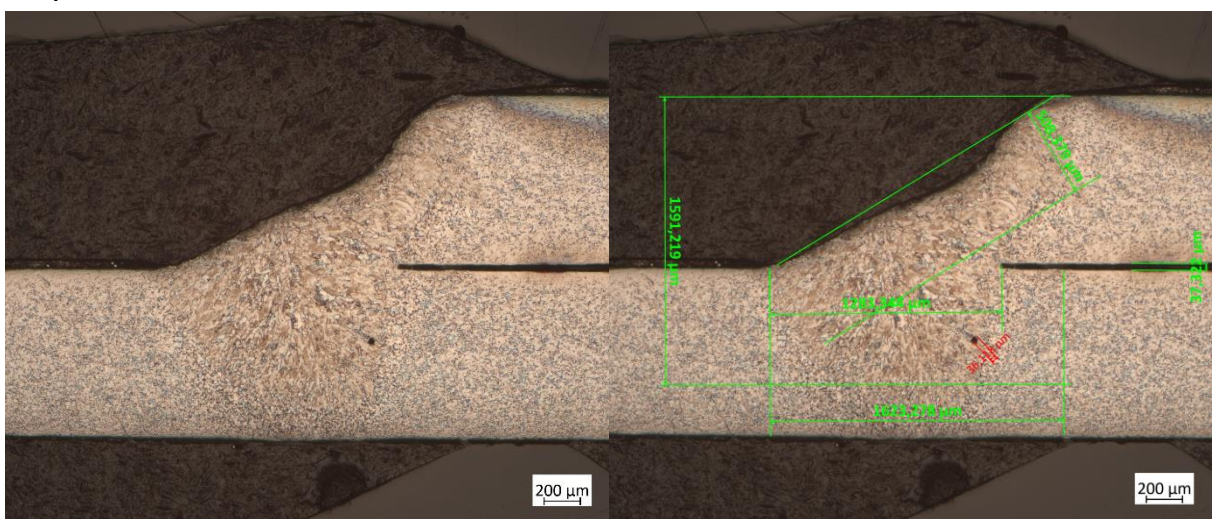


Obr. 36 – S320 GD Z140 2,0 mm – laserově očištěná vrstva zinku

Na makrografickém snímku, viz obr. 36, jsou zachyceny svarové spoje, kdy byly použity vzorky laserově očištěné od zinkové vrstvy. Odstranění zinkové vrstvy bylo na všech svařovaných plochách. Očištěné oblasti jsou viditelné na obou stranách u kořene svaru. V kořenové oblasti svaru se objevuje značná pórovitost. Nedostatečný průvar svaru je nepřijatelný pro jakýkoli stupeň jakosti odpovídající normy.

### 6.3.1 Koutově přeplátovaný svar

V průběhu experimentu se po nezdařilém svaření přeplátovaných plechů přešlo na koutově přeplátované svary. Tento typ svaru byl při použití přesných parametrů zhotoven na plechu 0,9 mm. Na makrografickém snímku, viz obr. 37 není patrná žádná vada. Koutově přeplátovaný svar vyhovuje třídě jakosti stupni B.



Obr. 37 – DX51 Z275 – koutově přeplátovaný svar

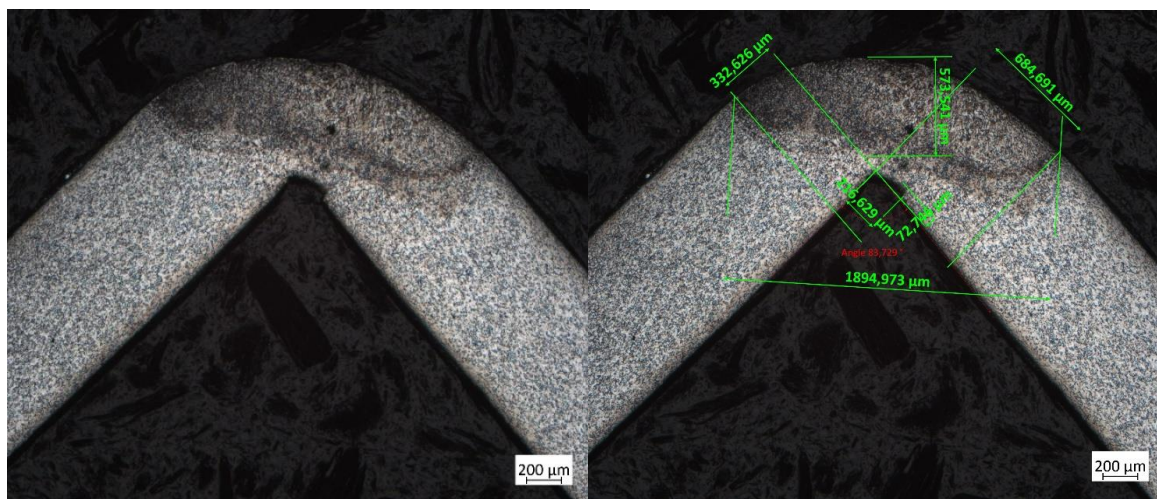


## 6.4 Rohový svar

V experimentu byl pro rohový svar, z důvodu lepší manipulace, zvolen materiál DX51 Z275 o tloušťce 0,9 mm s rozměry nastříhaných plechů 100x80 mm. Nastříhané plechy se vložily do jednoduchého přípravku a následně svařily. Je důležité dbát na polohu svařovací hlavy vůči místu svaru. Při nevhodném naklonění hrozí nežádoucí tepelné ovlivnění povrchu plechu a nedokonalému provaření, viz obr. 38.



Obr. 38 – DX 51 Z275 0,9 mm – rohový svar s tepelně ovlivněnými zónami



Obr. 39 – DX 51 Z275 0,9 mm – rohový svar

Na makrografickém snímku, viz obr. 39 se neobjevuje pórovitost. Svar v rámci vnitřních vad vyhovuje třídě jakosti B. Na obr. 40 je zobrazené místo, kde došlo ke změně struktury odpovídající normalizačnímu žíhání.



Obr. 40 – DX 51 Z275 0,9 mm – „normalizační žíhání“

## 6.5 Korozní zkouška v umělé atmosféře – zkouška solnou mlhou

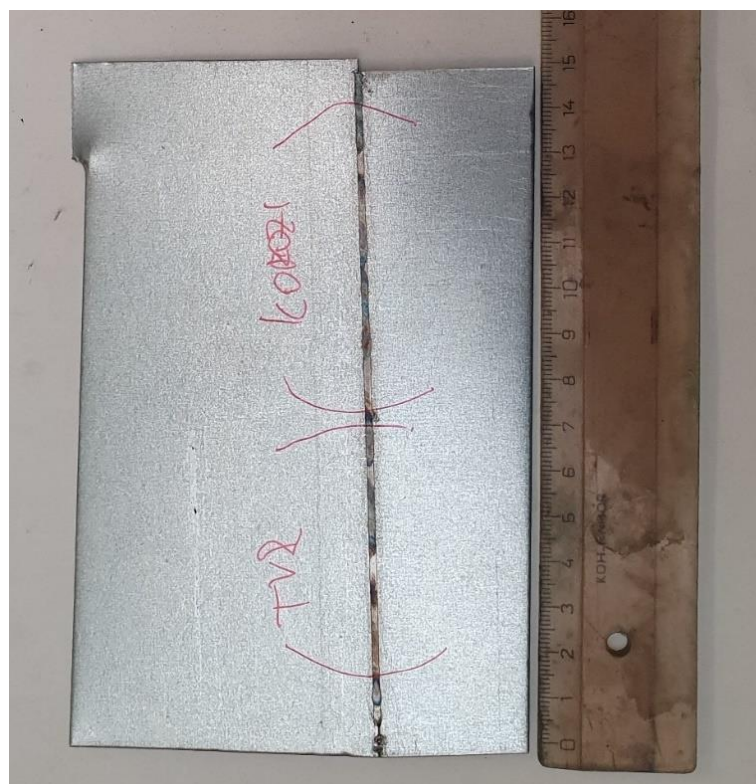
Do solné komory od firmy Liebisch se připravily vzorky tupého a koutově přeplátovaného svaru z materiálu o tloušťce 0,9 mm, viz obr. 41 a 42. Před prvním vložením do solné komory se vzorkům zamaskovaly hrany samolepící izolepou, aby nedošlo ke vzniku koroze na nechtěných místech vzorků. Doba expozice je 21 dní, tj. 500 hodin. Kontroly vzorků byly stanoveny na 72 hodin, 200 hodin, 300 hodin a 500 hodin.

Po 72 hodinách proběhla první kontrola vzorků. Na vzorcích je již patrné, že dochází k prvním náznakům bílé koroze, která vzniká při vystavení vzorků vůči vlhkosti – jedná se pouze o estetický problém, který neovlivňuje životnost vzorků. V průběhu dalších kontrol nedošlo k razantním změnám v pokrytí vzorků bílou korozí. Po 500 hodinách se vzorky ze solné komory vyjmuly. Vzorky se následně příčně nařezaly a byla provedena makroskopická kontrola svaru.



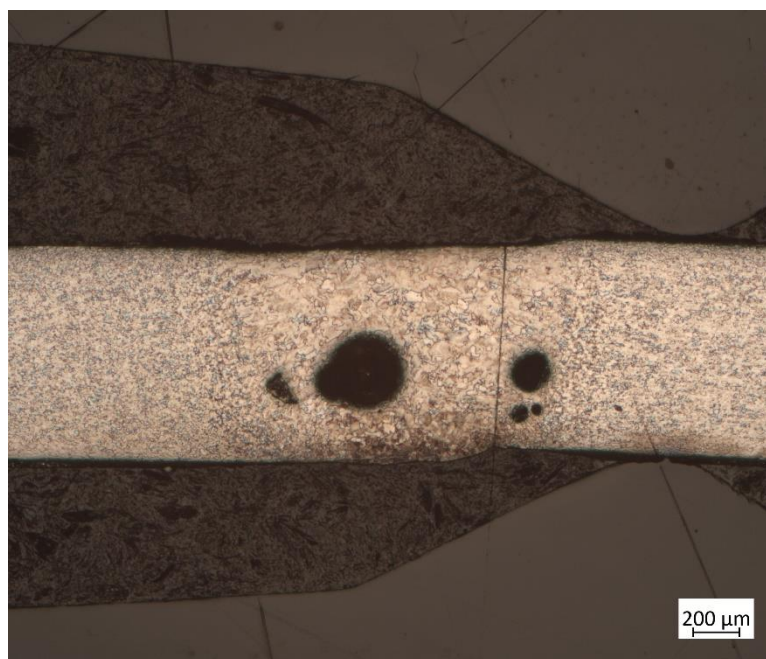


Obr. 41 – Vzorek 1 – před exploatací korozním testem – koutově přeplátovaný svar

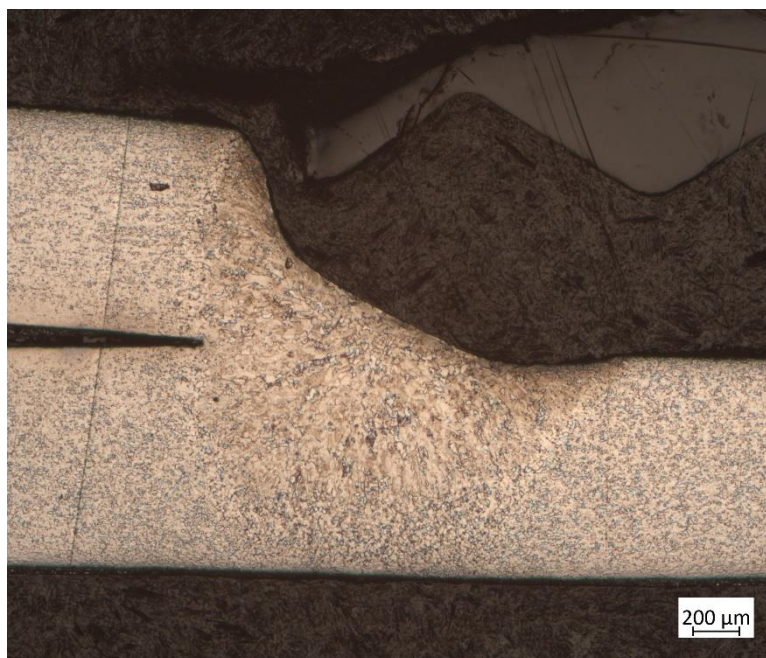


Obr. 42 – Vzorek 2 – před exploatací korozním testem - tupý svar

Z makroskopických snímků, viz obr. 43 a 44 je patrné, že po 500 hodinách v korozním prostředí 3 % NaCl nedošlo ke vzniku zárodků koroze na svarech.



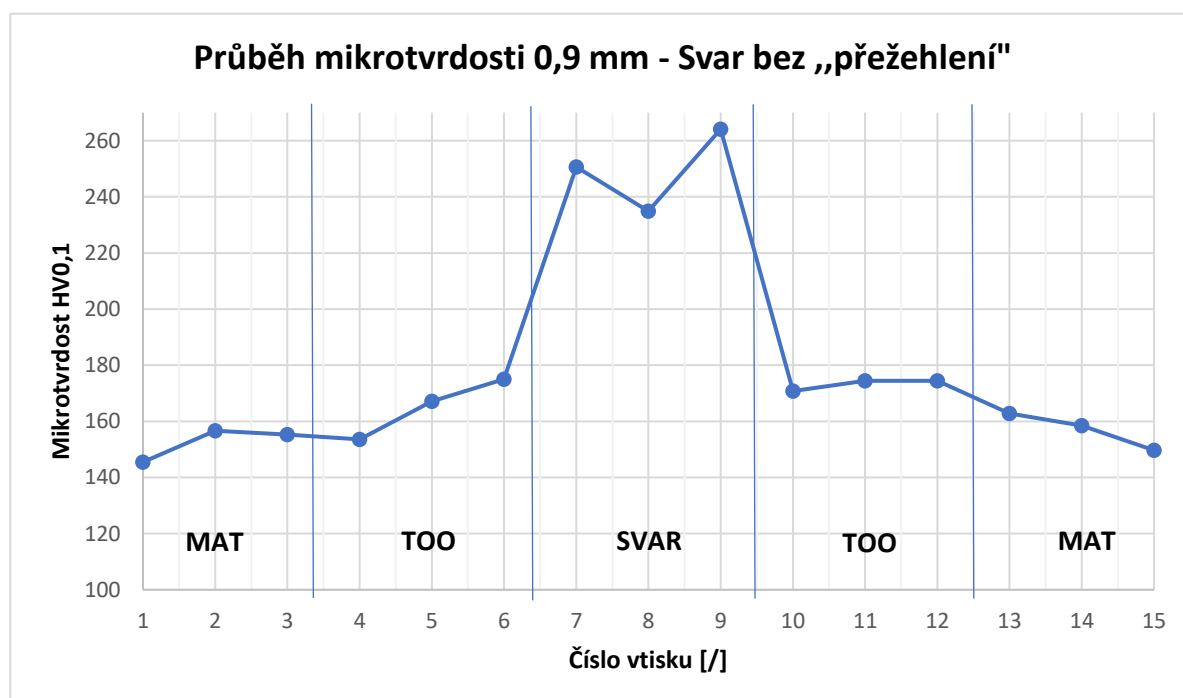
Obr. 43 – Vzorek 2 – makroskopický snímek



Obr. 44 – Vzorek 1 – makroskopický snímek

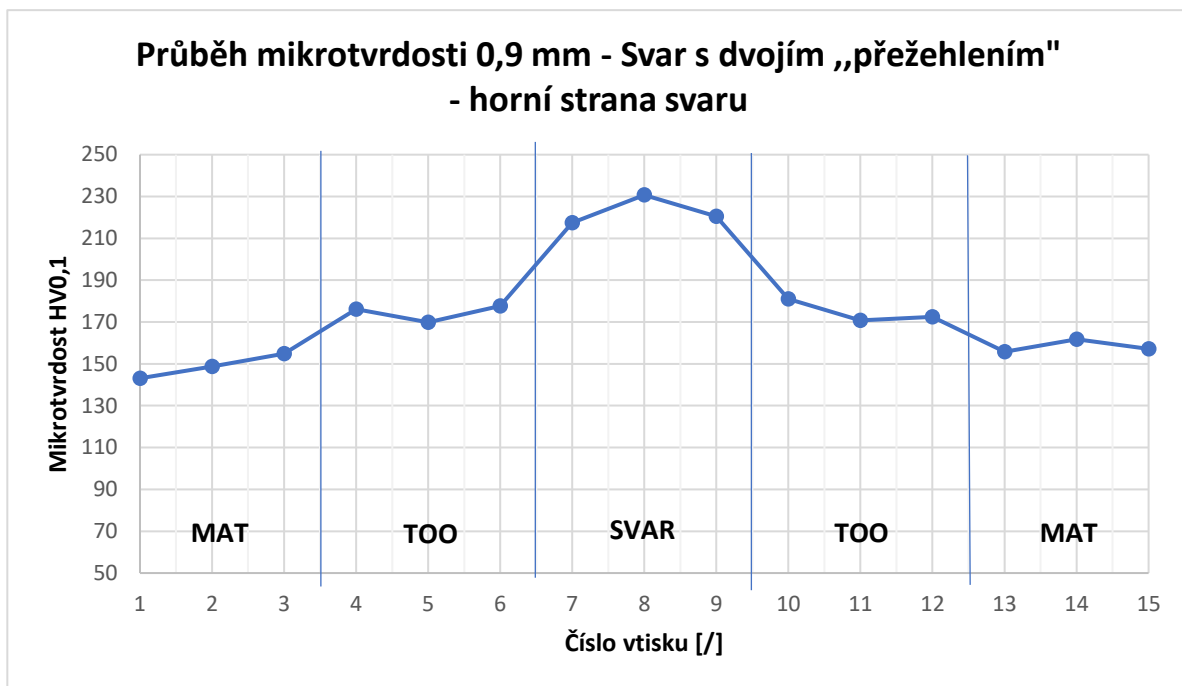
## 6.6 Zkouška mikrotvrlosti dle Vickerse HV0,1

Zkouška mikrotvrlosti byla provedena na plechu 0,9 mm DX 51 Z275 a plechu 2,0 mm S320 GD Z140. U plechu s tloušťkou 0,9 mm byla zkouška provedena na svaru bez „přežehlení“ a na svaru s dvojitým „přežehlením“. U plechu s tloušťkou 2,0 mm byla zkouška provedena na svaru s dvojitým „přežehlením“. Samotná zkouška byla provedena na tvrdoměru Buehler. Principem zkoušky bylo za použití Vickersova indentoru, který má tvar pravidelného čtyřbokého jehlanu, provést vtisky dle normy ČSN EN ISO 9015-2. Použité zatížení u provedené zkoušky bylo 0,98 N s dobou zatížení 10 sekund.



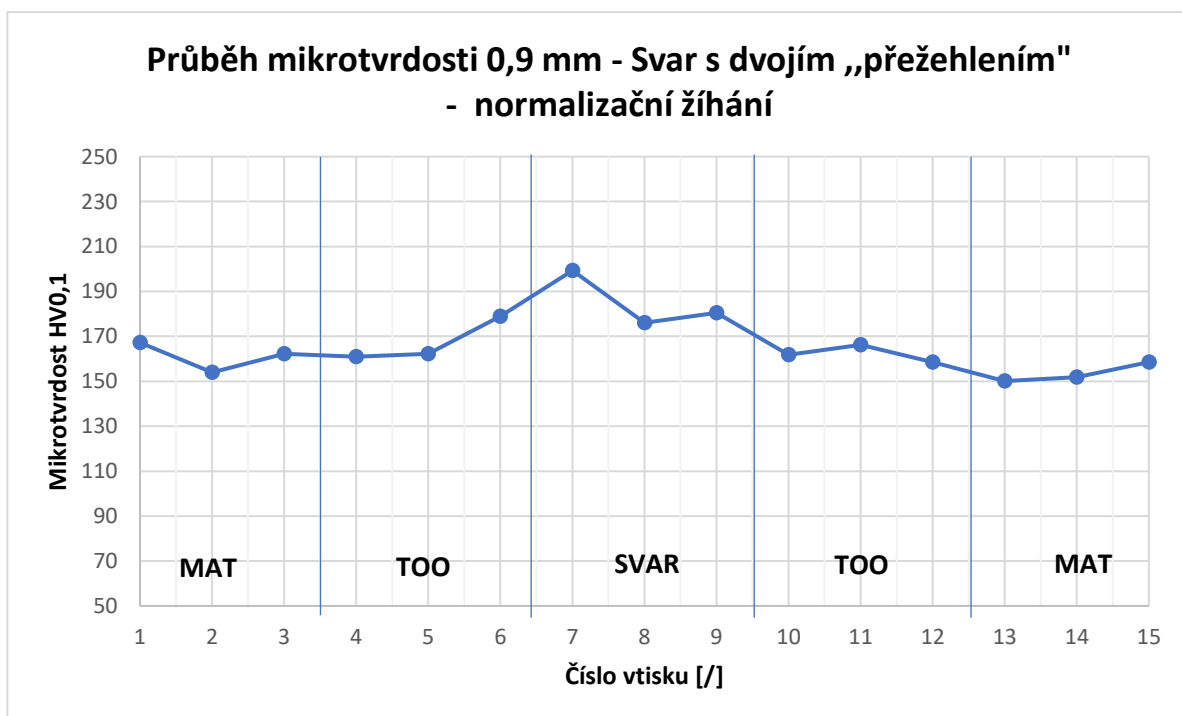
Obr. 45 – Průběh mikrotvrlosti 0,9 mm – svar bez „přežehlení“

Z obrázku 45 je patrné, že maximální dosažená mikrotvrlost je 264,1 HV0,1. Obě tepelně ovlivněné oblasti mají zvýšenou mikrotvrlost v porovnání se základním materiálem, který má mikrotvrlost okolo 150 HV0,1. Svar vyhovuje dle normy ISO 9015-1. Maximální přípustná hodnota mikrotvrlosti pro materiál o tloušťce 0,9 mm je 380 HV10. Obecně platí, že hodnoty mikrotvrlosti naměřené s menším zatížením budou o něco větší jak hodnoty naměřené při větším zatížení.



Obr. 46 – Průběh mikrotvrlosti 0,9 mm – svar s dvojitým „přežehlením“ – horní strana svaru

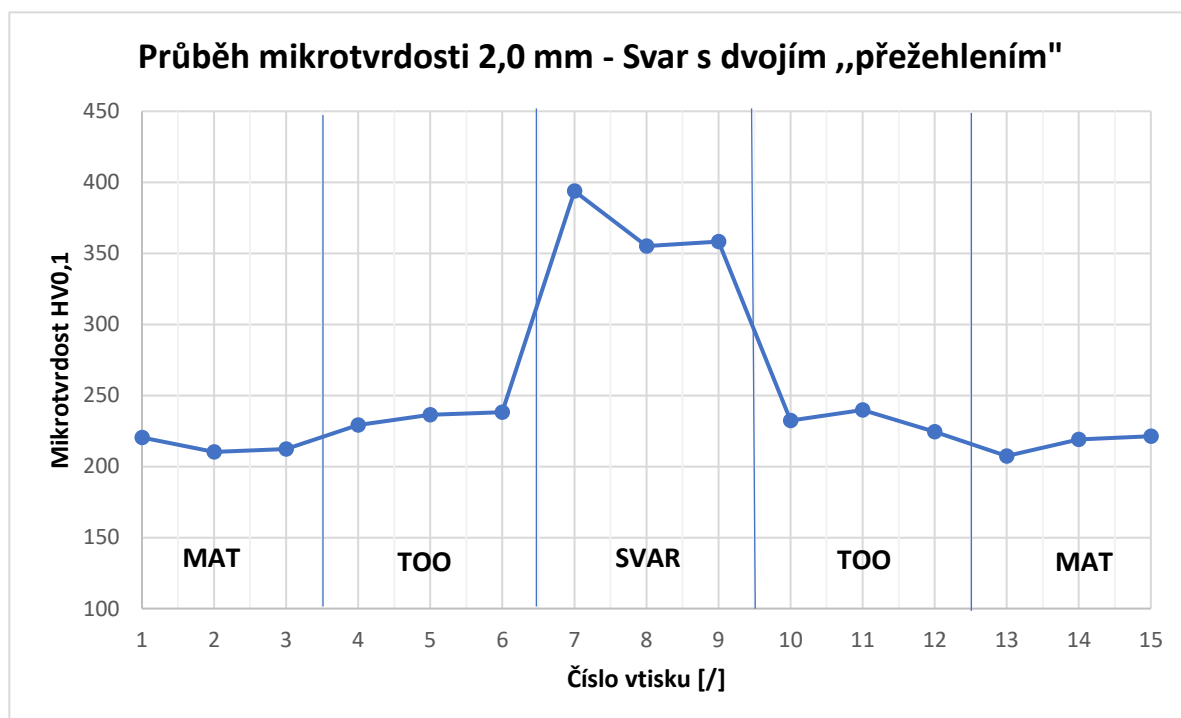
Na obrázku 46 je viditelná změna maximální mikrotvrlosti u svaru. Dosažená mikrotvrlost je 230 HV<sub>0,1</sub>, tedy o 30 HV<sub>0,1</sub> méně než u svaru bez přežehlení, viz obr. 45. Mikrotvrlost základního materiálu a tepelně ovlivněné zóny se nezměnila. Horní část svaru taktéž vyhovuje dle normy ISO 9015-1.



Obr. 47 – Průběh mikrotvrlosti 0,9 mm – svar s dvojitým „přežehlením“ – normalizační žíhání



Na obrázku 47 je viditelné značné snížení mikrotvrlosti svaru v oblasti normalizačního žíhání. Mikrotvrdot se snížila z 230 HV0,1, viz obr. 46 na mikrotvrdot 200 HV0,1 v nejtvrđším místě. Uprostřed kořene svaru byla mikrotvrdot 176,1 HV0,1. Dále je patrné, že rozdíl mezi základním materiálem a tepelně ovlivněnou zónou téměř zmizel. Kořenová část svaru vyhovuje dle normy ISO 9015-1.

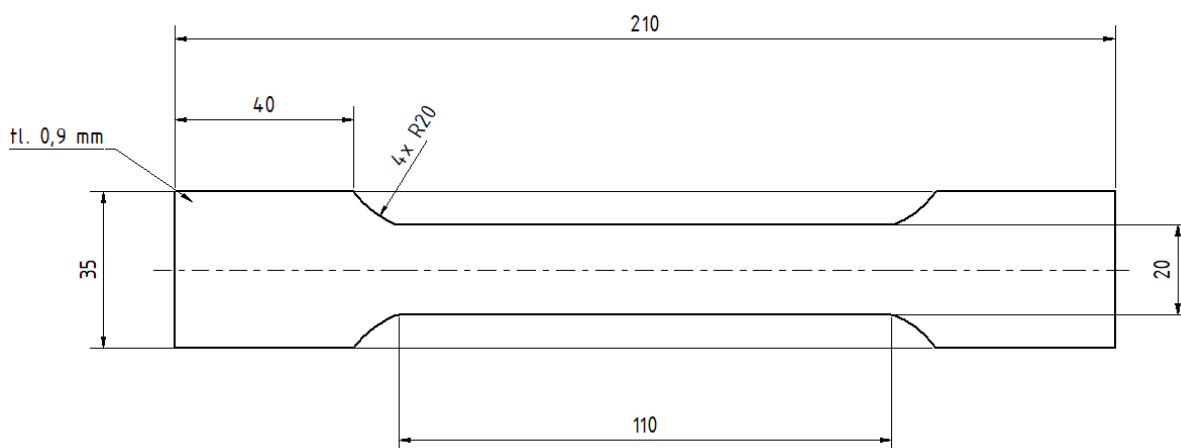


Obr. 48 – Průběh mikrotvrlosti 2,0 mm – svar s dvojitým „přežehlením“

Na obrázku 48 je maximální naměřená mikrotvrdot 393,8 HV0,1. V oblasti svaru se mikrotvrdot pohybovala okolo 360 HV0,1. Materiál disponuje mikrotvrdotí okolo 210 HV0,1. V tepelně ovlivněné zóně se mikrotvrdot zvětšila na přibližně 230 HV0,1. Dle normy ISO 9015-1 je maximální přípustná hranice mikrotvrlosti pro plech 2 mm bez tepelného zpracování 380 HV10. Obecně platí, že nižší zatížení má výsledné hodnoty mikrotvrlosti vyšší, než tvrdost změřena při vyšším zatížení. Proto lze i přes vyšší naměřené hodnoty mikrotvrlosti považovat svar za vyhovující dle normy ISO 9015-1.

## 6.7 Tahová zkouška

Rozměry vzorků pro tahovou zkoušku, viz obr. 49 odpovídají normě ČSN EN ISO 6892-1. Původní rozměr svařovaných plechů byl 300 x 300 mm se svarem uprostřed. Pro tahovou zkoušku se stanovil tupý svar s dvojnásobným „přežehlením“ u materiálu 0,9 mm DX51 Z275. Ve společnosti Stellis s.r.o. se vodním paprskem s abrazivem nařezalo sedm vzorků se svarem. Svar je vždy uprostřed vzorku.



Obr. 49 – Rozměry vzorků pro tahovou zkoušku

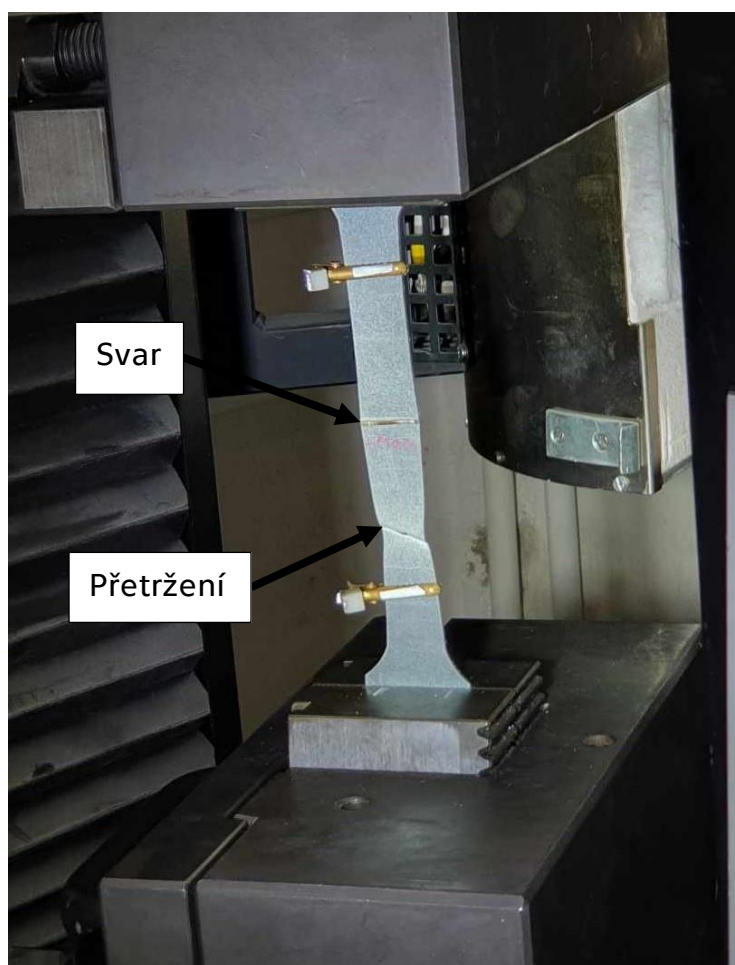
Tahová zkouška byla provedena na stroji LabTest Model 5.100SP1 od firmy LaborTech. Jmenovité zatížení stroje je 100 kN s maximální zkušební rychlostí 600 mm za minutu. Přesnost řízení rychlosti je  $\pm 0,5$  %. Pro nařezané vzorky se stanovila zkušební rychlost na 10 mm/min. Tahová zkouška byla prováděna za pokojové teploty dle normy DIN EN ISO 6892-1.

Po vykonání tahových zkoušek u všech sedmi vzorků došlo k vyhodnocení. U všech zkoušených vzorků došlo k přetržení mimo oblasti svarů i tepelně ovlivněných zón, viz. obr 50. Na obrázku je patrné, že během tahové zkoušky došlo ke zpevnění v oblasti svaru. Průřez zkušebního vzorku se v oblasti svaru zvětšil. Poměr prodloužení (tažnost) u zkušebních vzorků byla v rozmezí od 24,84 % do 30,4 %. Minimální poměr prodloužení je u materiálu DX51 Z275 stanoven na 22 %. Pevnost v tahu u materiálu DX51 Z275 je stanoven na 270 až 500 N/mm<sup>2</sup>. Naměřená pevnost v tahu byla u všech vzorků v rozmezí 379 až 384 N/mm<sup>2</sup>.

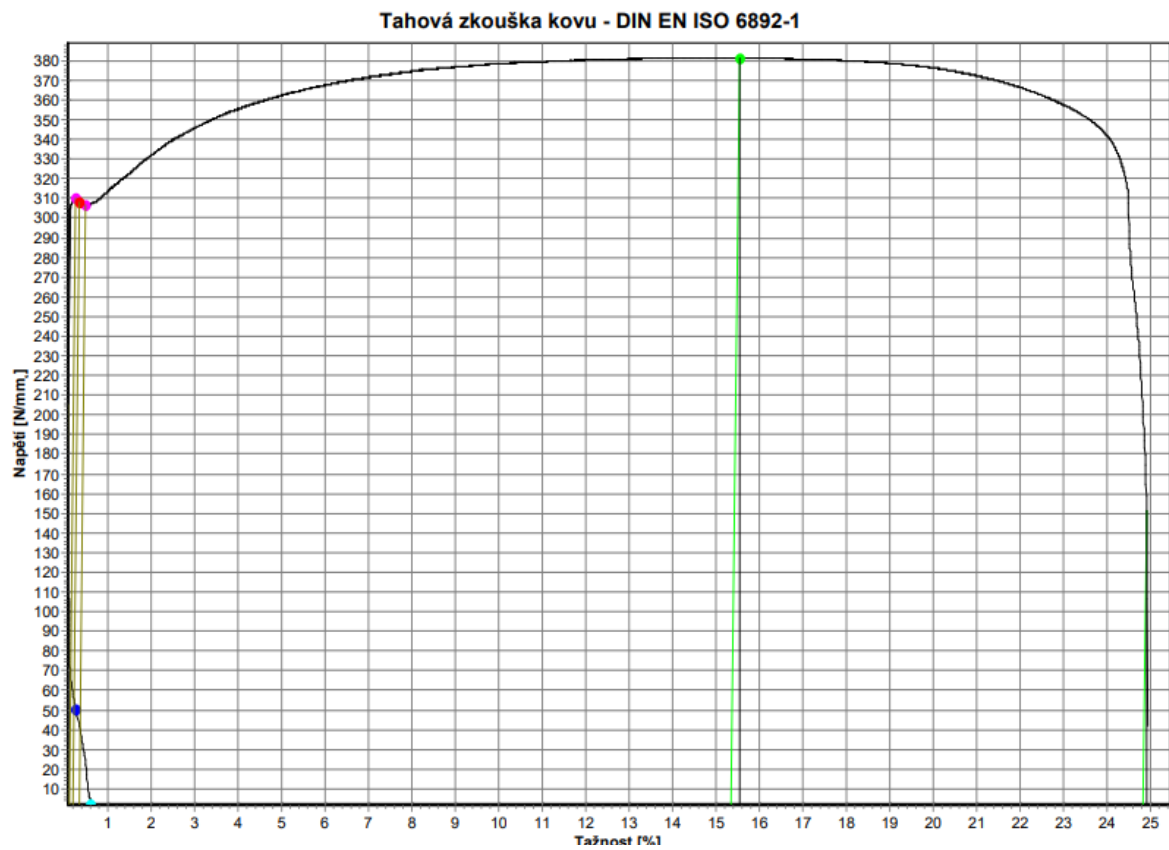
Pevnost svaru zhotovených na vzorkách je vyšší oproti původnímu materiálu. Svary vyhovují v rámci pevnosti. Naměřený poměr prodloužení a pevnost v tahu jsou vyšší než minimální stanovené meze u materiálu 0,9 mm DX51 Z275.

Tabulka 1 – Výsledky z tahové zkoušky na 7 vzorcích

Vzorek	Pevnost v tahu [ N/mm <sup>2</sup> ]	Tažnost [%]
1	379	29,2
2	384	30,4
3	383	28,4
4	384	27,9
5	383	26,3
6	383	26,2
7	381	24,84



Obr. 50 – Přetržený zkušební vzorek se svarem



Obr. 51 – Tahový diagram zkušebního vzorku 7 z materiálu 0,9 mm DX51 Z275

## 7. ZÁVĚR

V této bakalářské práci byly popsány teoretické i praktické informace z oblasti ručního laserového svařování tenkých pozinkovaných plechů. Nejvíce užívané ruční laserové stroje disponují vláknovými zdroji oproti Nd:YAG a diodovým zdrojům. Vláknové zdroje umožňují větší diverzitu v oblasti vlnových délek a výkonů při svařování. Rozmanitost vlnových délek umožňuje pokrýt větší pole působnosti při svařování laserovým zářením. Mezi nejvhodnější inertní plyny pro ruční laserové svařování patří argon, popřípadě směs argonu a helia. Argon je těžší než vzduch a disponuje dobrou ionizací. Pro svařování stačí nastavit menší průtok argonu. Helium na druhou stranu dobře vede teplo, proto se často používá ve směsích právě s argonem jako doplňkový plyn. Samotný plyn helia hůře ionizuje a je lehčí než vzduch. Pro svařování s využitím helia je nutné nastavit větší průtok plynu, což i s ohledem na cenu plynu se promítne v celkových nákladech.

Ruční laserové svařování patří do skupiny 4, tj. do skupiny laseru s nejvyššími možnými výkony pro ruční svařování. Je důležité, aby byla vytvořena legislativa přímo pro ruční laserové svařování. Legislativa by měla obsahovat kvalifikaci pro odborný personál neboli kvalifikační zkoušku, která se nyní používá u klasických metod svařování a pravidla bezpečnosti práce. Bezpečnost a hygiena práce je v oblasti ručního laserového svařování složitější než u klasických metod svařování. Je zapotřebí, aby byly během ručního laserového svařování dodrženy zásadní kroky bezpečnosti, mezi které patří používání správných ochranných pomůcek (rukavice, brýle, svařovací kukly, oblečení atd.) a bezpečnost v pracovním prostoru nazývaným „laserem řízená oblast“. Laserem řízená oblast je převážně pracovní prostor, který je uzpůsoben pro ruční laserové svařování. Pracovní prostor nedisponuje lehce hořlavými věcmi, které mohou snadno vzplanout z přímého nebo nepřímého (odrazeného) laserového paprsku. Naopak je vybavena kvalitní ventilací vzduchu, dveřními zámky, případně laserovými zábranami a štítky upozorňující na oblast řízenou laserem. V případě, že se nedodrží bezpečnost může vzniknout újma na majetku nebo zranění kvalifikovaného pracovníka. Mezi nejčastější zranění patří

poškození očí, poškození kůže případně i poškození dýchacích cest. Mimo zmíněné zranění může dojít i k požáru nebo úrazu elektrickým proudem.

Pozinkované plechy jsou převážně žárově zinkovány na určitou tloušťku zinkové vrstvy. Zinek má teplotu odpařování nižší, než je teplota tavení oceli. Odpařování zapříčiňuje, převážně u přeplátovaných pozinkovaných plechů nemožnost kvalitně odvádět odpařený zinek ze svarových lázní.

Ve světě existuje několik firem, které se zabývají masivní produkcí ručních laserových strojů. Převážně se jedná o firmy z Asie (Čína), které se v průběhu několika let dostaly do celosvětového povědomí. Firmy proto expandují do celého světa a rozšiřují své pobočky do Evropy a Ameriky. Existují i menší firmy např. v České republice, které se zabývají ručními laserovými stroji na bázi vlastního vývoje, prodeje i zajištění patřičné bezpečnosti. Ceny za ruční laserové stroje se trhem velmi liší. Ruční laserové stroje se dají pořídit v nižších i vyšších statisících korun.

V praktické části bakalářské práce byly provedeny testy na dvou typech materiálů. Jednalo se o pozinkované plechy s různými tloušťkami plechů i pozinkovaných vrstev. První zkušební materiál bych plech s označením DX51 Z275 o tloušťce 0,9 mm. Druhý materiál byl plech s označením S320 GD Z140 o tloušťce 2 mm. S různými tloušťkami plechů byly provedeny tři typy svarů: tupý, rohový a přeplátovaný. U všech třech typů svarů byl proveden makroskopický výbrus s vyhodnocením. Následovala zkouška mikrotvrdosti, korozní zkouška a tahová zkouška.

Nejdůležitějšími aspekty při svařování tenkých pozinkovaných plechů je „spasování“ plechů (aby nevzniklo nechtěné přesazení), stejnorodá rychlost svařování (aby nevznikla pórovitost). Zároveň je důležité brát ohled na střížné hrany plechů. Střížné hrany by měly být stejným směrem a směrem ke kořeni svaru. Tímto se zaručí, že nebude vznikat nežádoucí rozstřík při svařování. Rohový svar splnil požadavky třídy jakosti B (dle normy ČSN EN ISO 3834) a nevznikla zde žádná pórovitost. U rohového svaru jsou ve struktuře patrné známky normalizačního žíhání. Tupý svár byl svařován různými metodami – svar, svar s „přežehlením“ a svar s dvojným „přežehlením“. Svary s materiálem o tloušťce 0,9 mm vyhovovali třídě jakosti B již od obyčejného svaru. „Přežehlení“ způsobuje vznik struktury charakteristické normalizačnímu žíhání. Normalizační žíhání je

znatelně viditelné u dvojího „přežehlení“, nicméně je patné i při jednom „přežehlení“. Svary s materiálem o tloušťce 2 mm byly svařeny obdobně jako u tloušťky 0,9 mm. Svar s dvojitým „přežehlením“ vyhovoval třídě jakosti B jako jediný. Svar bez „přežehlení“ a svar s jedním „přežehlením“ nevyhovovaly třídě jakosti B ale C z důvodu špatného přesazení mezi plechy. Překlátované svary se v experimentálních podmínkách nepodařilo kvalitně svařit. V průběhu svařování docházelo k masivním rozstříkům způsobeným odpařováním zinku. Odpařený zinek se uvolňoval pryč přes svarovou lázeň a vznikala masivní expanze svarové lázně. V průběhu experimentu se vyzkoušely různé metody: svařování s distančními podložkami, očištění zinkové vrstvy nebo použití pulzního svařování. Ani jedna metoda nepomohla k vytvoření požadovaného svaru. Vznikaly masivní póry, trhliny ve svaru a nedokonalé provaření obou plechů. Změnou z překlátovaného svaru na koutově překlátovaný svar se povedlo docílit svaru vyhovující třídě jakosti B. Po makrografických zkouškách s vyhodnocením je zřejmé, že lze docílit třídu jakosti B u všech svarů kromě překlátovaného svaru.

Další provedená zkouška byla korozní zkouška v umělé atmosféře. Do solné komory se vložily plechy DX 51 Z275 0,9 mm s tupým a koutově překlátovaným svarem na 500 hodin (21 dní). Vzorky se poté příčně nařezaly a provedla se makroskopická kontrola. Během 500 hodin v solné komoře nevznikl zárodek koroze u tupého nebo koutově překlátovaného svaru.

Tahová zkouška byla provedena na materiálu DX51 Z275 0,9 mm. Připravily se standardizované vzorky, které se všechny následně přetrhaly mimo svar a svarovou oblast. V oblasti svaru došlo ke zpevnění. Mez pevnosti a poměr prodloužení odpovídají hodnotám dle materiálového listu.

Zkouška mikrotvrdomosti byla provedena na materiálu DX51 Z275 0,9 mm a S320 GD Z140 2 mm. Zvolené zatížení bylo HV0,1, tedy 100 g po dobu 10 sekund. U materiálu 0,9 mm se zkoušely vzorky bez „přežehlení“ a s dvojitým „přežehlením“ pro porovnání. Na těchto vzorkách je patrný rozdíl, že svar bez „přežehlení“ je tvrdší než svar s dvojitým „přežehlením“. U svaru s dvojitým „přežehlením“ je patrný rozdíl v mikrotvrdomosti mezi horní stranou svaru a dolní stranou svaru. Dolní strana svaru, která byla normalizačně žíhána vykazuje nižší tvrdost. Všechny výsledné hodnoty jsou pod maximální přípustnou hranicí mikrotvrdomosti. U materiálu 2 mm se zkoušel vzorek s dvojitým přežehlením. Maximální naměřená mikrotvrdomost byla

o něco vyšší, než norma připouští. Nicméně se měření provádělo za nižšího zatížení ( $F=0,98$  N). Obecně platí, že u nižšího zatížení jsou výsledné hodnoty mikrotvrdosti vyšší než u tvrdostí s vyšším zatížením ( $F=98$  N).

V navazující práci na ruční laserové svařování tenkých pozinkovaných plechů by bylo zajímavé porovnat ruční laserové svařování s klasickou metodou svařování - TIG. TIG je považován jako přímý konkurent ručnímu laserovému svařování. Za zmínku by stálo porovnání mezi metodami svařování na různých typech materiálu. Samotná skutečnost, že při ručním laserovým svařování je možný docílit strukturního stavu shodného s normalizačním žíháním dává možnost dalším průmyslovým aplikacím, kde se vyžaduje specifická struktura svarového kovu.



## Bibliografie

- [1] HeatSign. In: *HeatSign* [online]. 2023 [cit. 2023-10-06]. Dostupné z: <https://www.heatsign.com/a-complete-guide-to-getting-a-handheld-laser-welding-machine/>
- [2] LASERGRAAF. Chladící vodní kapaliny pro lasery. In: *Chladící vodní kapaliny pro lasery* [online]. 2023 [cit. 2023-10-06]. Dostupné z: <https://lasergraaf.nl/cs/product/chiller-water-koelvloeistof-voor-koelmachine-jerrycan-10-liter/>
- [3] Nd:YAG laser. *Oneindustry*. 2019, 2015(2), 1.
- [4] RF WIRELESS WORLD. Home of RF and Wireless Vendors and Resources. In: *Home of RF and Wireless Vendors and Resources* [online]. 2012 [cit. 2023-10-08]. Dostupné z: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-Nd-YAG-Laser.html>
- [5] IIoT-Ready, Networked Weld Monitor. In: *AMADA WELD TECH* [online]. 2023 [cit. 2024-01-07]. Dostupné z: <https://amadaweldtech.com/>
- [6] XOMETRY. Diode Lasers: Definition, How They Work, Types, Applications, and How to Use. In: XOMETRY, Team. *Xometry* [online]. 2023 [cit. 2023-09-24]. Dostupné z: <https://www.xometry.com/resources/sheet/diode-lasers/>
- [7] IPG PHOTONICS. Diode laser systems. In: IPG PHOTONICS. *IPG photonics* [online]. 2023 [cit. 2023-09-24]. Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/en/products/lasers/diode-laser-systems>
- [8] KATYAMA, Seiji. OSAKA UNIVERSITY. *Fundamentals and Details of Laser Welding*. 1. Singapore: Springer, 2020, 202 s. ISBN 978-981-15-7932-5.
- [9] LASERAX. FIBER LASERS: EVERYTHING YOU NEED TO KNOW. In: LANDRY, Jerome. *LASERAX. FIBER LASERS: EVERYTHING YOU NEED TO KNOW* [online]. 2020 [cit. 2023-09-28]. Dostupné z: <https://www.laserax.com/blog/fiber-laser>
- [10] PENNWELL CORPORATION. LaserFocusWorld. In: PENNWELL CORPORATION. *LaserFocusWorld* [online]. 2016 [cit. 2023-09-28]. Dostupné z:

<https://www.ipgphotonics.com/en/619/Widget/High-power+fiber+lasers%3A+techniques+and+accessories.pdf>

- [11] TRUMPF. Výhody vláknových laserů TRUMPF. In: TRUMPF. *Výhody vláknových laserů TRUMPF* [online]. 2023 [cit. 2023-10-08]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/cs\\_CZ/reseni/vyhody-stroju-trumpf/vyhody-vlaknoveho-laseru/](https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/vyhody-stroju-trumpf/vyhody-vlaknoveho-laseru/)
- [12] Technický týdeník. In: *Technický týdeník* [online]. 2006 [cit. 2023-10-08]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/vlaknove-lasery-pro-prumyslove-aplikace-uz-nikoli-coby-fyzikalni-rarita\\_15712.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/vlaknove-lasery-pro-prumyslove-aplikace-uz-nikoli-coby-fyzikalni-rarita_15712.html)
- [13] KONSTRUKCE. Ochranné plyny pro laserové svařování. In: KONSTRUKCE. *Ochranné plyny pro laserové svařování* [online]. 2023 [cit. 2023-10-08]. Dostupné z: <https://konstrukce.cz/materialy-a-technologie/ochranne-plyny-pro-laserove-svarovani-1281>
- [14] FlyLaser. In: *Jaký Ochranný Plyn By Měl Být Použit Pro Laserové Svařování?* [online]. 2022 [cit. 2023-10-08]. Dostupné z: <https://cz.flylaser.net/news/what-shielding-gas-should-be-used-for-laser-we-62724660.html>
- [15] MM průmyslové spektrum. In: *MM průmyslové spektrum* [online]. 2014 [cit. 2023-10-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-svarovani-posouzeni-vlivu-ochranneho-plynu>
- [16] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. Ochranné plyny s obsahem dusíku pro svařování hliníku. In: MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Ochranné plyny s obsahem dusíku pro svařování hliníku* [online]. 2013 [cit. 2023-10-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/ochranne-plyny-s-obsahem-dusiku-pro-svarovani-hliniku>
- [17] MESSER. ZNAČENÍ TLAKOVÝCH LAHVÍ. In: MESSER. *ZNAČENÍ TLAKOVÝCH LAHVÍ* [online]. 2023 [cit. 2023-10-12]. Dostupné z: <https://www.messer.cz/en/znaceni-tlakovych-lahvi>

- [18] LINDE. *Plyny A-Z* [online]. 2023 [cit. 2023-10-12]. Dostupné z: <https://www.linde-gas.cz/shop/cs/cz-ig/plyny-a-z>
- [19] ČESKO. *ČSN EN ISO 3834-2: Česká technická norma*. In: . 2006, ročník 2006, s. 12.
- [20] KOLAŘÍK, Ladislav. *Technologie svářování cvičení* [online]. In: CVUT. 2022 [cit. 2023-10-29]. Dostupné z: [https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/585298/mod\\_resource/content/1/kvalifikace\\_svarecu\\_2022.pdf](https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/585298/mod_resource/content/1/kvalifikace_svarecu_2022.pdf)
- [21] EU. *EN ISO 11533-2: Česká technická norma*. In: . 2009, ročník 2009, s. 20.
- [22] LASER WELDING AND CUTTING SAFETY. *Safety and Health*. 1998, **1998**(1), 3.
- [23] AUTOR, Nenalezený. *Safety Information and Conventions*. In: *Nenalezený vydavatel* [online]. 2023 [cit. 2023-10-15]. Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/scripts/lightweld-safety/LightWELD-Safety-Information-and-Conventions.htm>
- [24] DVOŘÁKOVÁ, Zdenka. *Laserové ukazovátka či myš mohou poškodit zrak*. In: *Deník.cz* [online]. 2008 [cit. 2023-10-15]. Dostupné z: [https://www.denik.cz/z\\_domova/ukazovatko\\_laser\\_mys20080821.html](https://www.denik.cz/z_domova/ukazovatko_laser_mys20080821.html)
- [25] INEKER. *Zánět rohovky může vést i ke ztrátě zraku*. In: *Ordinace.cz* [online]. 2023 [cit. 2023-10-15]. Dostupné z: <https://www.ordinace.cz/clanek/zanet-rohovky-muze-vest-i-ke-ztrate-zraku/>
- [26] AUTOR, Nenalezený. *Laserová rizika*. In: *Laserovabezpecnost-cz* [online]. 2023 [cit. 2023-10-15]. Dostupné z: <https://www.laserovabezpecnost.cz/sluzby/>
- [27] GUZUIR, Ing. Pavel. *Zdravotní rizika při svařování a řezání*. In: *MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM*. *Www.mmspektrum.com* [online]. 2005 [cit. 2023-10-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zdravotni-rizika-pri-svarovani-a-rezani>
- [28] IPG PHOTONICS. *Safety Information and Conventions*. In: IPG PHOTONICS. *Safety Information and Conventions* [online]. 2023 [cit. 2023-10-15].

- Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/scripts/lightweld-safety/LightWELD-Safety-Information-and-Conventions.htm>
- [29] AUTOR, emma. Elektrogalvanizované vs žárové zinkování. In: *COSASTEEL* [online]. 2021 [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://cs.cosasteel.com/electro-galvanized-vs-hot-dipped-galvanized/>
- [30] The Welding of Galvanized Steel. *Laser Apps. A uto Industry* [online]. 2000, 2000(1), 9 [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://drive.google.com/drive/u/0/folders/103HedluZxzUmq3zsYj1STeOZDDUDProe>
- [31] SEVERSKÝ SVAZ ŽÁROVÉHO ZINKOVÁNÍ. Příručka žárového pokovení. In: SEVERSKÝ SVAZ ŽÁROVÉHO ZINKOVÁNÍ. *Nenalezený vydavatel* [online]. 2011 [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://zarova-zinkovna.mea.cz/upload/ck/files/prirucka-zaroveho-zinkovani.pdf>
- [32] Pulsed Nd:YAG Laser Seam Welding of Zinc-Coated Steel. In: *Pulsed Nd:YAG Laser Seam Welding of Zinc-Coated Steel* [online]. 1999 [cit. 2023-10-29]. Dostupné z: <http://files.aws.org/wj/supplement/july99/TZENG.pdf>
- [33] Future of fiber laser welding and cleaning is now. In: *Fanuci* [online]. 2023 [cit. 2023-10-29]. Dostupné z: <https://fanuci.com/en>
- [34] Laser Cutting Machine, Laser Marking Machine, Laser Welding Machine Manufacturers, Suppliers. In: *HGLASER* [online]. 2023 [cit. 2023-10-29]. Dostupné z: <https://www.hgtech-laser.com/>
- [35] HWIEiC. In: *Leading Laser Equipment Manufacturer* [online]. 2023 [cit. 2023-10-29]. Dostupné z: <https://www.hwleiclaser.com/>
- [36] Vyrábíme a distribuujeme špičkové laserové technologie. In: *Narran* [online]. 2021 [cit. 2023-10-29]. Dostupné z: <https://narran.cz/>
- [37] Průmyslová automatizace Laserové technologie. In: *LaserTherm* [online]. 2019, 2023 [cit. 2023-10-29]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/>
- [38] NUX S.R.O. (WWW.NUX.CZ). Optika Pleyerová. In: *Optika Pleyerová* [online]. 2021 [cit. 2023-10-15]. Dostupné z: <http://www.ocnioptik.eu/oko-a-videni/oko/>

- [39] USER, Super. Bezpečnost laseru Třídy 1 až 4. In: *Automatizace průmyslového značení* [online]. 2022 [cit. 2023-10-15]. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/bezpecnost-laseru-tridy-1-az-4>
- [40] LASERSHOP. Laserové ochranné brýle blokující vlnové délky - 650-1100nm. In: LASERSHOP. *Laser-shop.cz* [online]. 2023 [cit. 2023-10-15]. Dostupné z: <https://laser-shop.cz/ochranne-pomucky/124597-laserove-ochranne-bryle-blokujici-vlnove-delky-650-1100nm.html>
- [41] LASERMET. Passive ALF Interlocked Laser Welding Helmet. In: LASERMET. *Lasermet* [online]. 2023 [cit. 2023-10-15]. Dostupné z: <https://www.lasermet.com/laser-safety-products/passive-alf-laser-welding-helmet/>
- [42] Ruční laserová svářečka LARISA. In: *ARC-H Welding s.r.o* [online]. 2022, 2023 [cit. 2023-10-29]. Dostupné z: <https://www.archwelding.cz/rucni-laserova-svarecka-larisa/>

## Seznam tabulek

Tabulka 1 – Výsledky z tahové zkoušky na 7 vzorcích.....	59
--	----

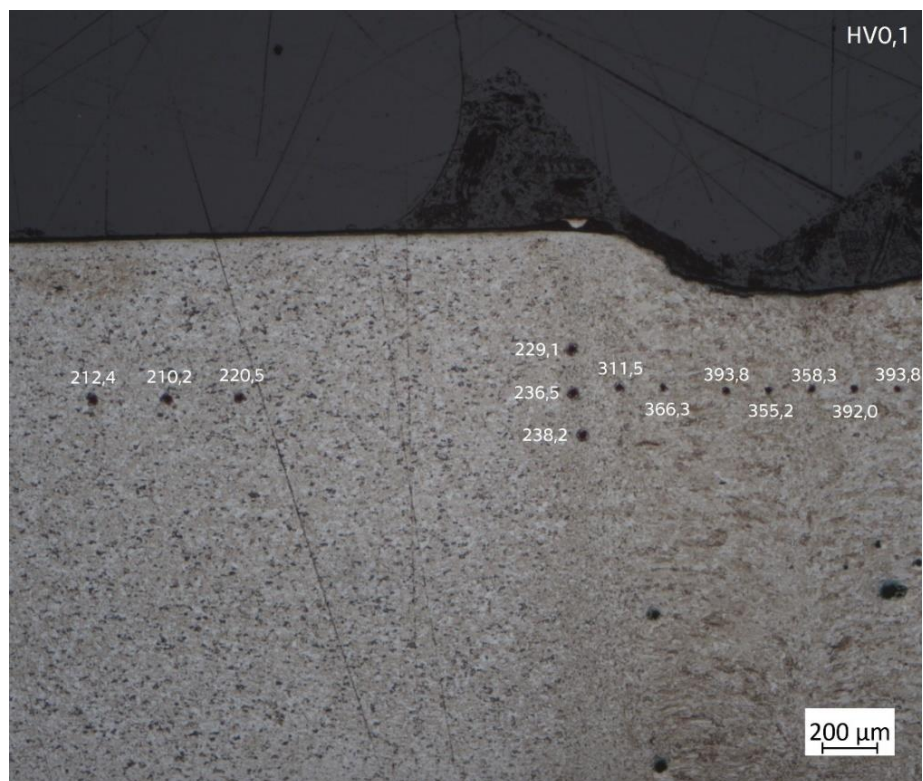


## Seznam obrázků

Obr. 1- Pulzní charakteristika výkonu laseru [8].....	15
Obr. 2 - Schéma Nd:YAG laseru [8] .....	16
Obr. 3 - Mechanismus diodového laseru [8].....	17
Obr. 4 - Ilustrace diodového zařízení [8].....	17
Obr. 5 - Dvouplášťová vrstva pro vláknový laser [8] .....	18
Obr. 6 – Zobrazení oka [38].....	23
Obr. 7 – Patologické vlivy na oko [39] .....	23
Obr. 8 – Zobrazení přejetí prstu v paprsku laseru [26] .....	24
Obr. 9 – Ochranné brýle – vlnové délky 650-1100 nm [40] a ochranná kukla – vlnové délky 915-1180 nm [41].....	25
Obr. 10 – Schéma kontinuálního žárového zinkování plechů [31].....	29
Obr. 11 – Schéma svařování přeplátováním [30] .....	30
Obr. 12 – Pórovitost bez odstranění zinkové vrstvy [30] .....	30
Obr. 13 – Schéma koutového přeplátovaného svaru [30].....	31
Obr. 14 – Schéma přeplátovaného svaru za užití distančních podložek [30] .....	32
Obr. 15 – Fanuci 4.0 PRO Portable Laser Welding Machine [33].....	34
Obr. 16 – Handheld CNC Fiber Laser Welding Mechine [34].....	35
Obr. 17 – HS Series [35].....	35
Obr. 18 – Ruční laserové svářečka CHORS [36].....	36
Obr. 19 – Ruční laserová svářečka LARISA [42].....	37
Obr. 20 – Vzorek 300x150 mm – výchozí rozměr plechu .....	39
Obr. 21 – Orientace střížných hran plechu směrem nahoru .....	41
Obr. 22 – DX 51 Z275 0,9 mm – vzorek se střížnými hranami nahoře .....	41
Obr. 23 – DX 51 Z275 0,9 mm – zrychlený čas svařování.....	41
Obr. 24 – DX 51 Z275 0,9 mm – svar na tupo bez „přežehlení“ .....	42
Obr. 25 – S320 GD Z140 2,0 mm – svar na tupo bez „přežehlení“ .....	42
Obr. 26 – S320 GD Z140 2,0 mm – svar na tupo s „přežehlením“ .....	43
Obr. 27 – S320 GD Z140 2,0 mm – svar na tupo s dvojitým „přežehlením“ .....	44
Obr. 28 – DX 51 Z275 0,9 mm – zavaření vzorku s dvojitým „přežehlením“ .....	45
Obr. 29 – DX51 Z275 0,9 mm – struktura charakteristická tepelnému zpracování normalizačního žíhání.....	45

Obr. 30 – DX 51 Z275 0,9 mm – neprůvar .....	46
Obr. 31 – DX 51 Z275 0,9 mm – masivní pórovitost .....	47
Obr. 32 – DX 51 Z275 0,9 mm – expanze svarové lázně .....	47
Obr. 33 – S320 GD Z140 2,0 mm – vnitřní trhliny.....	48
Obr. 34 – S320 GD Z140 2,0 mm – masivní pórovitost .....	49
Obr. 35 – S320 GD Z140 2,0 mm – expanze svarové lázně .....	49
Obr. 36 – S320 GD Z140 2,0 mm – laserově očištěná vrstva zinku .....	50
Obr. 37 – DX51 Z275 – koutově přeplátovaný svar .....	50
Obr. 38 – DX 51 Z275 0,9 mm – rohový svar s tepelně ovlivněnými zónami.....	51
Obr. 39 – DX 51 Z275 0,9 mm – rohový svar .....	51
Obr. 40 – DX 51 Z275 0,9 mm – „normalizační žíhání“ .....	52
Obr. 41 – Vzorek 1 – před exploatací korozním testem – koutově přeplátovaný svar.....	53
Obr. 42 – Vzorek 2 – před exploatací korozním testem -tupý svar.....	53
Obr. 43 – Vzorek 2 – makroskopický snímek.....	54
Obr. 44 – Vzorek 1 – makroskopický snímek.....	54
Obr. 45 – Průběh mikrotvrdosti 0,9 mm – svar bez „přežehlení“ .....	55
Obr. 46 – Průběh mikrotvrdosti 0,9 mm – svar s dvojitým „přežehlením“ – horní strana svaru.....	56
Obr. 47 – Průběh mikrotvrdosti 0,9 mm – svar s dvojitým „přežehlením“ – normalizační žíhání.....	56
Obr. 48 – Průběh mikrotvrdosti 2,0 mm – svar s dvojitým „přežehlením“ .....	57
Obr. 49 – Rozměry vzorků pro tahovou zkoušku.....	58
Obr. 50 – Přetržený zkušební vzorek se svarem.....	59
Obr. 51 – Tahový diagram zkušební vzorku 7 z materiálu 0,9 mm DX51 Z27560	

## Přílohy

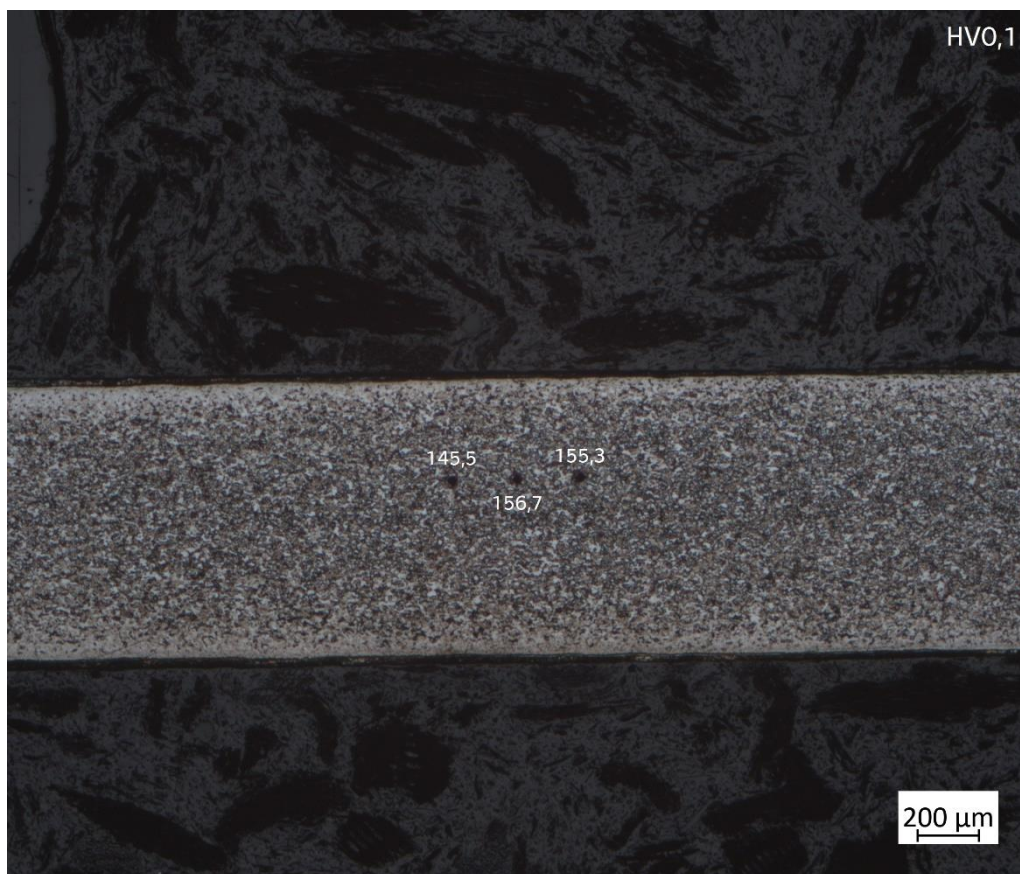


P. 1 – Znáznornění průběhu mikrotvrdosti u materiálu S320GD Z140 2 mm - 1

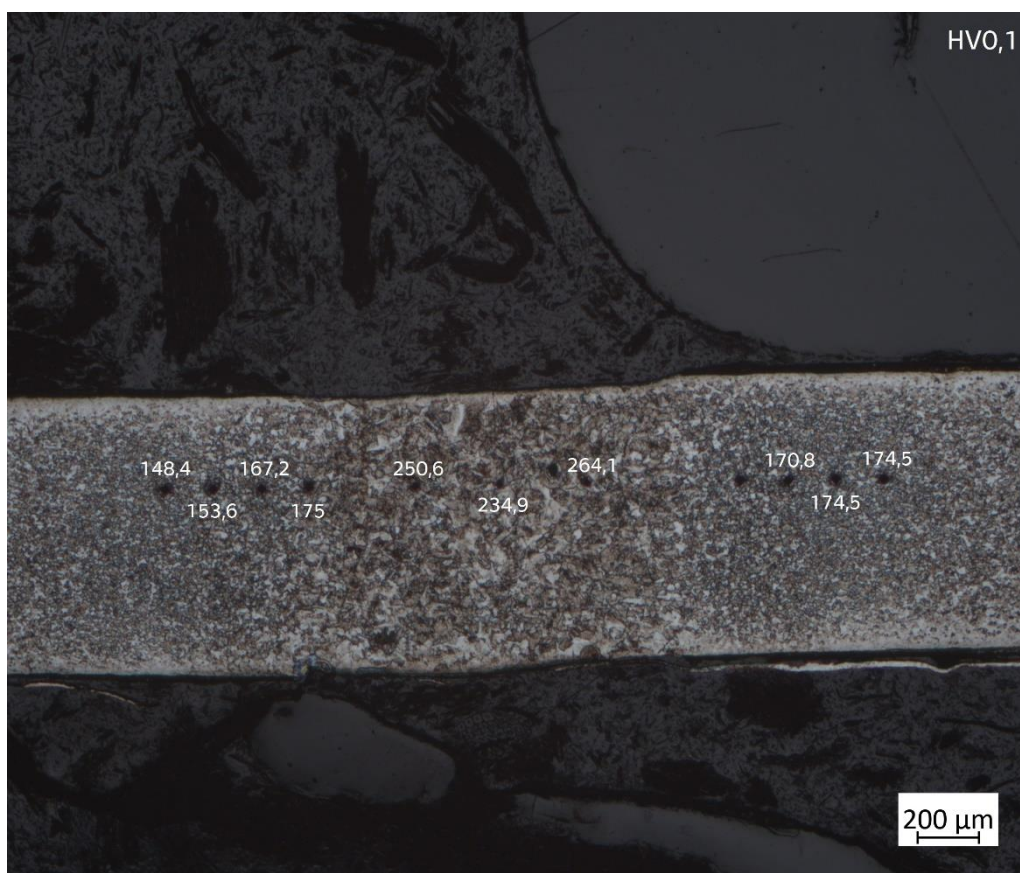


P. 2 – Znáznornění průběhu mikrotvrdosti u materiálu S320GD Z140 2 mm - 2



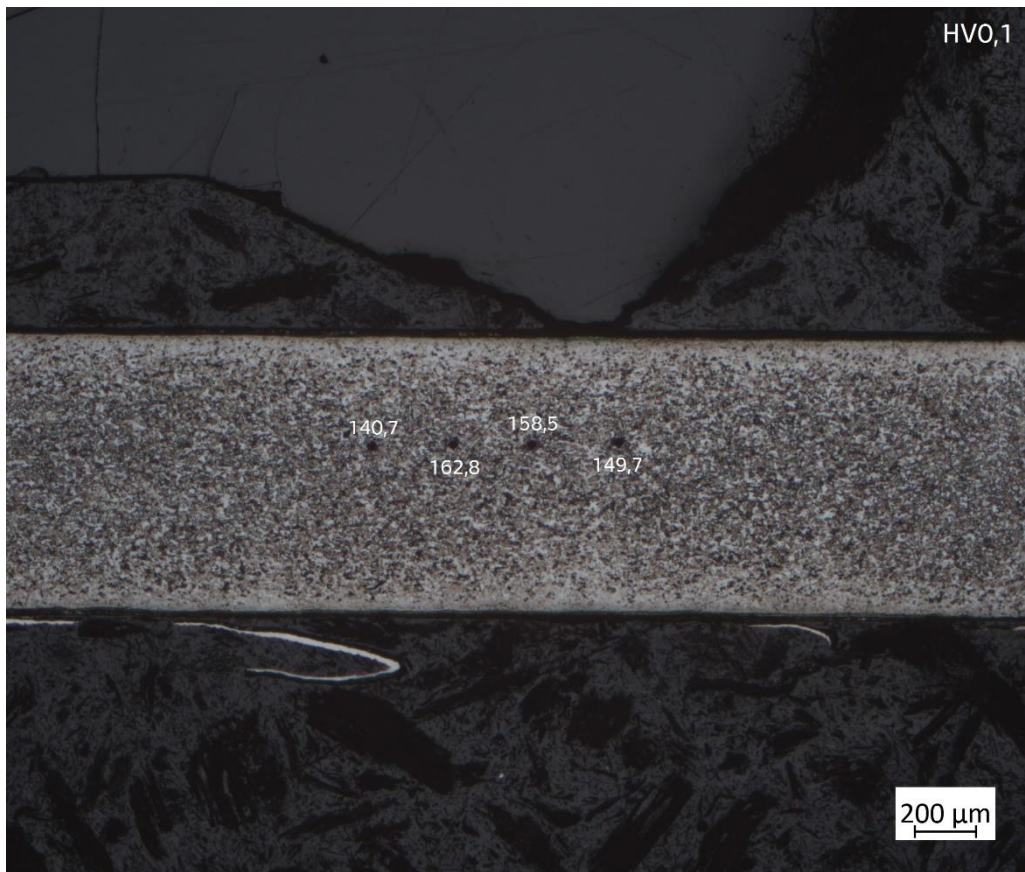


P. 3 – Znáznornění průběhu mikrotvrdosti u materiálu DX51 Z275 0,9 mm - 1

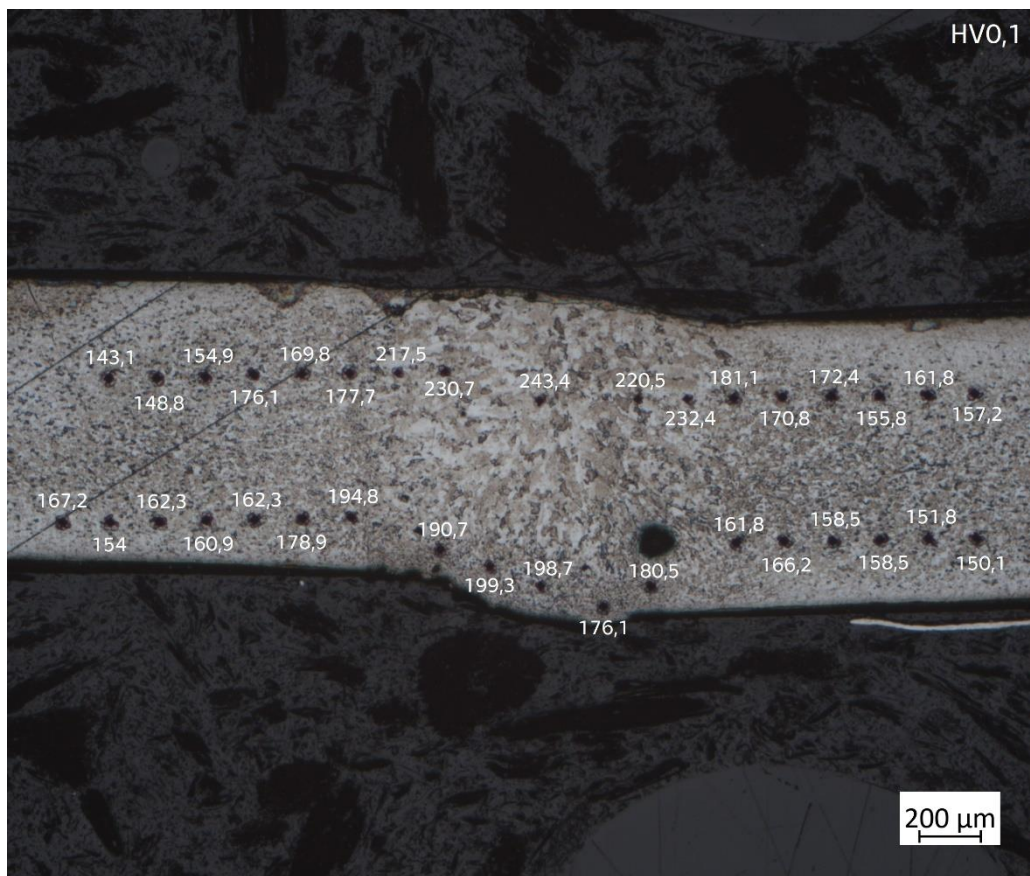


P. 4 – Znáznornění průběhu mikrotvrdosti u materiálu DX51 Z275 0,9 mm - 2





P. 5 – Znáznornění průběhu mikrotvrdosti u materiálu DX51 Z275 0,9 mm - 3



P. 6 – Znáznornění průběhu mikrotvrdosti u materiálu DX51 Z275 0,9 mm - 4

## Seznam příloh

- P. 1 – Znázornění průběhu mikrotvrdosti u materiálu S320GD Z140 2 mm - 1 ... 73
- P. 2 – Znázornění průběhu mikrotvrdosti u materiálu S320GD Z140 2 mm - 2 ... 73
- P. 3 – Znázornění průběhu mikrotvrdosti u materiálu DX51 Z275 0,9 mm - 1 .... 74
- P. 4 – Znázornění průběhu mikrotvrdosti u materiálu DX51 Z275 0,9 mm - 2.... 74
- P. 5 – Znázornění průběhu mikrotvrdosti u materiálu DX51 Z275 0,9 mm - 3.... 75
- P. 6 – Znázornění průběhu mikrotvrdosti u materiálu DX51 Z275 0,9 mm - 4.... 75