

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program:** N0715A270014

**Studijní specializace:** Materiálové inženýrství a výrobní technologie

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Laserové svařování studeným drátem HSS plechů s větší tloušťkou  
stěny**

**Autor:** Bc. František Hucek

**Vedoucí práce:** Doc. Ing. Stanislav Němeček PhD.

Akademický rok 2022/2023

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2022/2023

# **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. František HUČEK**  
Osobní číslo: **S21N0012K**  
Studijní program: **N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie**  
Téma práce: **Laserové svařování studeným drátem HSS plechů s větší tloušťkou stěny**  
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

## **Zásady pro vypracování**

1. Laserové svařování
2. Technologie laserového svařování s přídavným drátem Cold Wire
3. Svařování vysokopevných HSS ocelí s větší tloušťkou stěny
4. Příprava svarových ploch pro metodu Cold Wire
5. Úprava a konfigurace pracoviště pro svařování s přídavným drátem
6. Mechanické vlastnosti laserových svarů HSS ocelí
7. Diskuse výsledků
8. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50-70 stran**  
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

**Seznam doporučené literatury:**

Uwe Reisgen, Simon Olschok, Stefan Jakobs: Laser Submerged Arc Welding (LUPuS) with Solid State Lasers, Physics Procedia, Volume 56, 2014, Pages 653-662, ISSN 1875-3892, <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.067>.

W. Guo, J. A. Francis, L. Li, A. N. Vasileiou, D. Crowther & A. Thompson (2016) Residual stress distributions in laser and gas-metal-arc welded high-strength steel plates, Materials Science and Technology, 32:14, 1449-1461, DOI: 10.1080/02670836.2016.1175687.

Guo, W., Crowther, D., Francis, J.A. et al. Process-parameter interactions in ultra-narrow gap laser welding of high strength steels. Int J Adv Manuf Technol 84, 2547-2566 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7881-9>.

Lei, Zhen & Cao, Hao & Cui, Xiufang & Jin, Guo & Xu, Kaixin & Jiang, Bao & Huang, Ruisheng. (2022). Analysis of welding solidification crack in narrow gap laser welding of high-strength steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 119. 1-14. 10.1007/s00170-022-08659-6.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Stanislav Němeček, Ph.D.**  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce: **Doc. RNDr. Libor Mřa, Ph.D.**  
Ústav přístrojové techniky AV ČR, v. v. i.

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**

LS.

---

**Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.**  
děkan

---

**Doc. Ing. Josef Odehnal, Ph.D.**  
vedoucí katedry

## Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Můj největší dík patří panu doc. Ing. Stanislavu Němečkovi PhD. za jeho odborné vedení, cenné připomínky a velkou pomoc při zpracování této práce. Dále bych rád poděkoval mým kolegům ve firmě A. Pöttinger spol. s.r.o., kteří mi pomáhali a podporovali mě v mém úsilí. Poděkování také patří mé rodině v čele s mou manželkou, která mi byla po celou dobu studia velkou oporou.

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Bc. Hucek	<b>Jméno</b> František	
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie		
<b>VEDOUČÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Doc. Ing. Němeček PhD.	<b>Jméno</b> Stanislav	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU – FST – KMM		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Laserové svařování HSS plechů s větší tloušťkou stěny		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	85	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	48	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	37
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b> <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Standardně se laserové svařování používá pro tenké plechy. Diplomová práce bude řešit možnosti laserového svařování HSS plechů s mezí kluzu nad 500MPa se silnější stěnou (10 až 20 mm) za pomoci přídatného drátu. Kromě procesních parametrů bude řešen vliv přípravy svarové hrany na kvalitu svaru a jeho mechanické vlastnosti.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Laserové svařování, HSS ocel, svarová lázeň, úzká mezera, parametry, drát za studena, mikrostruktura, silný plech

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Bc. Hucek	<b>Name</b> František		
<b>STUDY PROGRAMME</b>	N0715A270014 Materials Engineering and Manufacturing Technology			
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> doc. Ing. Němeček PhD.	<b>Name</b> Stanislav		
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KMM			
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>	
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Laser welding of HSS sheets with thick wall			

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KMM	<b>SUBMITTED IN</b>	2023
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

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

<b>TOTALLY</b>	85	<b>TEXT PART</b>	48	<b>GRAPHICAL PART</b>	37
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION</b> <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	By default, laser welding is used for thin sheet metal. The thesis will address the possibilities of laser welding of HSS sheets with yield strength above 500MPa with thicker wall (10 to 20mm) using additional wire. In addition to the process parameters, the effect of weld edge preparation on the weld quality and its mechanical properties will be addressed.
<b>KEY WORDS</b>	Laser welding, HSS steel, Weld pool, Narrow gap, Parameters, Cold wire, Microstructure, Thick plate

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Obecné schéma optického rezonátoru [5] .....	17
Obrázek 2: Proces stimulované emise a) absorpce, b) spontánní emise, c) stimulované emise záření. [5] .....	18
Obrázek 3: Proces stimulované emise [6] .....	18
Obrázek 4: Závislost absorpce materiálu na vlnové délce záření [11].....	19
Obrázek 5: Srovnání emise záření běžného tepelného zdroje a laseru. [5].....	20
Obrázek 6: Popis pasu svazků a jeho parametrů. [5] .....	20
Obrázek 7: Lampami buzený Nd: YAG laser [7] .....	23
Obrázek 8: Diodami buzený Nd: YAG laser [7].....	23
Obrázek 9: Schéma diskového laseru [7].....	24
Obrázek 10: Princip vláknového laseru [7].....	25
Obrázek 11: Princip diodového laseru [7].....	25
Obrázek 12: Různé tvary teplotních cyklů v podhousenkové oblasti [9] .....	27
Obrázek 13: Porovnání geometrie různých svařovacích metod kovů v závislosti na hustotě výkonu [1] .....	28
Obrázek 14: Kondukční svařování (vlevo), Hluboké svařování „keyhole“ (vpravo) [12] .....	29
Obrázek 15: Příčné řezy svary plechu 10 mm na oceli S355 (vlevo) a korozivzdorné oceli (vpravo) s viditelným doplněním drátu do hlavy svaru [2].....	30
Obrázek 16: Svařovací proces laserhybrid- 1 laserový paprsek; 2 plynové hubice; 3 elektroda; 4 impulzní oblouk; 5 průvar [14] .....	30
Obrázek 17: Sestava komponent pro svařování laserem se studeným drátem (A) procesní vlákno s konektorem; (B) laserová svařovací hlava; (C) přívod přídavného drátu [15].....	31
Obrázek 18: Možná konfigurace procesu laserového svařování metodou „Cold wire“ [15]...	32
Obrázek 19: Makro řez svarovými housenkami s rozostřeným ohniskem [17].....	33
Obrázek 20: Vliv pozice laserového paprsku a drátu v úzké drážce [23] .....	34
Obrázek 21: Vzdálenost průsečíku laserového paprsku a drátu ke kořenu drážky ( $\Delta H$ ) [23].	35
Obrázek 22: a) $\Delta H=1$ mm; b) $\Delta H=3$ mm; c) $\Delta H=5$ mm; d) $\Delta H=7$ mm [23].....	35
Obrázek 23: Hustota a tepelná vodivost ochranných plynů Ar a He v závislosti na teplotě [18] .....	36
Obrázek 24: Tvorba plazmatu v ionizované atmosféře [19] .....	36
Obrázek 25: Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje [16].....	38
Obrázek 26: Výpočet tepelného příkonu [16, 20] .....	38
Obrázek 27: Průběh tvrdosti svarovým spojem pro obloukové metody svařování [16,20].....	39
Obrázek 28: Závislost tvrdosti oceli na obsahu uhlíku způsobená přítomností martenzitu [19] .....	39



Obrázek 29: Řez svary a) svar ALW, b) svar ultra-NGLW, c) svar GMWA [4] .....	41
Obrázek 30: Měření mikrotvrdosti napříč zkušebními svary [4] .....	42
Obrázek 31: Typické svarové vady při svařování plechů s větší tloušťkou na jednu vrstvu [22] .....	43
Obrázek 32: Geometrie s 1 mm širokou mezerou a 5 mm vysokým otupením pro svaření kořenové vrstvy [17].....	44
Obrázek 33: Geometrie bez kořenové mezery s 2 mm širokým otupením [22] .....	44
Obrázek 34: Výsledný kořenový svar: výkon laseru 2 kW, rychlost svařování 1,2 m.min <sup>-1</sup> , ohnisko leží na povrchu kořenové plochy [22] .....	45
Obrázek 35: Geometrie drážek použité při vícevrstvých zkouškách studeného přídavného drátu a odpovídající makrořezy svaru [17].....	45
Obrázek 36: Geometrie svaru Ultra-NGLW [4].....	46
Obrázek 37: Makro experimentálního svaru, svařeného do úzké mezery, laserem s přidávaným studeným drátem [4].....	47
Obrázek 38: Robotické pracoviště s šestiosým robotem FANUC a dvouosým polohovadlem	48
Obrázek 39: Diskový laser TruDisk o výkonu 4 kW od společnosti TRUMF .....	48
Obrázek 40: Úprava držáku hořáku pro přívod drátu a ochranného plynu až do hloubky drážky .....	49
Obrázek 41: Úprava držáku hořáku .....	50
Obrázek 42: Upnutí zkušebních dílů.....	50
Obrázek 43: Důsledek špatné upnutého svařence znamená stažení drážky pro svar.....	51
Obrázek 44: Schéma pohybového programu robota z bodu P [1] do bodu P[4] .....	51
Obrázek 45: Svařovací program pro provedení experimentu .....	52
Obrázek 46: Označování ocelí dle ČSN EN 10027-2 [25] .....	54
Obrázek 47: Dva základní režimy svařování LTL a LTA při svařování v poloze PA.....	55
Obrázek 48: Zkušební návarové housenky .....	56
Obrázek 49: Makro řez návarových housenek vzorek 1. režim LTL.....	56
Obrázek 50: Příprava drážek pro zkušební svary.....	58
Obrázek 51: Svařování do drážky o šířce 2,4 mm .....	58
Obrázek 52: Svařování do drážky o šířce 2 mm .....	59
Obrázek 53: Svařování do drážky o šířce 1,6 mm .....	60
Obrázek 54: Příklad provedení návarových housenek.....	61
Obrázek 55: Příprava pro svařování do drážek .....	61
Obrázek 56: Makrořezy svarů provedených do drážky .....	62
Obrázek 57: Makro výbrus vzorku d3 a d4 indikace pórů v souvislosti se staženinou na povrchu housenky.....	63

Obrázek 58: Zkušební svar d 1 do drážky 1,6 mm se změřeným průběhem mikrotvrdosti HV 0,5.....	63
Obrázek 59: Porovnání mikrotvrdosti u vzorků d2, d5 a d7 .....	64
Obrázek 60: Finální geometrie přípravy svarových ploch .....	65
Obrázek 61: Pořadí svarových vrstev a kompletně svažené vzorky T1 a T2 .....	65
Obrázek 62: Porovnání maker vzorku T1 (vlevo) a T2 (vpravo).....	67
Obrázek 63: Měření mikrotvrdosti vzorek T1 .....	68
Obrázek 64: Měření mikrotvrdosti vzorku T2 .....	68
Obrázek 65: T1-Oblast osy svaru zvětšeno 200x.....	70
Obrázek 66: Vzorek T1 – Oblast osy svaru zvětšeno 500x .....	71
Obrázek 67: Vzorek T1 zvětšeno 200x – Oblast přechodu mezi TOO a svarovým kovem ....	72
Obrázek 68: Vzorek T1 zvětšeno 500x – Oblast přechodu mezi TOO a svarovým kovem ....	73
Obrázek 69: Vzorek T2 zvětšeno 200x – oblast osy svaru .....	74
Obrázek 70: Vzorek T2 zvětšeno 200x – oblast přechodu mezi TOO a svarovým kovem .....	74
Obrázek 71: Vzorek T2 zvětšeno 500x – oblast přechodu mezi TOO a svarovým kovem .....	74
Obrázek 72: Vzorek T2 zvětšeno 200x – oblast přechodu mezi TOO a základním materiálem .....	75
Obrázek 73: Schéma rozměrů vzorku pro tahovou zkoušku dle normy ČSN EN ISO 4136 [28] .....	76
Obrázek 74: Graf z tahové zkoušky ze zkušebních vzorků svarů T1 a T2 .....	77
Obrázek 75: Lom vzorků T1 a T2 po zkoušce tahem – k lomu došlo vždy v základním materiálu .....	77
Obrázek 76: Příprava svarových ploch – a) pro laser s přídatným drátem, b) pro metodu MAG .....	78

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Základní rozdělení laserů [5] .....	21
Tabulka 2: Přehled používaných laserů v průmyslové výrobě [7].....	22
Tabulka 3: Srovnání parametrů svařování různých metod svařování [10] .....	28
Tabulka 4: Ohnisková poloha a její vliv na maximální rychlost podávání drátu ( $\varnothing$ 1 mm) a šířku housenky [17].....	33
Tabulka 5: Ionizační potenciál plynů ochranných atmosfér [19].....	37
Tabulka 6: Chemické složení základního materiálu S700 a přídavného materiálu Carbofil 2NiMoCr [4].....	41
Tabulka 7: Svařovací parametry Ultra-NGLW pro ocel S700 o tloušťce 13 mm [4].....	47
Tabulka 8: Chemického složení a mechanické vlastnosti přídavného drátu [24] .....	53
Tabulka 9: Chemické složení S355J2 dle ČSN EN 10025-2 [26] .....	54
Tabulka 10: Mechanické vlastnosti S355J2 dle ČSN EN 10025-2 [26] .....	54
Tabulka 11: Porovnání návarových housenek dle hloubky průvaru při výkonu laseru 4 kW .	57
Tabulka 12: Svařovací parametry pro drážku o šířce 2,4 mm .....	58
Tabulka 13: Svařovací parametry pro drážku o šířce 2 mm .....	59
Tabulka 14: Svařovací parametry pro drážku o šířce 1,6 mm .....	60
Tabulka 15: Svařovací parametry použité na volném povrchu plechu .....	61
Tabulka 16: svařovací parametry do zkušební drážky .....	62
Tabulka 17: Svařovací parametry pro vzorek T1 .....	66
Tabulka 18: Svařovací parametry pro vzorek T2.....	66
Tabulka 19: Výsledky tahové zkoušky .....	76

## Přehled použitých zkratk a symbolů

Veličina	Význam	Jednotka
$A_{5,65}$	tažnost se součinitelem proporcionality $k = 5,65$	[%]
Ac1	teplota	[°C]
Ac3	teplota	[°C]
Ag	stříbro	-
Al	hliník	-
ALW	svařování laserovým paprskem	-
Ar	argon	-
As	arsen	-
BM	základní materiál	-
BPP	beam parametr product	-
Br	brom	-
Cd	cadmium	-
CE	uhlíkový ekvivalent	-
CEV	Uhlíkový ekvivalent	-
CO2	oxid uhličitý	-
Cr	chrom	-
Cu	měď	-
CW	continuous wave	-
ČSN	česká státní norma	-
DPSS	diode pumped solid state	-
EN	evropská norma	-
Er	erbium	-
Fe	železo	-
Fe – $\alpha$	železo alfa – ferit	-
Fe – $\gamma$	železo gama – austenit	-
FL	ohnisková vzdálenost	[mm]
FZ	svarový kov	-
Ga	gallium	-
GMAW	gas metalarc welding	-
H <sub>2</sub>	vodík	-
HAZ	tepelně ovlivněná oblast	-
He	helium	-
HLAW	hybrid laser arc welding	-
HSS	high stress steel	-
HV	měření tvrdosti dle Vikerse	-
I	iod	-
I	svařovací proud	[A]
In	indium	-
ISO	mezinárodní organizace pro normalizaci	-

Kr	krypton	-
LPSS	lamp pumped solid state	-
M2	faktor kvality svazku	-
MAG	metal active gas	-
MIG	metal inert gass	-
Mo	molybden	-
$\eta$	koeficient účinnosti svařování	-
N <sub>2</sub>	dusík	-
Nd	neodym	-
Ne	neon	-
NGLW	Narrow gap laser welding	-
Ni	nikl	-
ns	nanosekunda	-
O	kyslík	-
PA	poloha svařování vodorovná z hora	-
Pb	olovo	-
PB	poloha svařování vodorovná šikmo z hora	-
PL	výkon laseru	[kW]
ps	pikosekunda	-
QCW	quasi – continuous wave	-
Qs	vnesené teplo	[kJ]
Re	mez kluzu	[MPa]
ReH	horní mez kluzu	[MPa]
ReL	dolní mez kluzu	[MPa]
Rm	mez pevnosti	[MPa]
Sb	antimon	-
Se	selen	-
Sn	cín	-
Ti	titan	-
TOO	tepelně ovlivněná oblast	-
TRIP	transformačně indukovaná plasticita	-
U	svařovací napětí	[V]
v	rychlost svařování	[mm.s-1]
v <sub>dr</sub>	rychlost podávání drátu	[cm/min]
v <sub>L</sub>	rychlost svařování	[m/min]
W0	poloměr pasu svazku a	-
Xe	xenon	-
YAG	yttrium aluminium garnet	-
Yb	ytterbium	-
Z	kontrakce	[%]
$\Delta t_{8/5}$	rychlost ochlazování z 800 na 500 °C	[s]
$\Theta$	polovina rozbíhavosti svazku	-

## Obsah

Seznam obrázků .....	8
Seznam tabulek .....	11
Přehled použitých zkratk a symbolů.....	12
Úvod.....	16
1 Laserové svařování.....	17
1.1 Laser a jeho principy .....	17
1.2 Lasery používané pro svařování .....	21
1.3 Porovnání laserového svařování s konvenčními metodami svařování.....	26
1.4 Laserové svařování bez přídavného materiálu .....	28
1.5 Laserové svařování s přídavným materiálem .....	29
2 Technologie laserového svařování se studeným přídavným drátem „Cold wire“ .....	31
2.1 Volba přídavného materiálu .....	31
2.2 Svařovací parametry .....	32
2.3 Vliv polohy ohniska laserového paprsku na odtavovací výkon přídavného drátu při svařování metodou „Cold wire“ do úzké mezery.....	32
2.4 Vliv polohy laserového paprsku a drátu v úzké drážce .....	34
2.5 Vliv polohy průřezu laserového paprsku a přídavného drátu v úzké drážce na stabilitu a tvorbu svarové lázně.....	34
2.6 Vliv ochranné atmosféry na laserové svařování.....	36
3 Svařování vysokopevných HSS ocelí s větší tloušťkou stěny .....	37
3.1 Chování jemnozrnných ocelí při konvenčním svařování obecně.....	38
3.2 Chování vysokopevných HSS ocelí s větší tloušťkou stěny při svařování laserem..	41
4 Příprava svarových ploch pro svařování silných plechů metodu „Cold wire“ .....	43
4.1 Vliv šířky mezery na kvalitu provedení kořenové vrstvy.....	44
4.2 Geometrie „V“ svaru svařeného metodou Cold wire .....	45
4.3 Svařování vícevrstvého svaru laserem s přídavným studeným drátem do úzké mezery	46
5 Úprava a konfigurace pracoviště pro experimentální část .....	48
5.1 Svařovací program.....	51
6 Experimentální část .....	53
6.1 Rozbor přídavného a základního materiálu .....	53
6.2 Provedení zkušebních návarových housenek na volný povrch .....	55
6.3 Svařování do drážky .....	57
6.4 Zopakování první a druhé fáze experimentu .....	60

6.5	Provedení kompletních zkušebních svarů .....	65
6.6	Vyhodnocení výsledků experimentálních svarových spojů .....	67
6.6.1	Popis výsledné makrostruktury .....	67
6.6.2	Měření mikrotvrdosti finálních vzorků T1 a T2.....	68
6.6.3	Popis výsledné mikrostruktury.....	70
6.6.4	Provedení tahové zkoušky.....	76
6.6.5	Porovnání spotřeby přídavného materiálu a rychlosti svařování s obloukovou metodou MAG na jeden metr svaru .....	78
7	Závěr a diskuze.....	79
	Seznam použitých zdrojů .....	82
	Příloha č. 1.....	85

## Úvod

Ocel s větší tloušťkou stěny než 10 mm je často používaná pro konstrukční aplikace, jako jsou mosty, lodě, konstrukce nosníků, rámu, ale třeba i pro potrubí v energetice atd. Konvenční obloukové metody svařování jsou nejrozšířenější pro tavné spojování takovýchto druhů konstrukcí, a to zejména díky nižším investičním nákladům a své spolehlivosti. Nyní začínají být tyto konvenční metody svařování postupně nahrazovány právě laserovým svařováním, které se progresivně vyvíjí, ať už to bez přídavného materiálu anebo s přídavným materiálem. Nespornými výhodami laserového svařování je vysoká rychlost svařování, která se pohybuje řádově v metrech za minutu, právě díky vysoké hustotě výkonu, která se při svařování pohybuje v rozsahu  $10^4$ - $10^8$  [W/cm<sup>2</sup>] [1], tím se tvoří i velice úzká tepelně ovlivněná oblast a vysoce kvalitní svar s dobrými mechanickými vlastnostmi.

Svařování plechů laserem s větší tloušťkou (nad 10 mm) čistě jen laserovým paprskem má několik omezujících faktorů. Tímto faktorem je hlavně citlivost na různé nedokonalosti přípravy svarových ploch, ale také vysoká tvrdost svarových spojů vlivem rychlého ochlazování a velkého odvodu tepla přes základní silnostěnný materiál. Tyto omezení by mohlo zlepšit právě svařování laserem s přídavným materiálem. [2]

Stále více výzkumů se věnuje možnosti svařovat silné materiály vícevrstevným laserovým svařováním s přídavným drátem, které umožňuje svařovat velmi silné tloušťky plechů i s omezeným výkonem laseru. Elmesalamy a kol. [3] uvedli, že nerezové oceli 316L s různou tloušťkou byly svařeny laserovým paprskem o výkonu 1 kW s přídavným drátem a zjistili, že kvalitní vícevrstvý svar lze svařit při použití geometrie svarů do X-drážky i V-drážky. Dále Guo a kol. [4] úspěšně svařili ocel S960 o tloušťce 8 mm a ocel S700 o tloušťce 13 mm pomocí vícevrstvého laserového svařování s ultra úzkou mezerou širokou pouze 1,4 mm s přídavným drátem, a to s výkonem laseru pouze 3 kW. Vysoká cena vysoce výkonných laserů mnoho firem odrazuje, a proto svařování za použití laserových zdrojů s nižšími výkony (např. do 6 kW) by mohlo být pro řadu firem ekonomicky zajímavé a dostupné řešení. Mohlo by se tak docílit zvýšení efektivity a produktivity v oblasti svařování. [3, 4]

Velký potenciál by mohlo mít svařování tlustých plechů laserem pouze z jedné strany, a to z důvodu jednoduchosti a přípravy svarových ploch a bez nutnosti otáčení sestavených dílů, ale i tam, kde je omezený přístup, např. při svařování velmi tlustých desek do úzké mezery nebo orbitální svařování potrubí. Jednostranné svařování tlustších materiálů s plným průvarem (ať už to jednovrstvé nebo vícevrstvé) však často způsobuje nedokonalosti, jako je neprovaření kořene nebo jeho protečení a další vady ve svarovém spoji jako jsou póry a jiné nečistosti. A právě příčiny vzniku těchto nedokonalostí je třeba více prozkoumat a popsat.

V této práci budou řešeny možnosti laserového svařování plechů z oceli s vyšší pevností S355J2 (nad 500MPa) a s tloušťkou stěny 20 mm za pomoci přídavného studeného drátu. Bude řešena konfigurace pracoviště, svařovací parametry, bude zkoumána makro a mikrostruktura svarového spoje a budou také zkoumány mechanické vlastnosti jednotlivých vzorků.



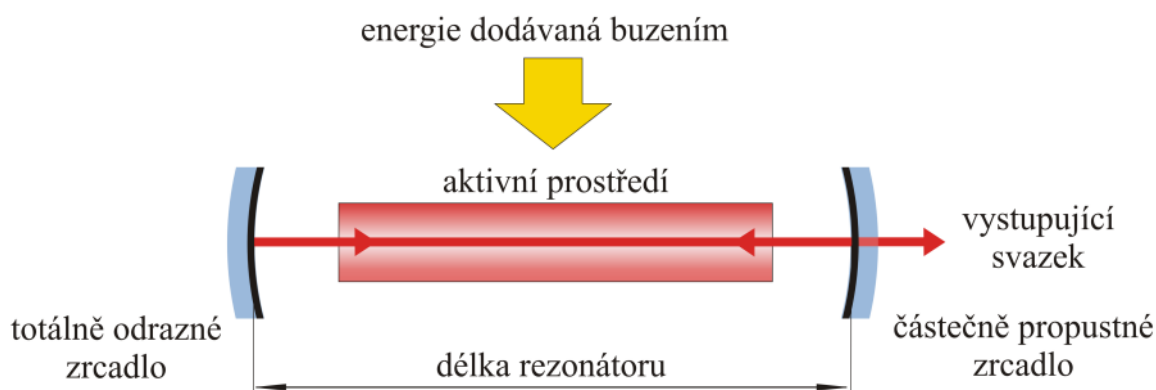
# 1 Laserové svařování

Laserové svařování patří mezi metody tavného svařování. S touto metodou je možné svařovat kovové i nekovové materiály. Laserem se svařuje bez přídavného materiálu, nebo s přídavným materiálem. Při svařování laserem se může, ale také nemusí, používat ochranná atmosféra, to záleží na druhu svařovaného materiálu a na jeho reakci s okolní atmosférou a jejími škodlivými prvky jako je kyslík, dusík a vzdušná vlhkost [1]

## 1.1 Laser a jeho principy

Laser je optický zdroj elektromagnetického záření. Světlo je z laseru vyzařováno ve formě úzkého světelného svazku paprsků. Na rozdíl od světla z přirozených zdrojů je koherentní a monochromatické. Z toho vyplývá, že laser je optický zdroj energie, ve formě emitovaných fotonů, která je fokusovaná jako koherentní a monochromatický paprsek. Princip laseru využívá zákonů kvantové mechaniky a termodynamiky. [5]

Obecné schéma laserového optického rezonátoru je zobrazeno na obrázku 1. Základem laseru je aktivní prostředí, které je buzeno různými způsoby, jako např. opticky, elektricky nebo jinak. Buzením je dodávána energie, která je pomocí procesu stimulované emise vyzářena v podobě laserového svazku. K tomu je zapotřebí právě tzv. optický rezonátor, který je nejčastěji tvořen odraznými zrcadly. [6]

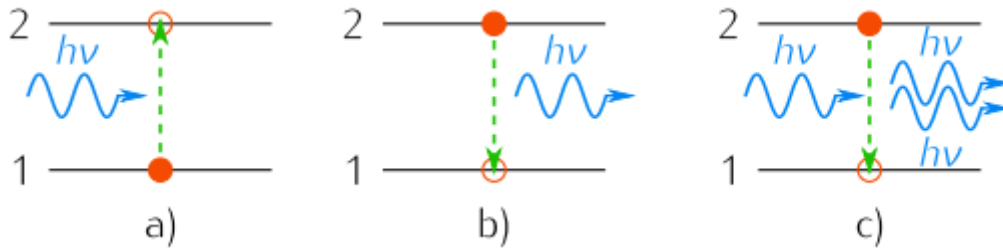


Obrázek 1: Obecné schéma optického rezonátoru [5]

Aktivní prostředí je látka, složená z molekul a atomů, které obsahují oddělené kvantové energetické hladiny elektronů. Jako aktivní látka je nejčastěji využíván plyn ( $\text{CO}_2$ ), monokrystal, polovodičová dioda s p-n přechodem atd. A právě v atomech těchto aktivních látek dochází při přechodu elektronu z vyššího do nižšího energetického stavu k vyzáření fotonu (kvantum elektromagnetického záření). Tento zářivý přechod se děje spontánně sám od sebe, protože v přírodě má každý prvek snahu být ve stavu s co nejnižší energií, tedy ve stavu termodynamické rovnováhy. A právě díky buzení se tento stav poruší a převede aktivní prostředí do excitovaného stavu, kdy je většina prvků ve stavu s vyšší energií, tento stav se nazývá inverze populace. [6]

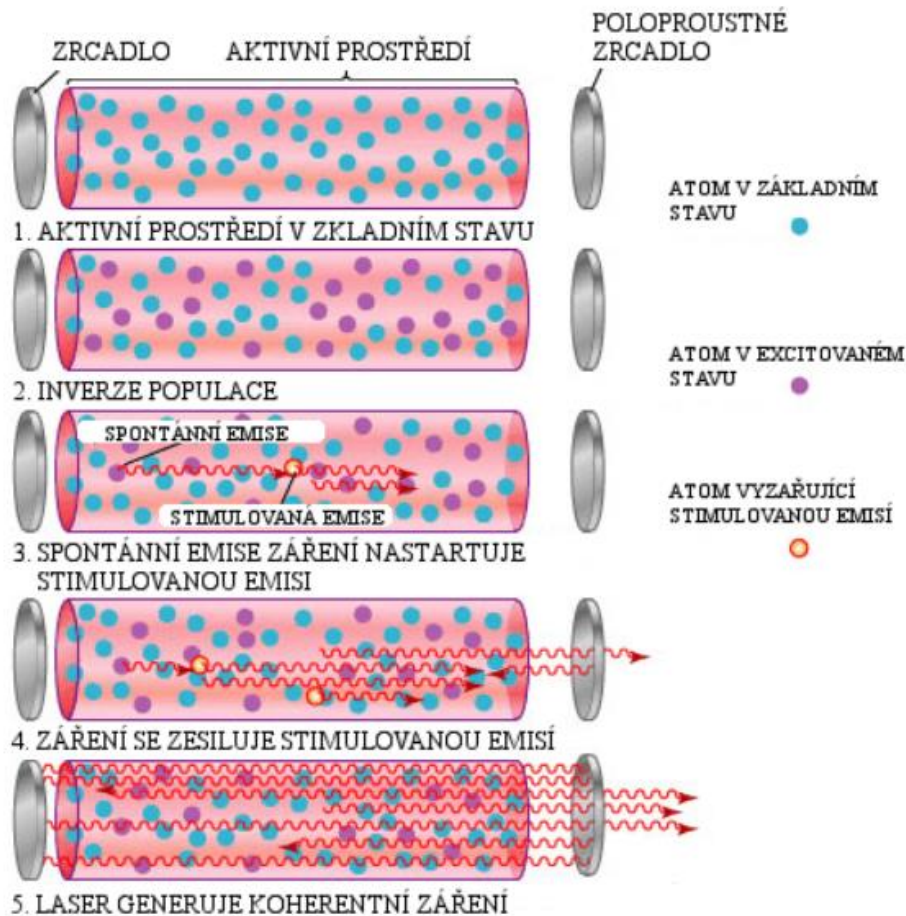
Teprve v tento okamžik se může energie dodaná aktivnímu prostředí přeměnit na laserový svazek (proud fotonů) pomocí procesu stimulované emise, který je zobrazen na obrázku 2. Jedná se v podstatě o lavinovitý efekt, kdy foton dopadající na excitovaný atom

způsobí (stimuluje) přechod jeho elektronů z horní na dolní energetickou hladinu a při tom vždy dojde k emisi dalšího fotonu. [6]



Obrázek 2: Proces stimulované emise a) absorpce, b) spontánní emise, c) stimulované emise záření. [5]

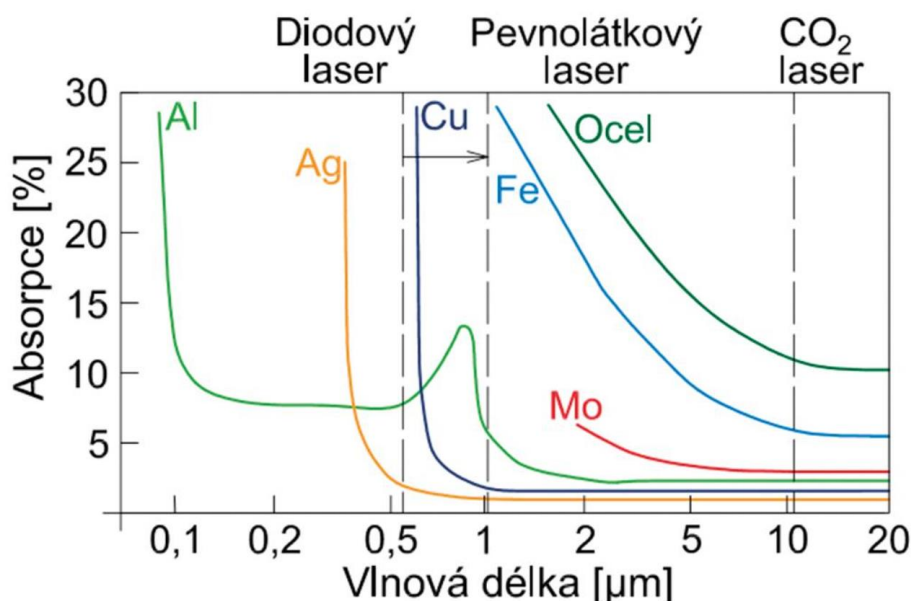
Při pohybu fotonů rezonátorem od jednoho zrcadla k druhému, roste rapidně jejich počet a dochází tak k lavinovitému efektu a uvolnění energie v podobě proudu fotonů, které tvoří výsledný laserový svazek (viz. obr. 3). [6]



Obrázek 3: Proces stimulované emise [6]

## Interakce laserového paprsku s různými druhy materiálů [1]

Interakce laserového záření s materiálem je obdobná jako u svařování svazkem elektronů, s tím rozdílem, že zde nedochází k přeměně kinetické energie na tepelnou. Při dopadu proudu fotonů na povrch materiálu dochází ke zvyšování frekvence vibrační mřížky a tím je zvyšována teplota materiálu. Energie laserového paprsku, který dopadá na povrch, se částečně odráží, pouze část energie je pohlcena a využita pro ohřev materiálu a zároveň velmi malá část materiálem prochází. Absorpce energie pro ohřev výrazně závisí na teplotě povrchu ozařovaného materiálu a vlnové délce paprsku (viz. obr. 4). Pohlcená část záření proniká do povrchové vrstvy materiálu, přičemž hloubka průniku závisí na výkonu zdroje, vodivosti materiálu a frekvenci záření. [1]



Obrázek 4: Závislost absorpce materiálu na vlnové délce záření [11]

## Vlastnosti laserového svazku [6, 1]

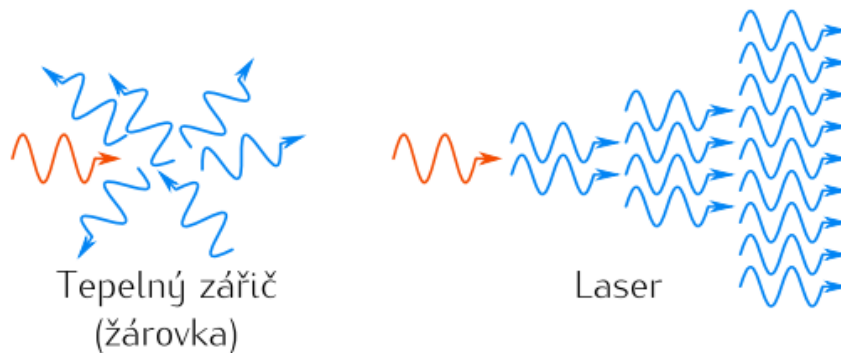
Při procesu stimulované emise má dopadající a emitovaný foton stejnou energii (frekvenci), stejný směr, polarizaci a fázi. Z toho plynou základní vlastnosti laseru, které ho odlišují od jiných zdrojů záření, ale má i další vlastnosti. [6, 1]

Svazek laseru je:

1. Kolimovaný (tj. nerozbíhá se)
2. Monochromatický („jednobarevný“, tj. generované fotony mají stejnou frekvenci, resp. vlnovou délku)
3. Koherentní (generované fotony jsou tzv. ve fázi jak časové, tak prostorové)
4. Má vysokou hustotu výkonu v dopadové ploše až  $10^{13} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ , pro svařování se používá rozsah výkonu  $10^4$  až  $10^8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$  a pro dělení materiálů  $10^{10} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ [5]
5. Svazek fotonů nemá elektrický náboj, a tudíž není ovlivňován magnetickým polem, což umožňuje svařovat i ve velmi úzkých mezerách a spárách.
6. Výkon se dá velmi přesně dávkovat a reprodukovat
7. Svazek fotonů lze soustředit na velmi malou plochu až  $10 \mu\text{m}$ .

Díky těmto vlastnostem je laser používán u mnoha různých aplikací. U průmyslových aplikací se využívá zejména možnosti fokusovat svazek laseru do malého bodu a dosáhnout tak

vysoké plošné hustoty energie, která je potřebná pro danou výrobní operaci jako je řezání, svařování, značení, kalení a podobně. V jiných aplikacích, jako je např. holografie, je zapotřebí hlavně vlastnosti koherence atd. [6, 1]

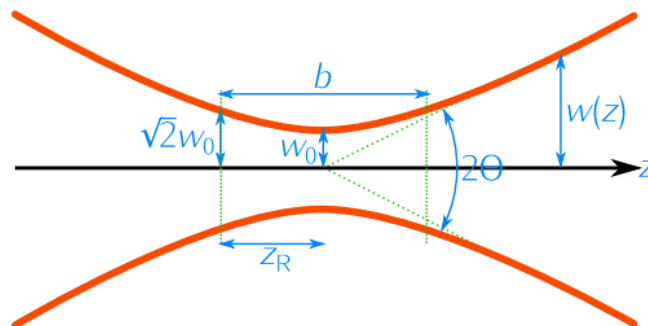


Obrázek 5: Srovnání emise záření běžného tepelného zdroje a laseru. [5]

Důležitým parametrem při volbě laseru pro konkrétní aplikaci je kvalita jeho svazku. Pro každou aplikaci se hodí jiná kvalita laserového paprsku, například pro povrchové kalení je vhodné mít široký paprsek, a naopak pro dělení materiálů je zase důležitý paprsek úzký a vysoce fokusovaný. Mírou kvality laserového svazku je jeho schopnost být fokusován. Pro kruhově symetrické svazky ji kvantitativně definuje veličina **Beam Parameter Product** (BPP), kterou je možné vyjádřit takto:

$$\mathbf{BPP} = W_0\Theta,$$

kde  $W_0$  je poloměr pasu svazku a  $\Theta$  je polovina divergence (rozbíhavost) svazku (viz. obr. 6). [5]



Obrázek 6: Popis pasu svazků a jeho parametrů. [5]

Divergence svazku je úměrná jeho vlnové délce  $\lambda$  a je vyjádřena takto:

$$\Theta = M^2 \frac{\lambda}{\pi W W_0}$$

kde  $M^2$  je faktor kvality svazku a je vyjádřen takto:

$$M^2 = \frac{BPP}{\frac{\lambda}{\pi}} = \frac{\pi}{\lambda} BPP \text{ nebo } BPP = \frac{\lambda}{\pi} M^2$$

Pro Gaussovské svazky  $M^2 = 1$ , pro ostatní  $M^2 > 1$ .  $M^2$  vyjadřuje kvalitu svazku jako poměr BPP tohoto svazku a BPP Gaussovského svazku stejné vlnové délky, tedy, čím větší je vlnová délka záření, tím obtížnější je jeho fokusace, dosahuje vyššího BPP, a tedy nižší kvality. [5]

## 1.2 Lasery používané pro svařování

Lasery je možné dělit podle různých kritérií, například podle typu aktivního prostředí, vlnové délky, pracovního režimu, způsobu buzení, výkonu, účelu a dalších parametrů. Přehled tří základních způsobů rozdělení laserů uvádí tabulka 1 [5]

<b>1. Podle typu aktivního prostředí:</b>	
plynové	<i>atomární: He-Ne, He-Cd, Cu, I</i>
	<i>iontové: Ar, Kr</i>
	<i>molekulární: CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub></i>
	<i>excimerové: XeBr, KrO, ArO</i>
pevnolátkové	<i>Nd: YAG, Nd:sklo, Er:YAG, Yb:YAG, Ti:safír, rubínový</i>
diodové	<i>GaAs, GaN, PbSnSe, InAsSb</i>
kapalinové	<i>na bázi organických barviv: coumarin, fluorescein, cyanin, rhodamin, oxazine</i>
<b>2. Podle vlnové délky:</b>	
infračervené	<i>(780 nm – 1 mm)</i>
emitující ve viditelné oblasti	<i>(360–780 nm)</i>
ultrafialové	<i>(10–360 nm)</i>
<b>3. Podle režimu práce:</b>	
kontinuální	<i>(nepřetržitá generace záření)</i>
pulsní	<i>(ns, ps, fs pulsy s vysokou opakovací frekvencí)</i>
impulsní	<i>vysoce energetické pulsy s nízkou opakovací frekvencí</i>

**Tabulka 1: Základní rozdělení laserů [5]**

Pro svařování kovů se používají hlavně 3 typy laserů: Nd: YAG, vláknový a diskový laser. Tyto lasery mají vlnovou délku cca. 1000 nm a patří k tzv. pevnolátkovým laserům. Aktivní prostředí tvoří YAG krystal (yttrium aluminium granát), dopovaný ionty neodymu (Nd) nebo ytterbia (Yb). Hlavní rozdíl mezi těmito typy laserů je v uspořádání aktivního prostředí, u Nd: YAG laseru je aktivní prostředí tyčinka (délka 15-20 cm, průměr cca. 1 mm), u diskového je to tenký disk (průměr 10 mm, tloušťka 0,25 mm). U vláknového laseru je to dlouhé optické vlákno (délka cca. 1 m, průměr 50-300 μm). Velikou výhodou pro instalaci těchto tří typů laserů je možnost vést jejich záření flexibilním optickým vláknem, což velmi usnadňuje vedení záření z laseru do místa procesu. [7]

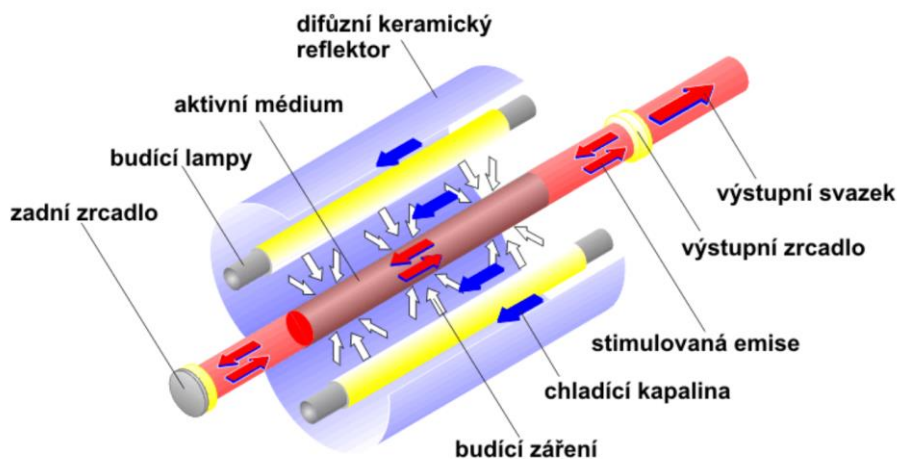
Pro ucelení informace jsou v tabulce 2 uvedeny další typy laserů a jejich parametry, které se využívají v průmyslové výrobě.

Lasery [vlnová délka]	Buzení	Efekt.	Režim	Výkon/Energie	Typické aplikace	Životnost (h)
Nd: YAG [1064]	laserová dioda	~7 %	CW	až 6 kW	řezání, svařování	~10 000
			Pulsní	~100 W	značení, gravírování	
	lampa	~3 %	Pulsní	~600 W	svařování, kalení	~1 000
CO <sub>2</sub> [10 600]	radiofrekvenční buzení	~10 %	CW/ pulzní	10–250 W	značení, gravírování, řezání nekovových mat.	20000
				až 5 kW	řezání, svařování	
	el. výboj	~25 %		až 20 kW průtočné	řezání, svařování	pokud je plyn neomezená
Diskový [1070]	laserová dioda	~15 %	CW	až 16 kW	řezání, svařování	~10 000
Vláknový [1070]	laserová dioda	~30 %	CW	až 80 kW	řezání, svařování	~100 000
			QCW	~1,2 kW	značení, gravírování, mikroobrábění	
			Pulzní	~100 W	značení, gravírování, mikroobrábění	
Diodový [808– 980]	el. výboj	~60 %	CW	až 10 kW	svařování, kalení, nanášení vrstev	~15 000

Tabulka 2: Přehled používaných laserů v průmyslové výrobě [7]

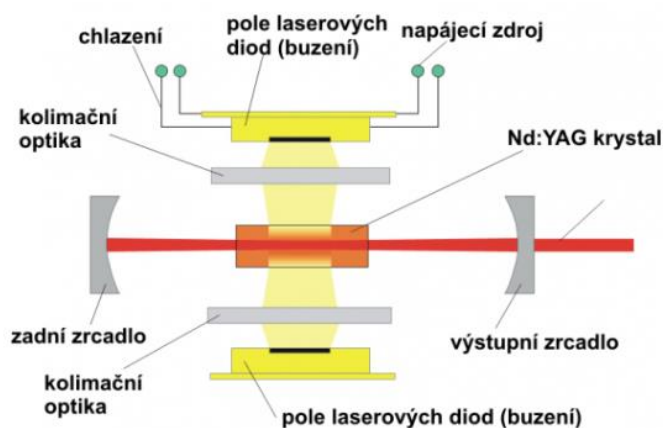
### Pevnolátkové lasery Nd: YAG [7]

Tento typ je historicky nejstarší nasazený laser v průmyslu. Používají se buzené opticky, a to buď kryptonovými výbojkami (LPSS – lamp pumped solid state) viz obr. 7, nebo laserovými diodami (DPSS – diode pumped solid state) viz obr. 8.[7]

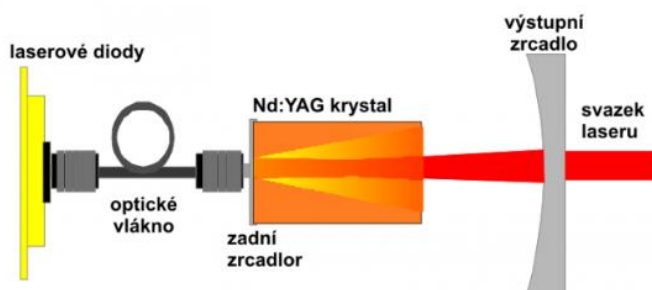


Obrázek 7: Lampami buzený Nd: YAG laser [7]

Aktivní prostředí je pevná látka, nejčastěji monokrystal (tyčinka). Typickým představitelem je Nd: YAG (prostředí je monokrystal ytrium aluminium granátu dopovaného atomy neodemu). Využití v průmyslu je hlavně pro laserové řezání, značení a svařování. Nevýhodou těchto laserů je nízká účinnost, velké nároky na chlazení, vysoké provozní náklady a krátká životnost výbojek (~1000 h). [7]



Diodami buzený Nd:YAG laser



Diodami buzený Nd:YAG laser se zadním buzením (end-pumped)

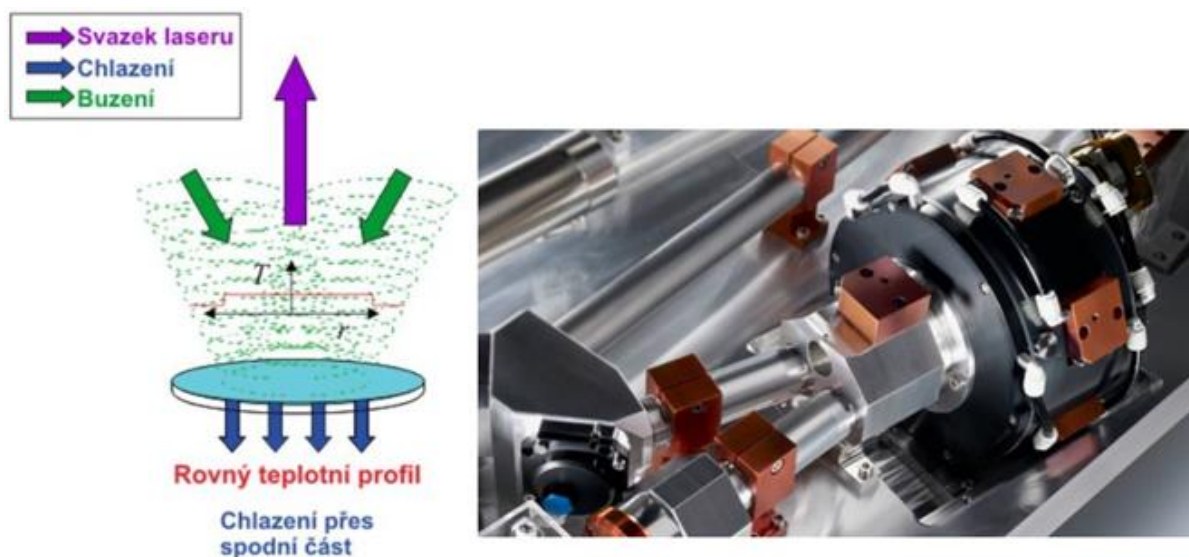
Obrázek 8: Diodami buzený Nd: YAG laser [7]

V případě DPSS Nd: YAG laserů se rozlišují dva hlavní typy buzení dle uspořádání rezonátoru – boční (transversální) buzení a zadní buzení (tzv. end-pumped). U zadního buzení se budící zařízení z laserových diod vede do YAG krystalu optickým vláknem (pozor nejedná se zde o vláknový laser, je to dost častý omyl). Výhodou je, že diody tak mohou být externě mimo rezonátor. Pokud porovnáme boční a zadní buzení, pak u zadního buzení je dosahováno lepší kvality svazku, ale nižších výkonů, u bočního buzení lze naopak dosáhnout vyšších výkonů, ale nižší kvality svazku. DPSS Nd: YAG lasery se používají hlavně v tzv. Q-spínaném pulzním režimu, kdy laser generuje velmi krátké pulsy v řádech nanosekund a průměrný výkon se pohybuje do 100 W. Hlavní použití je pro značení a gravírování kovů, plastů a dalších materiálů. V porovnání s LPSS lasery je zde vyšší účinnost, delší životnost a menší nároky na chlazení.

**Používání těchto laserů nicméně již několik let silně klesá. Nd: YAG lasery je už zastaralá technologie, která je v oboru svařování nahrazována vláknovými pulzními lasery, diodovými a diskovými lasery, které nabízejí více výkonu a jiných výhod [7]**

### Diskový laser [7]

Diskový laser je moderní technologie, kterou vyvíjí především firma TRUMPF. Princip je obdobný jako u Nd: YAG laseru, ale zde aktivní prostředí tvořeno malým diskem. Výhodou tohoto prostředí je rovný teplotní profil rozložený po celém disku, který umožňuje dosahovat vysokých výkonů (až 16 kW) a to s dobrou kvalitou výstupního svazku. Používá se zejména pro výkonově náročné operace, jako je svařování a řezání kovů. Nevýhodou diskových laserů je menší účinnost (15-20 %) a nižší životnost než u laserů vláknových. Schéma diskového laseru je znázorněno na obrázku 9. [7]



Obrázek 9: Schéma diskového laseru [7]

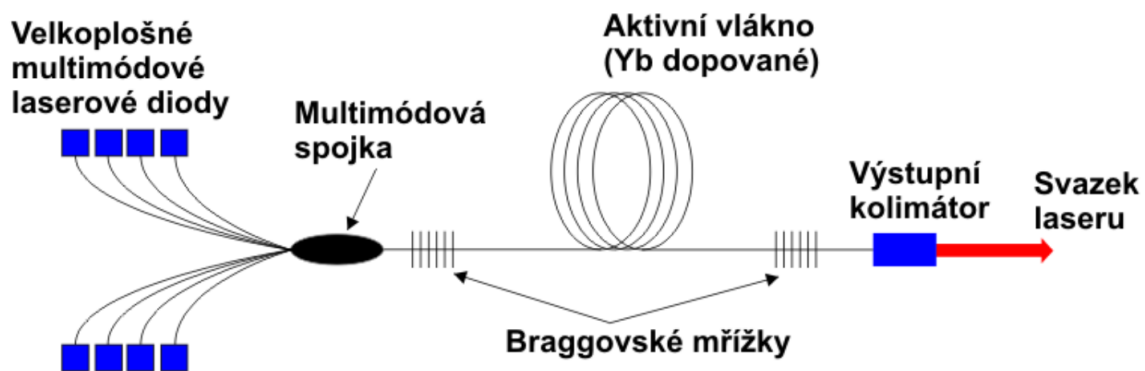
### Vláknové lasery [7]

Vláknový laser (obr. 10) je nyní nejmodernější typ pevnolátkového laseru, aktivním prostředím je zde dlouhé optické vlákno, které je dopované ytterbiem. Buzení zde zajišťují laserové diody a je vedeno přes optickou spojku do aktivního vlákna a namísto zrcadel jsou zde tzv. Braggovské mřížky, což jsou struktury vytvořené přímo na optickém vlákne. Vlákno je pak ukončeno optickým kolimátorem. [7]



Vláknové lasery jsou dále děleny podle pracovního režimu na kontinuální (CW), pulsní nebo kvazipulsní (QCW). Hlavní výhodou vláknového laseru je jeho jednoduchost, kdy celý laser tvoří vlastně optické vlákno. Robustnost a modularita, která je u těchto laserů unikátní, kdy je laser tvořen tzv. laserovými moduly, jejichž spojováním se může postupně navyšovat výkon (dnes až 100 kW). [7]

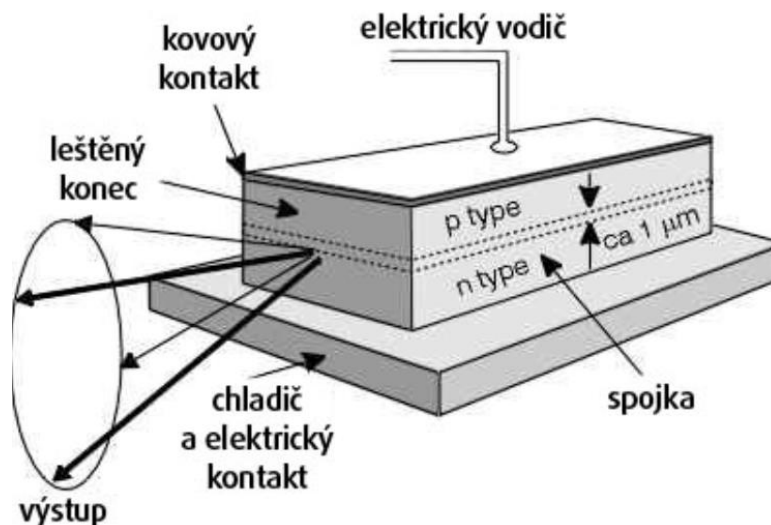
Dalšími výhodami jsou zejména vysoká účinnost (30-35 %), vysoká životnost (až 100 000 hodin), dále malé prostorové nároky, vysoká kvalita laserového svazku, a v neposlední řadě nejnižší provozní náklady ze všech uvedených typů a téměř nulové nároky na údržbu. Nevýhodou může být velmi vysoká pořizovací cena. Dominantním světovým výrobcem vláknových laserů je firma IPG Photonics, mezi další patří GSI JK Lasers, RoFin, SPI Lasers Trumpf a další. [7]



Obrázek 10: Princip vláknového laseru [7]

### Diodové lasery [7]

Základem diodového laseru je elektricky čerpaná polovodičová dioda, která slouží jako aktivní prostředí (viz. obr. 11). Výkon diodových laserů se pohybuje od mW až do kW. Diodové lasery mají vysokou účinnost, ale nevýhodou je nízká kvalita výstupního svazku. Protože mohou mít miniaturní rozměry a nízký výkon, tak jsou a používány např. v CD/DVD přehrávačích, laserových tiskárnách apod. Diodové lasery s vysokým výkonem se v praxi používají hlavně pro svařování kovů, plastů a pro kalení. [7]



Obrázek 11: Princip diodového laseru [7]

### 1.3 Porovnání laserového svařování s konvenčními metodami svařování

Při laserovém svařování se do materiálu vnáší podstatně méně tepla než při konvenčním svařování, to už bylo ve studiích prokázáno. Díky tomu vzniká velmi úzká TOO a výsledné zhrubnutí zrna v TOO je rovněž daleko nižší. Při laserovém svařování vysokopevných ocelí (DOCOL 1200, TRIP oceli) je pevnost laserových svarů vyšší než u obloukových svarů. Laserem svařené svary vždy vykazují vyšší tvrdost než u obloukových svarů. Je způsobeno rychlým odvodem tepla, rychlým ochlazováním svarového kovu, a právě při tom vznikají ve svarovém spoji martenzitické struktury, které tu vyšší tvrdost způsobují. [8]

Jak bylo uvedeno výše, díky nízkému množství vneseného tepla je šířka TOO při laserovém svařování výrazně menší než u obloukových svarů. Důsledkem je, že pevnost základního materiálu zůstává zachována a tažnost vykazuje pouze mírné snížení. Kdežto u svarů svařovaných elektrickým obloukem v ochranné atmosféře, pevnost výrazně klesá a velikost TOO je až 10x větší než u laserových svarů a struktura takového svaru je velmi hrubá. [8]

Tvrdost laserových svarů, provedených pouze laserovým paprskem bez přídavného materiálu, bývá vyšší díky většímu teplotnímu gradientu a rychlejšímu odvodu tepla. U laserem svařovaných spojů jsou hodnoty tvrdosti ve svaru a TOO vyšší než u základního materiálu. Oproti tomu, svary svařované obloukovou metodou v ochranné atmosféře mají prokazatelně širší odpevněnou oblast v TOO, ve které potom hrozí vznik trhlin při větších namáháních. [8]

Velké rozdíly v chování svarů například u TRIP oceli (jedná se o nízkolegovanou vysokopevnostní ocel s 0,19 % C, 1,5 % Mn a 1,9 % Si), svařenou různými metodami svařování, jsou nejvíce patrné u zkušebních vzorků v tahu. Laserové svařování má minimální dopad na materiál v okolí svaru. Lomy u svarů provedených laserem vyskytují mimo svar a mimo TOO. Plastická deformace je znatelná po celé délce zkušební tyče. Pevnost laserových svarů bývá o něco vyšší než u základního materiálu. Tažnost bývá zhruba poloviční než u základního materiálu. Při opětovném srovnání laserových svarů, se svary provedenými obloukovou metodou v ochranné atmosféře na této TRIP oceli, selhávají tyto svary na rozhraní mezi základním materiálem a TOO. Tažnost svaru se pohybuje okolo 5 % a jeho mez pevnosti v tahu je výrazně nižší než u základního materiálu. [8]

Tedy při srovnání laserového svařování s konvenčními metodami svařování, jako jsou obloukové metody svařování, má svařování laserem jisté výhody, které jsou níže shrnuty.

#### **Výhody svařování laserem oproti konvenčním svařovacím metodám:**

- vysoká rychlost svařování (v m.min<sup>-1</sup>)
- úzká geometrie svaru
- úzká tepelně ovlivněná oblast
- nízké deformace svařence
- nízké ovlivnění základního materiálu
- při správném provedení vysoká kvalita svarového spoje
- výborné mechanické vlastnosti svarového spoje

Laserové svařování nemá jen výhody, ale má také i některé nevýhody oproti konvenčním způsobům svařování, které jsou shrnuty níže.

### Nevýhody laserového svařování oproti konvenčním svařovacím metodám:

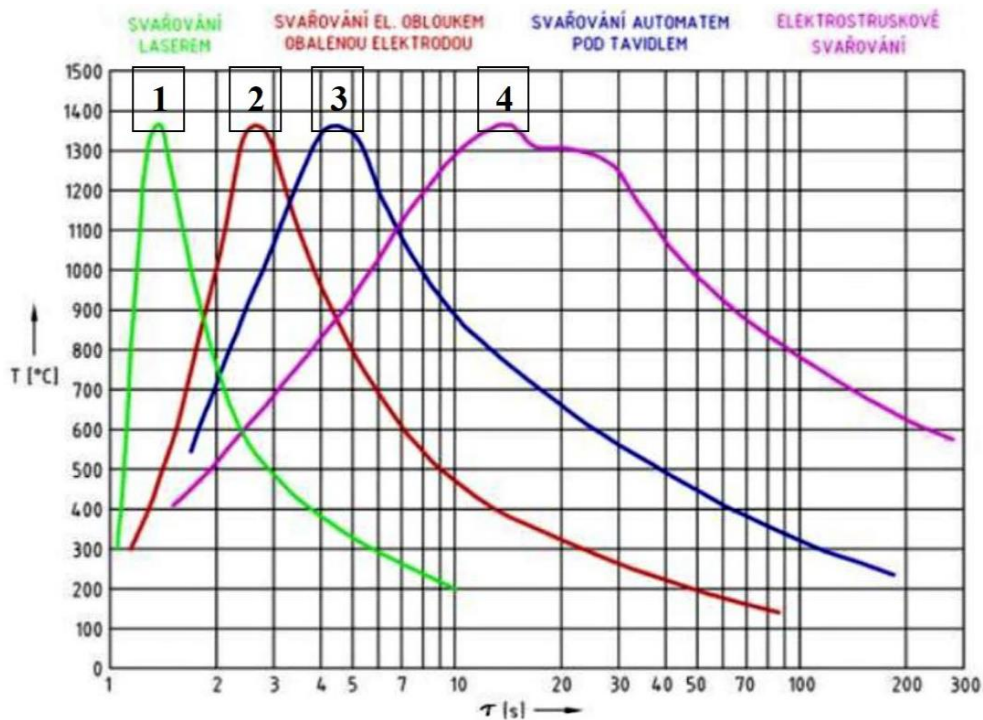
- požadavek na přesnost přípravy svarových ploch a sesazení svařovaných materiálů
- náchylnost k tvorbě tvrdých svarových spojů
- náchylnost k tvorbě vad ve svarovém spoji a kořenové části
- vysoké vstupní náklady
- často nutná automatizace z důvodu nutnosti přesného vedení svařovacího hořáku, ruční laserové zdroje se také používají, ale je zapotřebí velká zručnost svářeče pro vytvoření kvalitního svaru

### Srovnání svařování laserovým paprskem se svařováním s elektronovým paprskem

Laserové svařování v porovnání se svařováním elektronovým paprskem je, co se týká kvality svarů, srovnatelné. Mají obdobnou geometrii svarového spoje. Elektronové svařování dokáže dosáhnout ještě větších průvarů, a ještě užších svarových spojů. Náklady na elektronové svařování jsou ještě o řád vyšší než vstupní náklady pro laserové svařování. To se týká hlavně zařízení pro vytvoření podmínek pro svařování, jelikož je potřeba vytvořit vysoké vakuum až  $5 \cdot 10^{-4}$  [Pa] a dále zařízení pro polohování a upínání svařence ve vakuové komoře. [1]

### Srovnání teplotních cyklů laserového svařování s konvenčními metodami svařování

Na obrázku 12 jsou zobrazeny průběhy tepelných cyklů různých metod svařování. Při porovnání těchto údajů je patrné, že při laserovém svařování dochází k velice rychlému ohřevu svařence, ale zároveň i k velmi rychlému ochlazení. Právě vysoká rychlost ochlazování umožňuje vznik martenzitických nebo bainitických struktur, které následně ovlivňují mechanické vlastnosti svaru. Pomalé ochlazování jako je například při svařování pod tavidlem naopak může vést k hrubnutí zrna v TOO a tím i k odpevnění této oblasti, ve které potom hrozí vznik trhlin. [4]

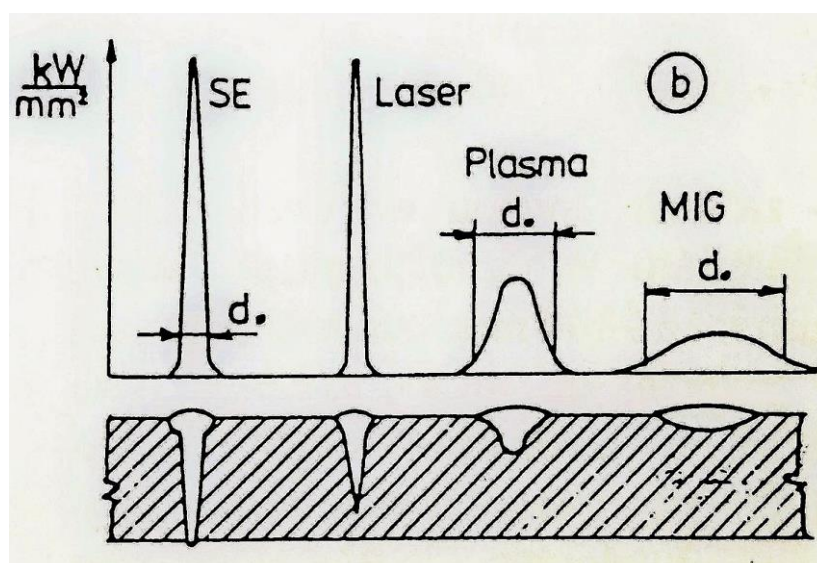


Obrázek 12: Různé tvary teplotních cyklů v podhousenkové oblasti [9]

Na závěr srovnání metod svařování, jsou v tabulce 3 porovnány hustoty energií jednotlivých metod svařování, které jsou prakticky zodpovědné za typické geometrie svarů, které jsou znázorněny na obrázku 13. Zde lze učinit závěr, že čím je energie koncentrovanější a má vyšší hustotu, tak tím je geometrie svaru užší a hlubší. [1]

Metoda	Hustota energie [W.cm <sup>2</sup> ]	Hloubka průvaru [mm]	Šířka / hloubka svaru [mm]	Svařovací rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]
Laser	10 <sup>4</sup> –10 <sup>9</sup>	25	0,1 – 0,5	až 10
Plamen	10 <sup>3</sup>	3	3	0,01
El. Oblouk	10 <sup>4</sup>	4	2	0,5 – 3
Plasma	10 <sup>6</sup>	až 12	1	0,5 – 5
El. Paprsek	10 <sup>8</sup>	200	0,03	0,5 – 5

Tabulka 3: Srovnání parametrů svařování různých metod svařování [10]



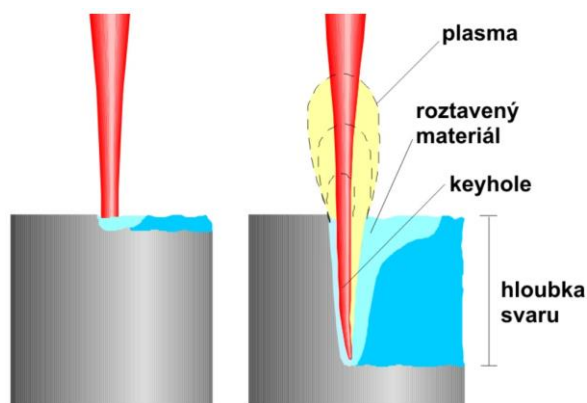
Obrázek 13: Porovnání geometrie různých svařovacích metod kovů v závislosti na hustotě výkonu [1]

## 1.4 Laserové svařování bez přídavného materiálu

Laserové svařování má dva základní principy, podle množství přenesené energie na jednotku plochy a způsobu vedení tepla, a to kondukční svařování a hluboké svařování („keyhole“). Oba principy jsou níže schematicky znázorněny na obrázku 14. [12]

### Kondukční svařování [12]

Při kondukčním svařování (viz. obr. 14 levá část) se materiál taví absorpcí energie laserového svazku, který dopadá na povrch a vedením tepla. Tento postup umožňuje svařování jen do relativně malých hloubek průvaru. Nicméně rychlost svařování může být vyšší a pro některé aplikace je hloubka průvaru a rychlost svařování vyhovující. Zvláště v těch případech, kde rychlost svařování je důležitější než úzký a hluboký průvar. [12]



Obrázek 14: Kondukční svařování (vlevo), Hluboké svařování „keyhole“ (vpravo) [12]

### Hluboké svařování (keyhole) [12]

Pokud je plošná hustota výkonu laserového paprsku dostatečně vysoká, tak dochází k tvorbě par kovů nad samotným povrchem svařovaného materiálu (viz. obr. 14 pravá část). Působení vysoké plošné energie laserového paprsku způsobuje tvorbu plazmatu, laserový paprsek postupně tvoří kapiláru a následně dochází k hlubokému provařování. Tlak plynů vystupujících z kapiláry pak brání jejímu uzavírání. Plasma, které je nad povrchem materiálu, zároveň zpětně ovlivňuje tvar kapiláry. Vložená energie laserového paprsku se následně ze stěn kapiláry dostává vedením do taveniny a dál do tuhého materiálu. Toto je princip tvorby tzv. keyhole procesu, kdy může laserový paprsek pronikat hluboko do materiálu. Při vzniku keyhole, díky mnohonásobné reflexi uvnitř kapiláry, se výrazně zlepšuje absorpce energie v místě dopadu laserového paprsku. Vzniká tak relativně úzký a hluboký svar. [12]

## 1.5 Laserové svařování s přídavným materiálem

Svařování silnějších plechů a dlouhých spojů dominuje hybridní svařování, to znamená, že laserový paprsek je doplněn o některou z obloukových metod svařování. Má to své výhody i nevýhody. Jednak nám přidaný drát a elektrický oblouk pomáhá překlenovat mezery a zamezuje zároveň rychlému chladnutí svaru a tím i jeho vysoké tvrdosti, ale také to přináší komplikace s nastavením mnoha parametrů svařování, pro laserový paprsek a obloukovou metodu. Z toho vyplývá, že všechny parametry musí být dokonale sladěny tak, aby výsledný svar byl kvalitní. Jednodušší metoda je metoda „**Cold wire**“, kde se svařuje samotným laserovým paprskem, do kterého se pouze doplňuje přídavný materiál ve formě drátu. [2]

Při použití přídavného drátu, které má vhodné chemické složení, je možné ovlivňovat některé mechanické vlastnosti svarového spoje. Toho se hlavně využívá při svařování více legovaných materiálů. Laserové svařování bez přídavného materiálu má často tvrdší svary, předeřev je jako takový obtížně aplikovatelný díky vysokým svařovacím rychlostem. A právě správná volba chemického složení přídavného drátu s nízkým obsahem uhlíku a dalších legur umožňuje snížit výslednou tvrdost svaru. Svařování s přídavným drátem hlavně dovoluje svařovat materiály s větší tloušťkou stěny. S výhodou se laserový svar, díky svým vlastnostem, využívá zejména pro kořenové svary, ale díky produktivitě a malému vnesenému teplu se při správném nastavení procesu hodí i pro doplnění materiálu v dalších vrstvách svaru (obr. 15). [2]



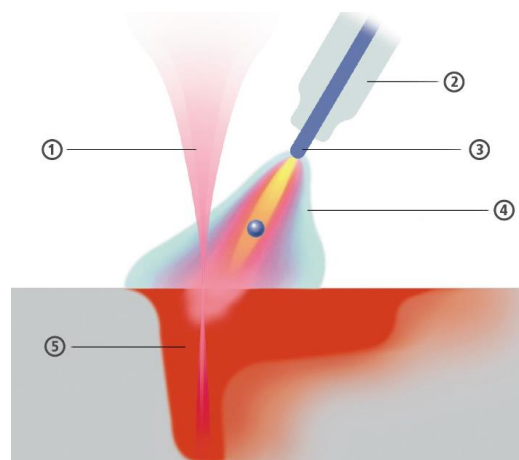
Obrázek 15: Příčné řezy svary plechu 10 mm na oceli S355 (vlevo) a korozivzdorné oceli (vpravo) s viditelným doplněním drátu do hlavy svaru [2]

### Hybridní laserové svařování

Jak bylo uvedeno výše, je hybridní laserové svařování spojení dvou svařovacích metod pro jednu svarovou lázeň. Nejčastěji to znamená spojení laserového svařování a některé obloukové metody svařování (viz. obr. 16). Při základní metodě svařování laserem se přídavný materiál nepoužívá. Ten by však mohl chybět při některých druzích svaru, kde je potřeba materiál doplnit nebo jím vyplnit svařovanou mezeru. V těchto případech je výhodné sloučit laserové svařování se štíhlým svarem a vysokou rychlostí svařování s relativně jednoduchým přidáváním materiálu v podobě drátu, který se taví elektrickým obloukem (MIG/MAG). [13]

Technické řešení je relativně jednoduché, obtížnější je nastavení svařovacích parametrů pro obě sloučené metody svařování, tak aby byl výsledný svarový spoj kvalitní a proces svařování stabilní. Je značně náročné nastavit parametry svařování tak, aby byly parametry dokonale sladěny. [13]

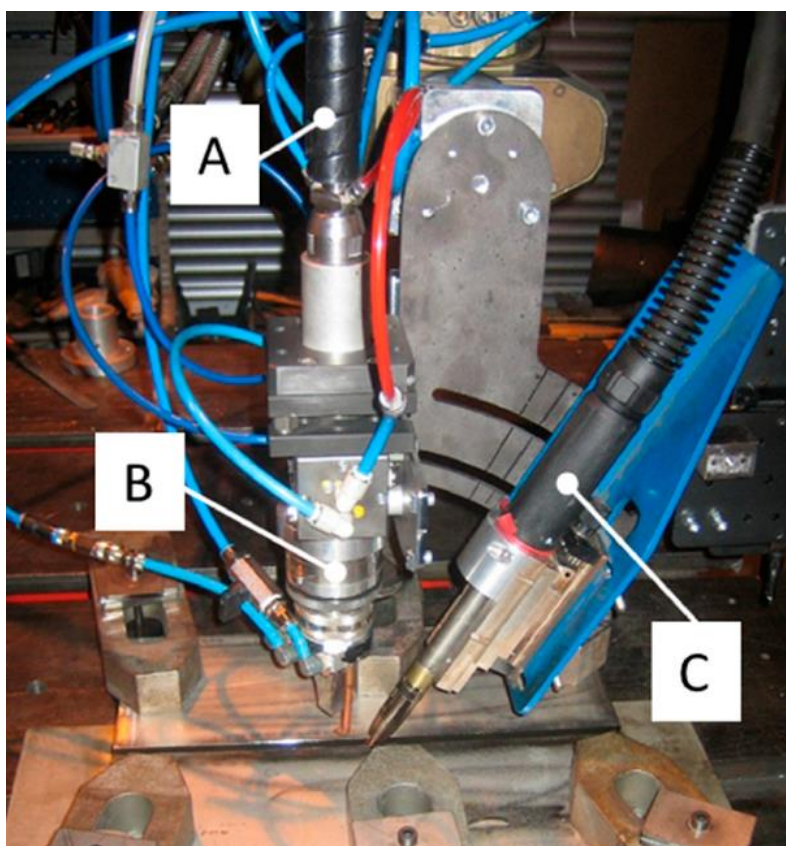
Vyvíjí se i hybridní technologie laserového svařování s metodou svařování TIG. Zde se teplo z elektrického oblouku využívá pro předehřev nebo dohřev materiálu, nebo také k prodloužení doby tekutosti svarové lázně kvůli potlačení některých svarových vad. [13]



Obrázek 16: Svařovací proces laserhybrid- 1 laserový paprsek; 2 plynové hubice; 3 elektroda; 4 impulzní oblouk; 5 průvar [14]

## 2 Technologie laserového svařování se studeným přídavným drátem „Cold wire“

Metoda laserového svařování s přídavným drátem „Cold wire“ je metoda, kdy se netaví přídavný drát elektrickým obloukem, ale přímo laserovým paprskem. Laser pro tuto metodu musí mít dostatečný výkon, který je schopným roztavit, jak drát, tak natavit i vlastní základní materiál v oblasti svaru. Velkou výhodou metody „studeného drátu“ je zjednodušení oproti hybridnímu svařování, o nastavování svařovacích parametrů pro hoření oblouku, který zde není. Tato metoda umožňuje používat laserový svazek, s větší ohniskovou stopou, který umožňuje zvětšit průměr svarové lázně. Takto je také možné svařovat i v kondukčním režimu, kdy se netvoří „keyhole“. Svar je tedy relativně mělký, ale s potřebnými parametry převýšení nebo rozměru v koutovém svaru. Na obrázku 17 je příklad sestavy svařovací hlavy, se kterou je možné svařovat laserem jak hybridně, tak pouze jen s přidáváním studeného drátu. [13]



Obrázek 17: Sestava komponent pro svařování laserem se studeným drátem (A) procesní vlákno s konektorem; (B) laserová svařovací hlava; (C) přívod přídavného drátu [15]

### 2.1 Volba přídavného materiálu

Pro metody svařování, kde se používá přídavný materiál ve formě plného drátu, je tento drát navinut na cívkách (např. 15 kg) anebo v sudech (např. 250 kg) a to v různých průměrech (běžné jsou průměry od 0,6 mm do 2 mm). [16]

Přídavný materiál je volen podle požadovaných vlastností svarového kovu a metody svařování. Pro svarové spoje, kde jsou kladeny vysoké nároky z hlediska mechanických vlastností, se používají přídavné materiály dolegované molybdenem nebo manganem a niklem.

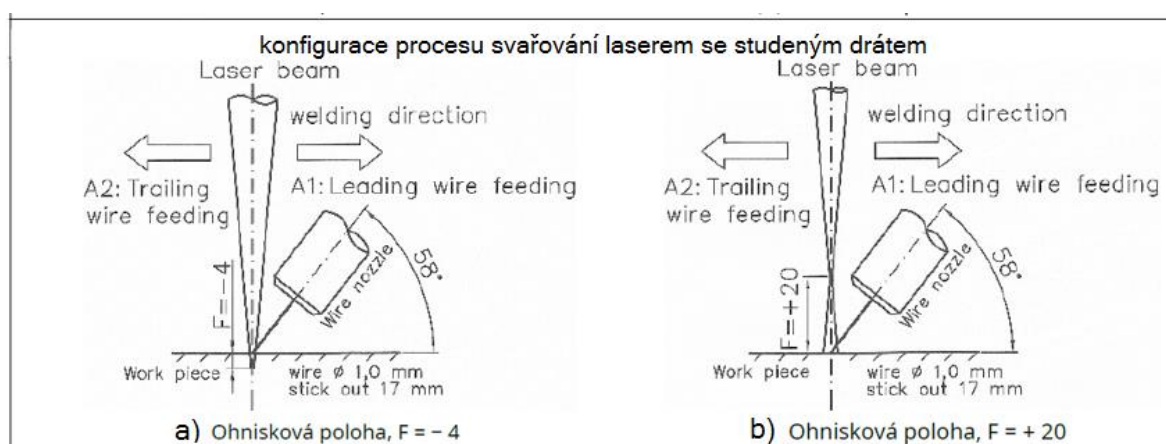
Některé mikrolegované jemnozrnné oceli se používají pro výrobu svařovaných konstrukcí, pracujících při pracovních teplotách až  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Svarový kov o stejném chemickém složení jako má základní materiál, pak s ohledem na lící strukturu svarového kovu, mikrostrukturu svarového kovu a defekty ve svarovém kovu nesplňuje požadavky na požadované hodnoty vrubové houževnatosti a tranzitní teploty. V takovém případě se používají přídatné materiály dolegované 1 až 2,5 hm. % Ni podle požadované hodnoty vrubové houževnatosti. [16]

## 2.2 Svařovací parametry

Svařovací parametry pro svařování laserem s přídatným materiálem, je synergií více proměnných. Ve srovnání s hybridním svařováním (HLAW), kde vyladit veškeré parametry je daleko problematičtější, je to u svařování metodou „Cold wire“ trochu jednodušší, protože odpadají všechny parametry související s nastavením přidané obloukové metody. Na obrázku 18 je znázorněna schématická konfigurace svařování metodou „Cold wire“ a některé důležité parametrizace. [15]

Dle aplikace a geometrie svarového spoje jsou řešeny následující parametry svařování:

1. Výkon laseru [kW]
2. Rychlost svařování [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ]
3. Rychlost posuvu přídatného drátu [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ]
4. Poloha ohniska vůči svarovému spoji
5. Směr svařování [přídatný drát před paprskem za paprskem]
6. Výlet drátu [10-40 mm.] [23]
7. Úhel laserového paprsku a úhel přivodu drátu
8. Typ ochranného plynu a jeho přiváděný objem [l/min]



Obrázek 18: Možná konfigurace procesu laserového svařování metodou „Cold wire“ [15]

## 2.3 Vliv polohy ohniska laserového paprsku na odtavovací výkon přídatného drátu při svařování metodou „Cold wire“ do úzké mezery

V případě laserového svařování s přídatným drátem se drát zavádí v pevné formě do laserem vytvořené svarové lázně. Když drát vstupuje do interakční zóny bodu dopadu laseru, část výkonu laseru se odráží od drátu a určitá část je absorbována do drátu, což způsobuje zahřívání a tavení drátu. Kromě výše uvedeného se část výkonu laserového paprsku

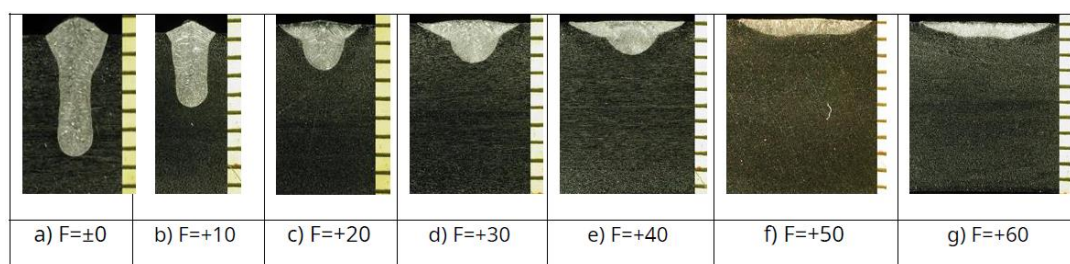


spotřebovává také na ohřev a tavení základního materiálu. Při srovnání laserového svařování metodou „Cold wire“ s laserovým obloukovým hybridním svařováním probíhá tavení přídavného drátu trochu jiným způsobem. Před vstupem do zóny laserem indukované svarové lázně je přídavný drát již roztaven obloukovým zdrojem a zavádí se do svarové lázně ve formě kapiček. [17]

Miikka Karhu a Veli Kujanpää prokázali ve své studii [17] jaký vliv mají různá nastavení rozostření laserového paprsku na odtavovací výkon přídavného drátu a vznikající šířku svarové housenky při svařování austenitických ocelí metodou Cold wire. Tento test prokázal limity pro maximální podávání přídavného drátu pro pět variant ohniskové polohy. Ukázalo se, že se zvýšením polohy ohniska se snížila hustota výkonu laserového paprsku a také se snížila odpovídající maximální rychlost podávání drátu. Pokud byly překročeny maximální rychlosti podávání drátu, chování při tavení začalo kolísat, což způsobilo rozstříky a nerovný povrch svaru, protože schopnost tavení laserového paprsku nebyla při dosažení limitu dostatečná. Použité varianty polohy ohniska a odpovídající maximální rychlosti podávání drátu a šířky vyrobených svarových housenek jsou uvedeny v tabulce 4. makrořezy provedených návarových housenek jsou na obr. 19. [17]

Ohnisková vzdálenost [mm]	Maximální rychlost podávání drátu [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	Šířka natavené housenky [mm]
+10	5,5	2,6
+20	3,5	3,3
+30	3,0	5,3
+40	2,5	6,3
+50	2,0	7,2
Výkon laseru – $P_L=3$ kW; Ohnisková vzdálenost– $F_L=200$ mm; Rychlost svařování $v_L=0,3$ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ; Přídavný drát– Autrod 316L Si $\varnothing$ 1mm		

Tabulka 4: Ohnisková poloha a její vliv na maximální rychlost podávání drátu ( $\varnothing$  1 mm) a šířku housenky [17]



Obrázek 19: Makro řez svarovými housenkami s rozostřeným ohniskem [17]

Po tomto experimentu následoval další experiment na plechu o tloušťce 20 mm s dvěma možnými geometriemi přípravy svarových ploch s cílem zjistit, jak ovlivní poloha ohniska a rozostření laserového paprsku schopnost natavit hrany svarových ploch, a zároveň tavit přídavný drát, který je přiváděn do svarové lázně, která má vyplnit svarovou mezeru. Více je to rozebráno v podkapitole 4.2.

## 2.4 Vliv polohy laserového paprsku a drátu v úzké drážce

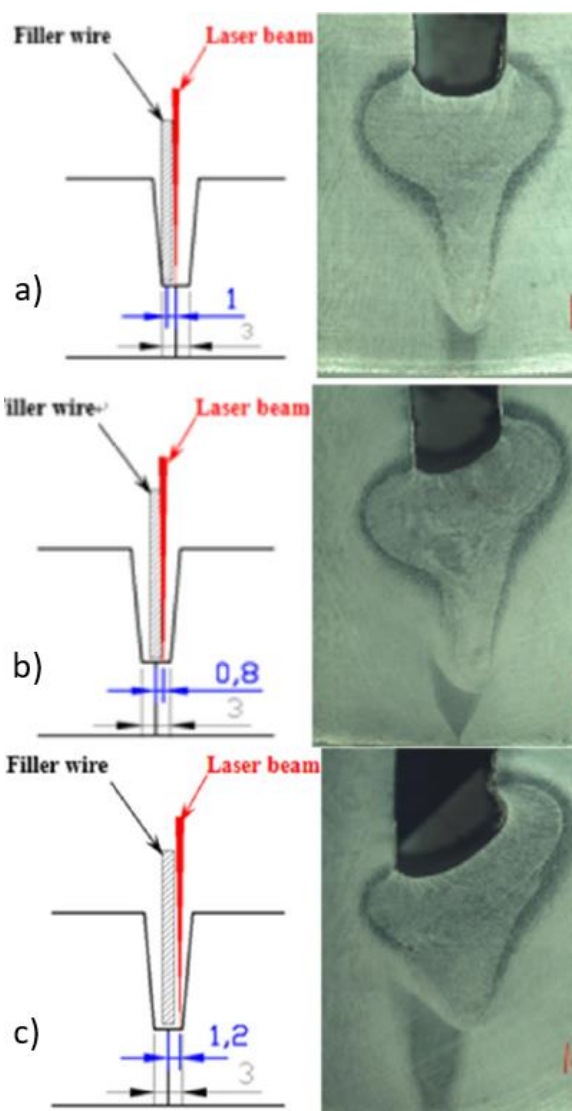
Yong Zhao a kolektiv [23] ve svém experimentu popsali jaký vliv má pozice laserového paprsku v drážce a jaký vliv má pozice drátu. Při jejich pokusech, pokud nebyl laserový paprsek v drážce přibližně vycentrováný, tak vznikaly svarové vady jako asymetrie a hlavně neprůvary.

Na obrázku 20 a) je znázorněna pozice laserového paprsku přibližně ve středu drážky, a i když byl drát vychýlen k jedné ze stěn, tak nedošlo k asymetrii svarového průvaru.

Dále na obrázku 20 b) je znázorněn vychýlený paprsek k pravé stěně a drát je přiváděn na střed a jak je patrné zde už k asymetrii došlo a už je to zárodek neprůvaru.

Předešlý poznatek byl potvrzen, když na obrázku 20 c) byl při pokusu paprsek vychýlen ještě více ke straně a došlo k mnohem větší asymetrii.

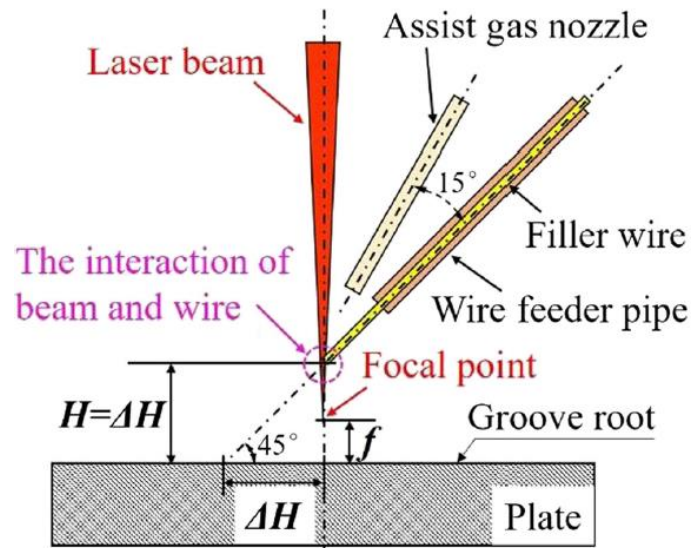
Tyto poznatky jsou zejména důležité pro experimentální část práce, kdy bude kladen důraz na správnou a vycentrovanou pozici laserového svazku, kdežto svařovací drát by mohl být i trochu vychýlen od středu drážky. [23]



Obrázek 20: Vliv polohy laserového paprsku a drátu v úzké drážce [23]

## 2.5 Vliv polohy průsečíku laserového paprsku a přídavného drátu v úzké drážce na stabilitu a tvorbu svarové lázně

Yong Zhao a kolektiv [23] prokazovali také vliv polohy průsečíku laserového paprsku a přídavného drátu označeným na obrázku 21 jako  $\Delta H$  na jeho tavení a stabilitu svarové lázně a tvorbu povrchu svarové housenky.



Obrázek 21: Vzdálenost průsečíku laserového paprsku a drátu ke kořenu drážky ( $\Delta H$ ) [23]

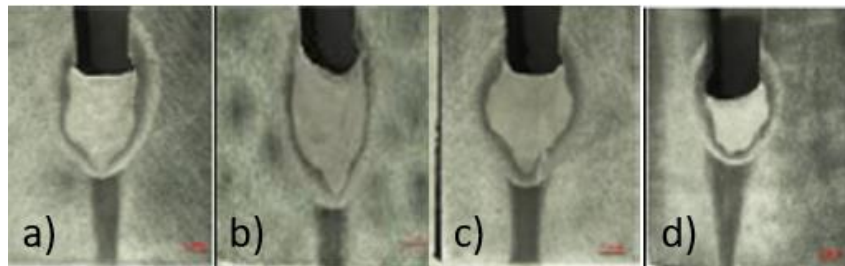
$\Delta H$  je jedním z klíčových parametrů, který ovlivňuje především růst kapky roztaveného kovu při svařovacím procesu. Na roztavenou kapku působí společně laserový paprsek, plazma tvořená v drážce, gravitace, povrchové napětí a proud ochranného plynu. Vhodná vzdálenost  $\Delta H$  nejen že přispívá dobrému tavení přídavného drátu, ale také zajišťuje stabilní přenos roztavené kapky do svarové lázně, a tak je docíleno hladkého a rovnoměrného vzhledu svarové housenky. [23]

Příliš nízká vzdálenost  $\Delta H$  znamená, že přídavný drát bude ponořen ve svařovací lázni a nebude moci být obklopen plazmou, což vede k tomu, že drát nebude správně taven, jak je znázorněno na obr. 22 a. [23]

Na druhou stranu, jak je znázorněno na obr. 22 c, vyšší  $\Delta H$  znamená, že vzdálenost od vrcholu drátu ke kořeni drážky je příliš velká na to, aby roztavená kapka rostla do tvaru koule a stabilně odkapávala do svarové lázně, což má za důsledek nerovnoměrnou a drsnou svarovou housenku. [23]

S dalším zvýšením  $\Delta H$ , což je nejhorší varianta, se roztavená kapka při růstu dotýká boční stěny úzké drážky příliš brzo, jak je znázorněno na Obr. 22 d, a dochází ke spojení s boční stěnou drážky a k nezatečení přímo ke kořeni drážky, což znamená vytvoření dutiny, a tudíž svarové vady. [23]

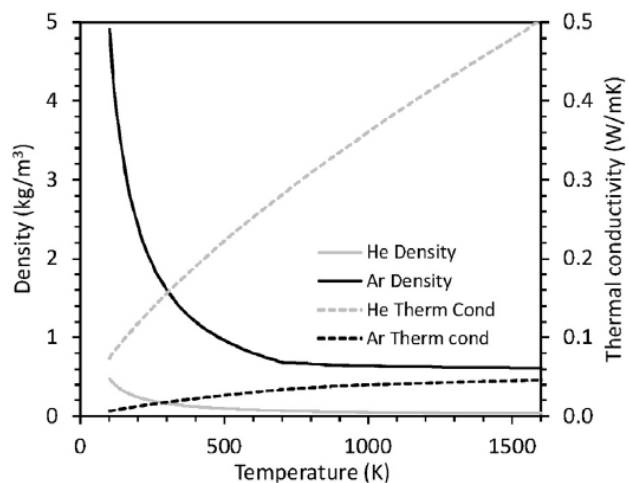
Jako ideální výsledek experimentu byla popsána situace, která je znázorněna na obr. 22 b. [23]



Obrázek 22: a)  $\Delta H=1$  mm; b)  $\Delta H=3$  mm; c)  $\Delta H=5$  mm; d)  $\Delta H=7$  mm [23]

## 2.6 Vliv ochranné atmosféry na laserové svařování

Ochranné plyny mají při laserovém svařování několik funkcí obdobně jako u obloukových metod. Prvním úkolem je ochrana svařovaného materiálu před okolní atmosférou. Ochranné plyny brání pronikání škodlivých prvků z okolní atmosféry, jako je kyslík, dusík a vzdušná vlhkost, do svarové lázně, a tím brání tvorbě oxidů, nitridů a pórů. Mimo jiné mají ochranné plyny také výrazný vliv na přenos tepelné energie do svarového spoje, ovlivňují hloubku a šířku závaru, rychlost svařování. Vliv přenosu tepelné energie je závislý na fyzikálních vlastnostech ochranného plynu, jako je jeho hustota a tepelná vodivost, které se mění v závislosti na teplotě (viz. obr. 23) [1,18]



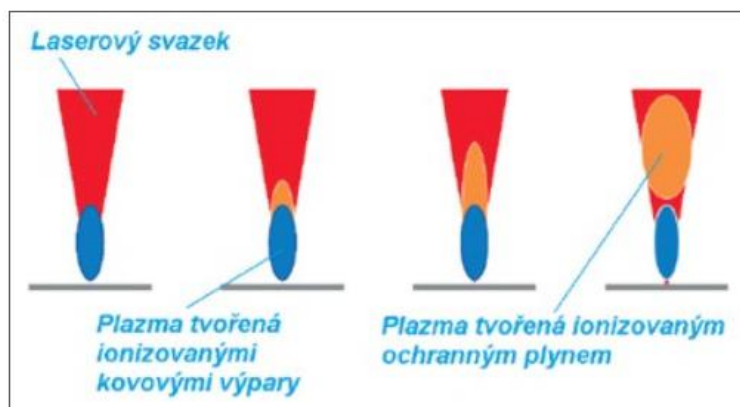
Obrázek 23: Hustota a tepelná vodivost ochranných plynů Ar a He v závislosti na teplotě [18]

Jako ochranné plyny jsou používány plyny **argon, helium, dusík, CO<sub>2</sub> a kyslík nebo jejich směsi**. Ochranný plyn je volen podle druhu materiálu, který je svařován (náchylnost k oxidaci) a podle požadavků na produktivitu a kvalitu svařování. [19]

Při dostatečně vysoké hodnotě hustoty energie dochází k ionizaci ochranné atmosféry nad povrchem materiálu, a tak vzniká plazma ochranného plynu (viz. obr. 24). A právě na tvorbu plazmatu ionizovaného ochranného plynu je spotřebovávána podstatná část energie laserového paprsku, která potom chybí při tvorbě klíčové dírky. Tento jev ovlivňuje hloubku a šířku závaru, a pokud je potřebný hluboký závar, je jev tvorby ionizovaného plazmatu **pro proces negativní**. [19]

Při některých aplikacích však není hlavním kritériem hloubka závaru (vytvřování povrchu, navařování, **velké tolerance vzájemné polohy spojovaných dílů**...). Právě zde se může použít plyn, který plazma vytváří jako je například čistý argon. [19]

Problém tvorby plazmatu je jeden ze základních faktorů, které laserové svařování hodně ovlivňují. [19]



Obrázek 24: Tvorba plazmatu v ionizované atmosféře [19]

Vlastnost plynu, která brání tvorbě ionizovaného plazmatu, je **ionizační potenciál**. Ionizační potenciál je množství energie, které potřebné na vytvoření iontu daného prvku. Při vyšších hodnotách ionizačního potenciálu vzniká méně plazmatu a při nižších hodnotách ionizačního potenciálu je vznik plazmatu snazší, a tudíž ho vzniká více. [19]

V tabulce 5 jsou konkrétní hodnoty ionizačního potenciálu vybraných plynů, které se používají na tvorbu ochranných atmosfér pro laserové svařování. Podle hodnot uvedených v tabulce 5 je zřejmé, že nejméně plazmatu bude vznikat za použití helia, a naopak při použití čistého argonu by vznikalo hodně plazmatu s nízkým ionizačním potenciálem, které odebírá hodně energie ze svařovacího paprsku laseru, a to znamená snížení, svařovací rychlosti, rozšíření láně svarového kovu a nízkou hloubku závaru. Pokud by bylo třeba zvýšit hloubku závaru, tak by se muselo svařovat za použití výkonnějšího laseru, anebo snížit množství přívodu ochranného plynu. Což by mohlo vést zase k nedostatečné ochraně svarového kovu. [19]

Plyn	Helium	Argon	Dusík	CO <sub>2</sub>	Kyslík
Ionizační potenciál	24,5 eV	15,7 eV	15,5 eV	14,4 eV	12,5 eV

**Tabulka 5: Ionizační potenciál plynů ochranných atmosfér [19]**

V praxi je již potvrzeno, že s ochranným plynem obsahující helium, které vytváří plazma s vysokým ionizačním potenciálem, se dosahuje vysokých průvarů při vyšší rychlosti svařování. Helium se využívá poměrně často, ale protože je drahé, tak se především využívá ve směsích hlavně s argonem nebo také s dusíkem. Nevýhodou čistého helia je také malá specifická hmotnost a jeho nízká hustota, což by v praxi znamenalo zvýšit jeho průtokové množství, a to je v kombinaci s jeho cenou značně neekonomické. [19]

### **3 Svařování vysokopevných HSS ocelí s větší tloušťkou stěny**

#### **Struktura svarového spoje [16,20]**

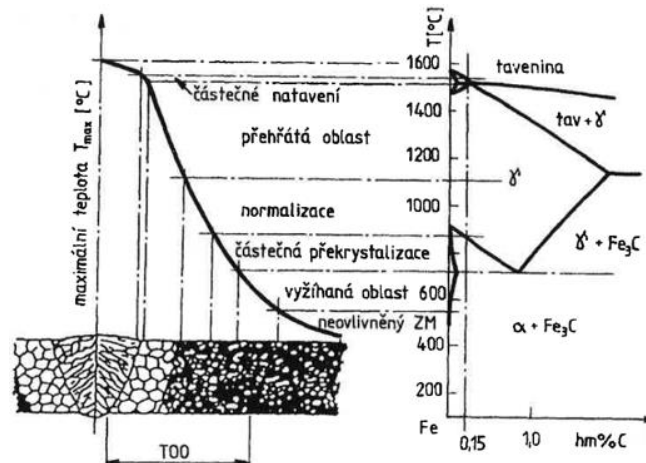
*Při procesu svařování, vlivem působením tepla, dochází krátkodobě k intenzivnímu místnímu ohřevu materiálu na vysoké teploty. Vneseným teplem se natavuje malý objem kovu, a v důsledku tepelné vodivosti se ohřívá i okolní oblast základního materiálu. Vysoké teploty a jejich změny v základním materiálu při svařování způsobují:*

- *Fázové přeměny – tavení základního a přídavného materiálu, jeho tuhnutí a změny v tuhém stavu*
- *Fyzikální a chemické reakce*
- *Změny struktury v oblasti svarového kovu*
- *Změny objemu, které ve svarovém spoji způsobují vnitřní napětí a deformace*

*Dopady svařování závisí zejména na svařovaném základním materiálu (chemickém složení, fyzikálních vlastnostech, geometrických rozměrech přípravy svarových ploch), na technologii svařování (způsob svařování, metoda, parametry, postup) a množství tepla vneseného do svarového spoje na jednotku délky. [16, 20]*

### Teplem ovlivněná oblast (TOO)

Teplem ovlivněná oblast je oblast okolo svarového spoje, ve které dochází ke změnám mikrostruktury vlivem působení tepla při svařování. Při svařování kovů a slitin bez polymorfni přeměny (Cu, Ni, Al) nedochází ke změně mikrostruktury, ale probíhají pouze substrukturní změny, rekrystalizace a růst zrn. U kovů a slitin s polymorfni přeměnou (oceli) dochází v TOO k výrazným strukturním změnám, které mají vliv na vlastnosti svarových spojů. Při svařování ocelí s polymorfni přeměnou  $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ , můžeme TOO rozdělit na charakteristická pásma (viz. obr. 25). [16, 20]



Obrázek 25: Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje [16]

1. Oblast natavení – tvoří přechod z TOO do svarového kovu.
2. Oblast přehřátí – růst zrna
3. Oblast vyžhátá nad  $A_3$  – normalizace
4. Oblast nad teplotu  $A_1$  – částečná překrystalizace mezi teplotami  $A_1$  až  $A_3$
5. Oblast pod teplotou  $A_1$  – vyžihaná oblast

### 3.1 Chování jemnozrných ocelí při konvenčním svařování obecně

Vlivem působení tepla při svařování se ruší účinek termomechanického zpracování v TOO svarových spojů. Dojde k poklesu meze pevnosti, meze kluzu a tvrdosti v pásmu částečné překrystalizace (mezi teplotami  $A_{c1}$  až  $A_{c3}$ ). Snížení je patrné zejména v oblasti kolem teploty  $A_{c1}$  (tzv. změkčená zóna). Dochází také ke snížení vrubové houževnatosti v pásmu přehřátí TOO limitovaném teplotou solidu a teplotou přehřátí svařované oceli. Svarový spoj má vlivem těchto změn nižší hodnotu meze pevnosti než základní termomechanicky zpracovaný materiál. **Pro co nejmenší snížení pevnosti v TOO, limitujeme vždy při svařování svarových spojů TMZ ocelí tepelný příkon a tím i množství vneseného tepla do svarového spoje (viz obr. 26). Vnesené teplo při svařování jemnozrných ocelí by mělo být pod  $10 \text{ [kJ} \cdot \text{cm}^{-1}]$ .** [16, 20]

Měrný příkon svařování:

$$Q_s = \eta \frac{U \cdot I}{v \cdot 10^3} [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}]$$

Kde:

$\eta$  – koeficient účinnosti svařování

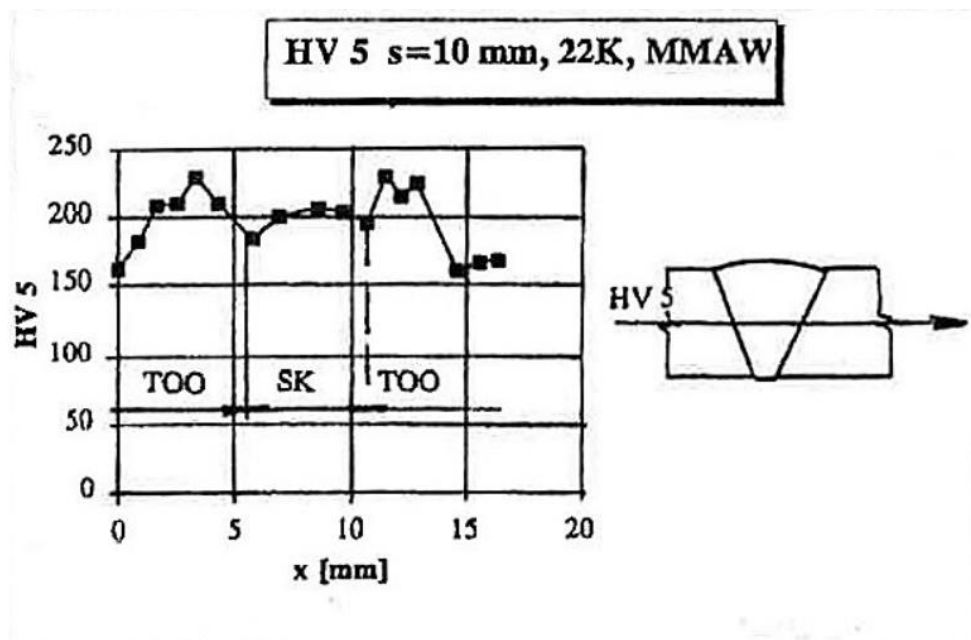
$U$  – svařovací napětí [V]

$I$  – svařovací proud [A]

$v$  – rychlost svařování [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

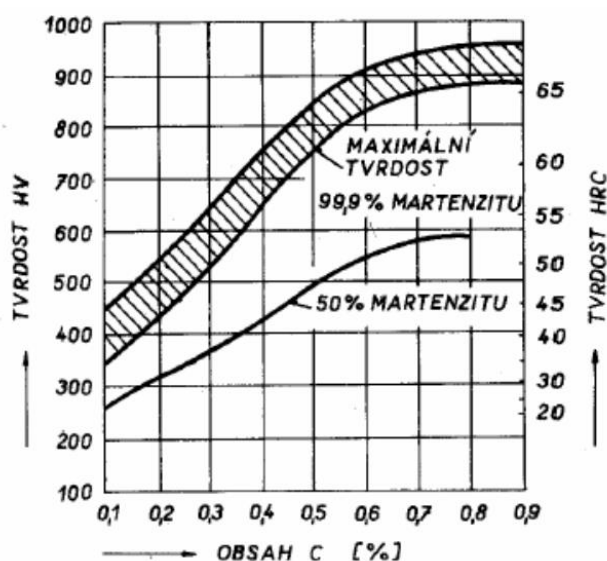
Obrázek 26: Výpočet tepelného příkonu [16, 20]

*Mechanické vlastnosti svarového spoje je možné charakterizovat nepřímě měřením tvrdosti přes svarový spoj a TOO. Charakteristický průběh tvrdosti napříč svarovým spojem provedeným obloukovým svařováním pro uhlíkové oceli je znázorněn na obrázku 27. Z obrázku je vidět výrazné zvýšení tvrdosti v oblasti nad teplotu přehřátí a pokles tvrdosti v okolí  $A_c1$ . Maximální tvrdost závisí na chemickém složení oceli především na množství uhlíku a použitém příkonu svařování (který ovlivňuje čas chladnutí  $\Delta t_{8/5}$ ). [16, 20]*



Obrázek 27: Průběh tvrdosti svarovým spojem pro obloukové metody svařování [16,20]

*Na obrázku 28 je znázorněna závislost tvrdosti na přítomnosti uhlíku. Obvykle se požaduje, aby maximální hodnoty tvrdosti svarových spojů u skupiny ocelí 1.2 dle ISOTR 15608 pohybovaly v rozmezí mezi 260 až 350 HV. Právě 350 HV je hranice, kdy obsah uhlíku je 0,25 % a od této hranice obsahu uhlíku se tvoří základné struktury. Ocel je pak již podmíněně svařitelná [16, 20]*



Obrázek 28: Závislost tvrdosti oceli na obsahu uhlíku způsobená přítomností martenzitu [19]

### **Předehřev**

*Materiály menších tlouštěk do 25 mm do 0,2% obsahu uhlíku se nemusí předehřívát. Mezními hodnotami tlouštěk ocelí svařitelných bez předehřevu se zabývá norma ČSN EN 1011-2. **Předehřev se aplikuje hlavně kvůli zamezení tvorby studených trhlin.** Teplota předehřevu se určuje nejen podle chemického složení, ale také podle velikosti obsahu difúzního vodíku a do výpočtu také vstupuje tuhost konstrukce. Stanovení teploty předehřevu udává norma ČSN EN 1011-2. Dohřev je nutný pouze u materiálů velkých tlouštěk a u materiálů s vyšším obsahem difúzního vodíku. Podobný efekt jako teplota předehřevu může mít svařování s vyšším tepelným příkonem, a to díky teplu vnesenému do okolí čímž se zpomalí ochlazování. [20, 21]*

### **Studené trhliny**

*Náchylnost ocelí na vznik studených trhlin úzce souvisí s prokalitelností, respektive transformačním zkřehnutím (tvorba martenzitické struktury). Souhrnný vliv chemického složení na náchylnost oceli na zakalení v TOO lze vyjádřit uhlíkovým ekvivalentem například  $CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}$  (%)*

*Transformační zkřehnutí TOO je dané chemickým složením oceli, aplikovaným svařovacím cyklem, který je vyjádřen časem  $\Delta t_{8/5}$  (rychlost ochlazování z 800 na 500 °C) Průběh ochlazování  $\Delta t_{8/5}$  lze ovlivnit změnou technologie svařování, změnou svařovacích parametrů nebo použitím předehřevu nebo dohřevu. [16, 20]*



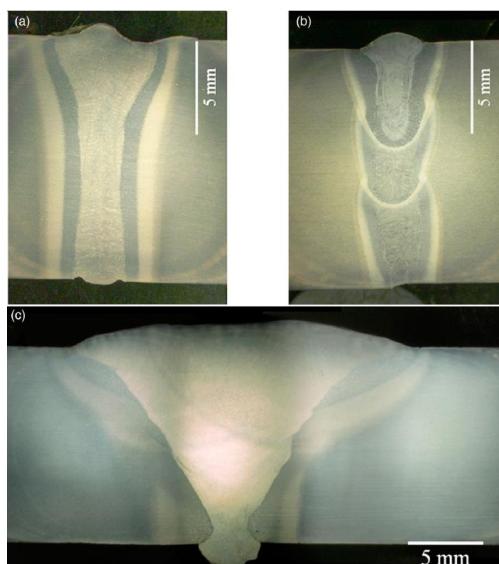
### 3.2 Chování vysokopevných HSS ocelí s větší tloušťkou stěny při svařování laserem

Ve studii, kterou provedl **W. Guo a kol.** [4], byly porovnávány vlivy různých metod svařování oceli vysoko pevné oceli S700 o chemickém složení uvedeném v tabulce 6.

Ocel S700	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>	<b>Al</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Nb</b>
	0,068	1,476	0,009	0,001	0,05	0,073	0,495	0,19	0,03
	<b>V</b>	<b>B</b>	<b>N</b>	<b>CE</b>					
	0,044	0,0018	0,0045	0,46					
Carbofil 2NiMoCr	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>CE</b>
	0,08	1,5	0,6	0,015	0,018	0,4	2,2	0,6	0,68

Tabulka 6: Chemické složení základního materiálu S700 a přídatného materiálu Carbofil 2NiMoCr [4]

Metody svařování zde byly oblouková GMAW, jednovrstvé svařování metodou ALW a vícevrstvé svařování metodou ultra-NGLW. Ve studii byla posouzena výsledná mikrostruktura svarového kovu a TOO, řešena byla také mikrotvrdost a tahové napětí. Na obrázku 29 jsou příčné makrořezy z provedeného experimentu. [4]

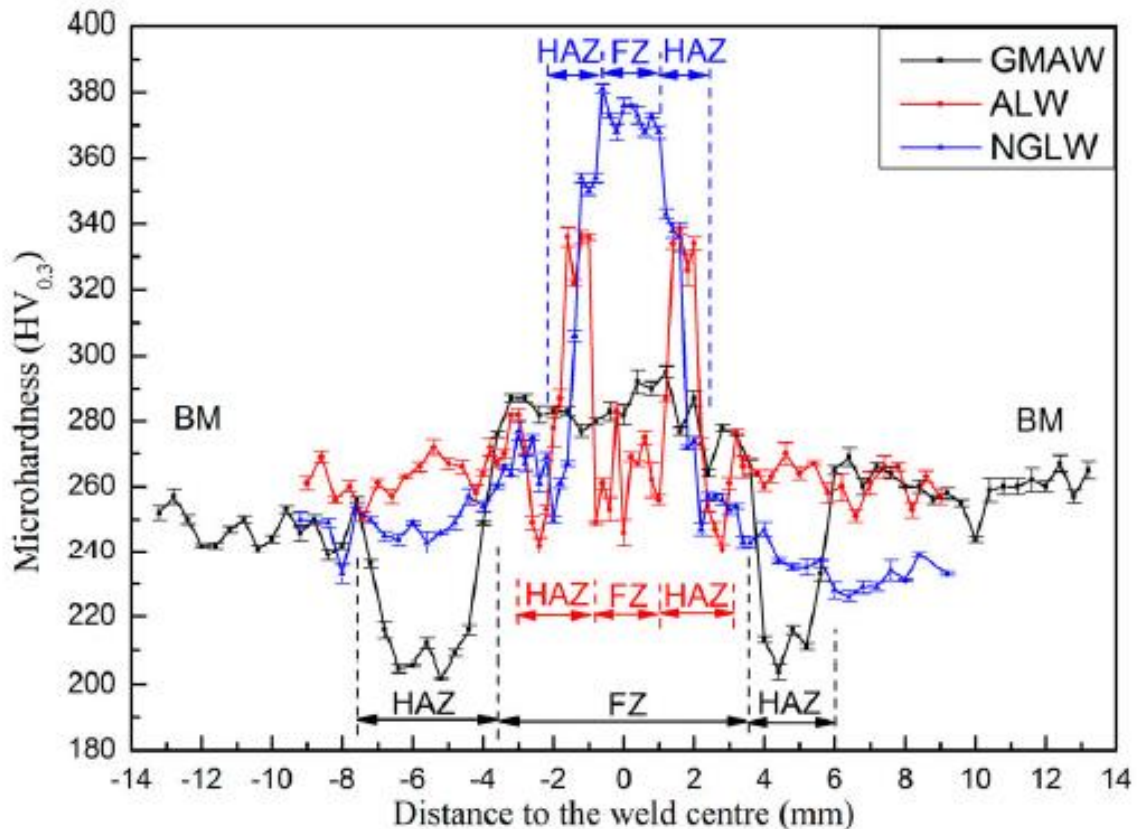


Obrázek 29: Řez svary a) svar ALW, b) svar ultra-NGLW, c) svar GMWA [4]

Z obrázku 29 je jasně patrné, že nejužší TOO má svar svařený metodou ultra – NGLW nejširší má naopak svar svařený metodou GMWA. Samozřejmě za velikost šířky TOO je odpovědný tepelný příkon dané metody svařování, kdy u GMWA byl tepelný příkon až 7x větší než u metody ultra – NGLW. Větší TOO byla také u vzorku svařeným čistě laserovým paprskem ALW, a to pro to, že pro plný průvar jednou vrstvou musel být použit vysoký výkon laseru (13 kW), kdežto u metody ultra – NGLW byl použit výkon 4 x menší (3 kW). Vysoký příkon u metody GMWA souvisí i s geometrií svaru. Ta byla zvolena s o hledem na využití v běžné praxi. [4]

V mikrostruktúře ve svarovém kovu ve svaru GMAW dominuje jemný jehličkovitý ferit s malým množstvím martenzitu. V TOO byly pozorován bainit a malé množství martenzitu. U svaru ALW byl ve svarovém kovu bainit a malá množství martenzitu, zatímco v TOO se vytvořil martenzit. U vzorku ultra-NGLW lze pozorovat martenzit, jak ve svarovém kovu, tak v TOO ve směsi s určitým množstvím popuštěného martenzitu. [4]

Tyto struktury spolu se šířkou TOO potom určují výslednou mikrotvrdotost a následně mechanické vlastnosti. Na obrázku 30 jsou srovnány jednotlivé profily mikrotvrdotosti. [4]



Obrázek 30: Měření mikrotvrdotosti napříč zkušebními svary [4]

Z obrázku 30 je patrný velký pokles mikrotvrdotosti v TOO u svaru provedeného metodou GMAW, a právě tam lze predikovat porušení při jeho namáhání. U svaru provedeném metodou ALW je zajímavé, že mikrotvrdotost ve svarovém kovu a v TOO je prakticky stejná jako u základního materiálu, pouze na hranicích stavení došlo k jejímu nárůstu. Protože se jedná o svar svařený čistě laserem, tak by měl svarový kov mít i stejnou strukturu jako základní materiál. V článku to bylo vysvětleno tak, že došlo při použití vysokého výkonu laseru (13 kW), který způsobil částečné odpaření některých legur ve svarovém kovu a tím mohlo dojít ke změně jeho prokalitelnosti. U svaru svařeném metodou ultra – NGLW byla tvrdost svarového kovu největší díky velkému obsahu martenzitu, který vzniká při rychlém ochlazení, protože byl použit nízký výkon laseru, který nedokázal prohřát základní materiál, tudíž došlo k velkému odvodu tepla a velmi rychlému ochlazení svarového kovu a vzniku martenzitické struktury. [4]

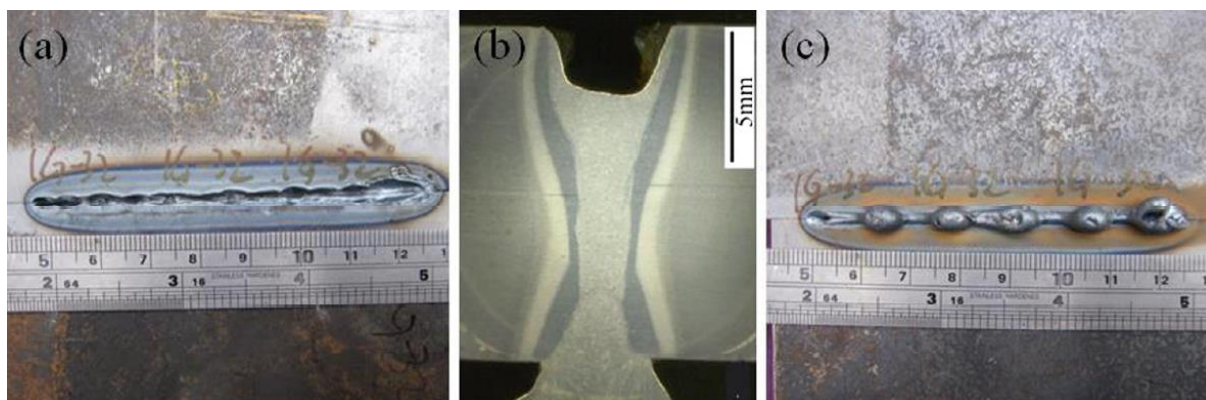
Z výsledku je rovněž patrné, že v rámci TOO nejmenší odpevněnou oblast měly svary svařované laserem. (v článku je uvedeno cca 0,4 mm) [4]

Při běžném svařování jemnozrnných vysokopevných ocelí se jako opatření používá přehřev, aby nemohlo docházet k tak rychlému chladnutí svarového kovu a tvorbě zákalných struktur, ale bohužel pro svařování laserem je přehřev velice těžko aplikovatelný díky vysokým svařovacím rychlostem. V různých studiích při zkouškách tahem docházelo k přetržení vzorků mimo svarový spoj v základním materiálu. Tyto výsledky lze přisuzovat právě velmi úzké a málo odpevněné oblasti v TOO, bohužel bylo provedeno pořád málo studií a pořád je potřeba rozklíčovat řadu vlivů na proces svařování laserem. [4]

## 4 Příprava svarových ploch pro svařování silných plechů metodu „Cold wire“

Výslednou kvalitu svarového spoje ovlivňuje z největší části geometrie svarového spoje. Velký vliv má ale také čistota svarových ploch (oxidace, okuje...) Tato kapitola je věnována přípravě svarových ploch. [2].

Udává se, že 1kW výkonu laseru je schopen provařit cca 1-2 mm. Pro svařování plechů s větší tloušťkou než 10 mm by byl potřeba vysoký výkon laseru například 16 kW a výkonné lasery jsou velice drahé. Navíc při jednovrstvém svařování s vysokým výkonem laseru dochází často k typickým svarovým vadám, jako je poréznost nebo časté protečení svarového kovu (viz obr. 31). [22]



Obrázek 31: Typické svarové vady při svařování plechů s větší tloušťkou na jednu vrstvu [22]

V několika posledních letech je stále více zkoumáno vícevrstvé laserové svařování do úzkých mezer, které lze aplikovat úspěšně na svařování velmi tlustých součástí s použitím přídavného drátu a s použitím nižších až středních výkonů laserů. [22]

Například Elmesalamy a kol. [3] úspěšně svařili plechy z nerezové oceli 316L o tloušťce 20 mm pomocí s 1kW vláknovým laserem do ultra úzké mezery široké 1,5 mm a s úkošem  $3^\circ$  z obou stran pomocí více vrstev.

Pro laserové svařování do úzké mezery je možná příprava svarových ploch do tvaru „V“ s nějakým minimálním úhlem zkosení. Použití „V“ svaru při vícevrstevném svařování však zvyšuje objem spotřebovaného výplňového materiálu a také počet výplňových svarových housenek. Experiment, který provedl Li a kol. při vícevrstevném laserovém svařování do úzké mezery na 17 mm tlustých deskách z nízkouhlíkové oceli Q235, prokázal, že použití relativně malé drážky nejen snížilo spotřebu přídavného drátu, ale také snížilo průhyb přídavného drátu v drážce, což může zlepšit spojení uvnitř mezery. Další pozitivní vliv svařování do úzké mezery jsou poměrně malé příčné deformace a nižší vnitřní pnutí. [22]

V kapitole 2.1 byl popsán další negativní vliv přípravy svarových ploch do „V“, a to je zvyšování polohy ohniska, kvůli natavování hran základního materiálu. Zvýšením polohy ohniska se snižuje odtavovací výkon drátu a zároveň se snižuje i hustota plošného výkonu laseru a při špatném nastavení by mohlo docházet k neprůvarům.

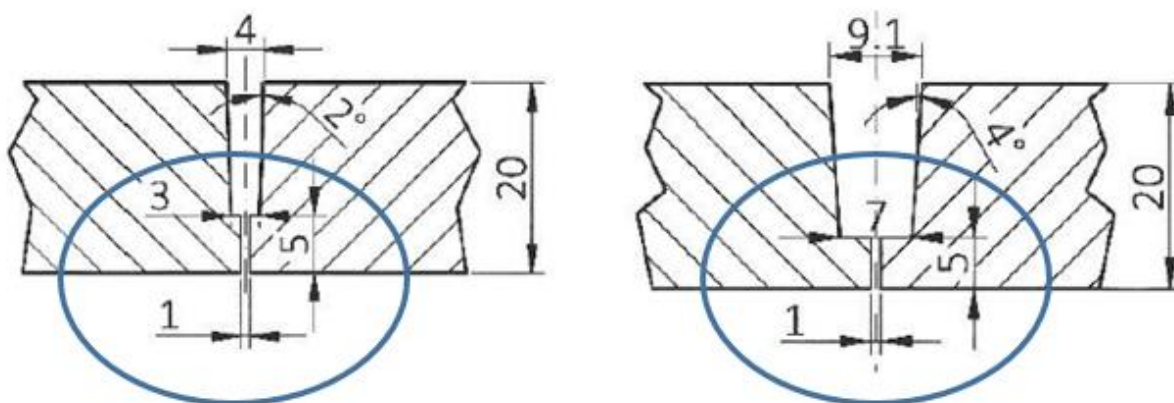
Avšak při správném provedení nastavení hran by více vrstev mohlo mít příznivější vliv na tvrdost výsledného svaru důsledkem pomalejšího chladnutí a odvodu tepla.

Níže v podkapitolách byla provedena rešerše na různé geometrie svarových ploch provedených při různých experimentech s různými svařovacími parametry.

#### 4.1 Vliv šířky mezery na kvalitu provedení kořenové vrstvy

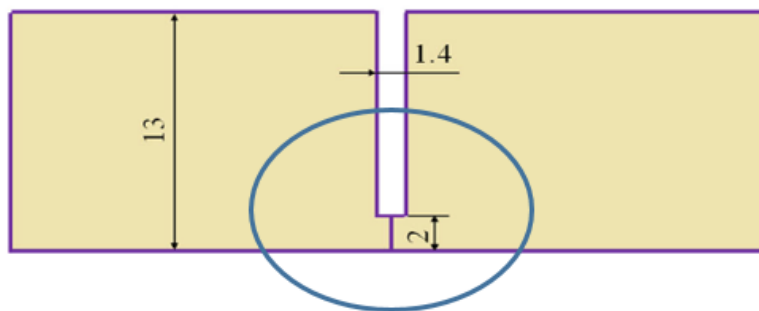
Laserový svarový spoj ovlivňuje velikost mezery mezi spojovanými díly a průměr paprsku. Mezera by neměla překračovat 30 % velikosti průměru paprsku (například pro milimetrový paprsek by měla být mezera do 0,3 mm). Špatně sesazený spoj a špatně vymezená mezera se projeví propadem hlavy svaru a svarového kořene. Čím je svařovaný materiál tlustší nebo čím je svar delší, tím výrazněji se výše zmíněný problém projeví. Přídavný drát nejen že doplňuje materiál do svaru, ale také pomáhá překlenout větší mezery, prakticky až k průměru paprsku. Pro milimetrový paprsek tedy překleneme až milimetrovou mezery ve spoji. [2]

A právě Miikka Karhu a Veli Kujanpää [17] svařovali ve své studii kořenovou vrstvu s 1 mm širokou svarovou mezerou a 5 mm vysokým otupením (viz. obr. 32) na nerezové austenitické oceli. Parametry pro svaření kořenové vrstvy byly použity:  $P_L=3$  kW;  $F=0$ ;  $v_L=0,5$  m.min<sup>-1</sup>;  $v_{dr}=1,6$  m.min<sup>-1</sup>



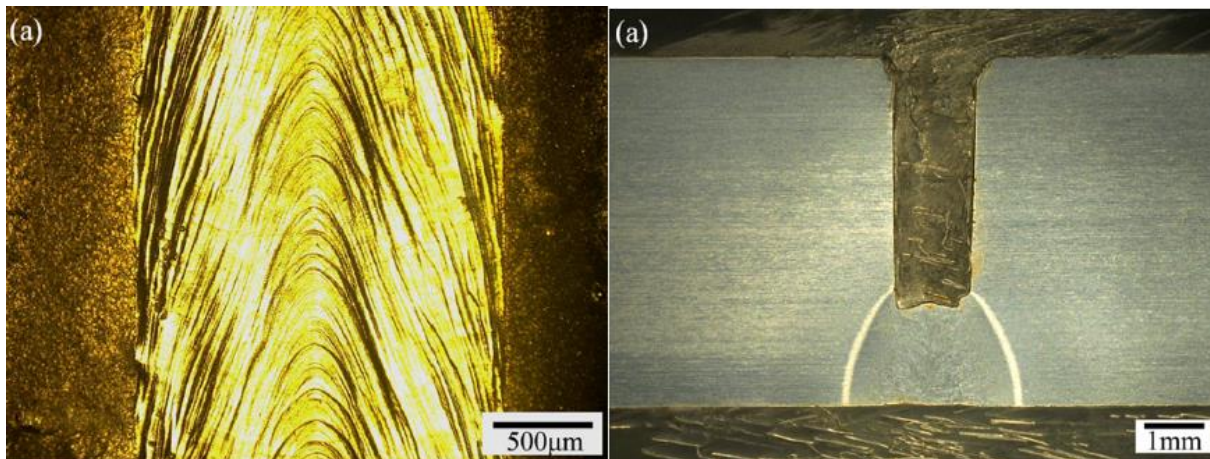
Obrázek 32: Geometrie s 1 mm širokou mezerou a 5 mm vysokým otupením pro svaření kořenové vrstvy [17]

V další studii W. Guo, a kolektiv [22] svařovali ocel S700 a zvolili pro svařování kořenové vrstvy jinou geometrii čistě bez mezery a s 2 mm vysokým otupením (viz. Obr. 33).



Obrázek 33: Geometrie bez kořenové mezery s 2 mm širokým otupením [22]

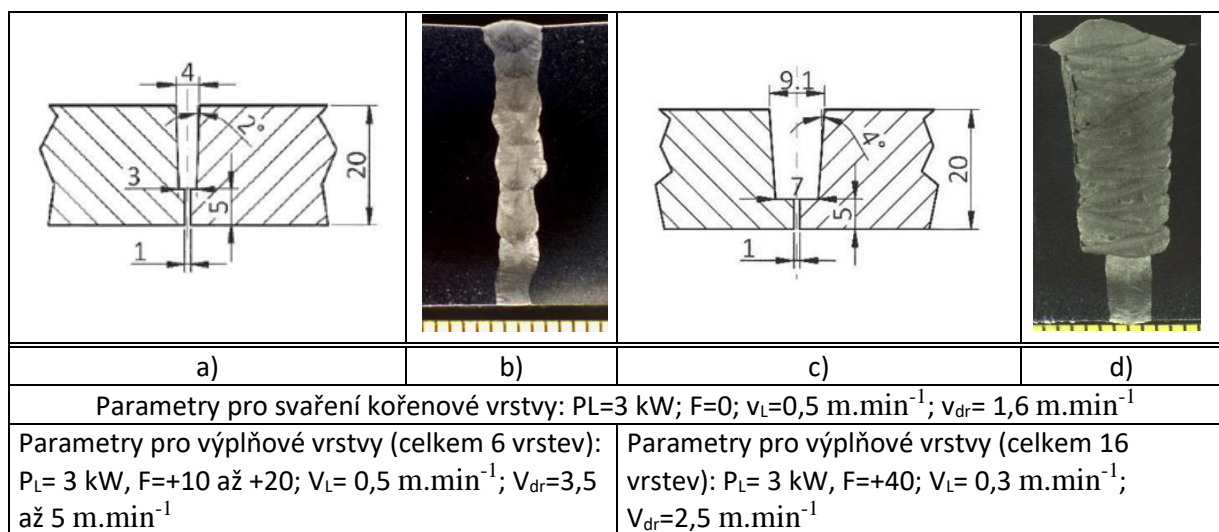
Kořen s 2 mm širokým otupením byl svařen čistě laserovým paprskem. Pro svařování kořenové vrstvy byl nastaven výkon laseru 2 kW. Ohniskový bod laseru byl nastaven 11 mm pod horním povrchem vzorku, tzn. že, poloha ohniska ležela na horním povrchu otupení pro kořen svaru. Rychlost svařování kořene byla 1,2 m.min<sup>-1</sup> Na obr. 34 je výsledný kořenový svar při použití výše uvedených parametrů. [22]



Obrázek 34: Výsledný kořenový svar: výkon laseru 2 kW, rychlost svařování 1,2 m.min<sup>-1</sup>, ohnisko leží na povrchu kořenové plochy [22]

## 4.2 Geometrie „V“ svaru svařeného metodou Cold wire

Miikka Karhu a Veli Kujanpää [17], po zjišťování vlivu polohy ohniska na šířku svarové housenky s přidáním studeným drátem, pokračovali další experimentem a pokusili se svařit plech o tloušťce 20 mm s dvěma možnými geometriemi přípravy svarových ploch (viz. obr. 35). Cíl byl zjistit, jak ovlivní poloha ohniska a rozostření laserového paprsku schopnost natavit hrany svarových ploch ve tvaru „V“, a zároveň tavit přídavný drát, který je přiváděn do svarové lázně, která má vyplnit svarovou mezeru. [17]



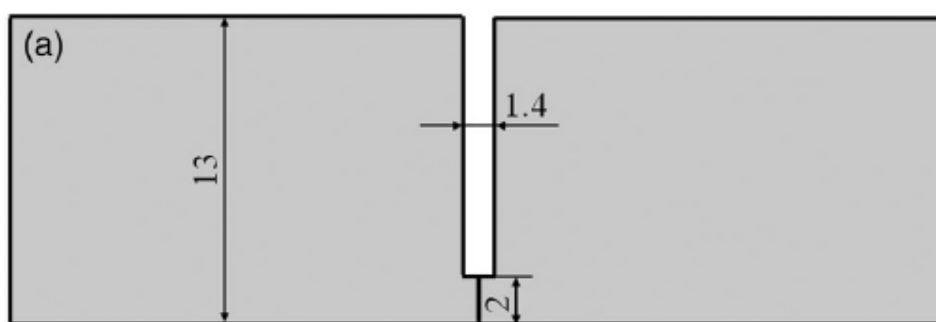
Obrázek 35: Geometrie drážek použité při vícevrstvých zkouškách studeného přídavného drátu a odpovídající makrořezy svaru [17]

Jak je vidět z makrořezu na obrázku 35 b) geometrie mezery o šířce 3 až 4 mm znázorněná na obrázku 35 a) byla úspěšně vyplněna, když bylo potřeba celkem 7 svarových housenek. Pokud jde o výsledky svařování širší drážky zobrazené na obrázku 35c), již při svařování se ukázalo, že použitá geometrie drážky byla v tomto případě příliš široká pro laserové svařování studeným přídavným drátem. Jak je vidět na obrázku 35 d), na levé straně lze pozorovat závažný nedostatek neprůvaru. Nedostatek byl způsoben nedostatečným natavením stěny drážky. A právě kvůli široké drážce bylo nutné rozostřovat paprsek, kvůli

pokusu natavit stěny drážky. Rozostření laserového paprsku s polohou ohniska  $F=+40$  vedlo ke snížení hustoty výkonu, která zhoršila tavnou kapacitu při laserovém svařování studeným přídavným drátem. Důsledkem byl nekvalitní svar, svařený pouze nízkou svařovací rychlostí a nízkou rychlostí podávání drátu ( $\sim 2,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ). Pro vyplnění celé tloušťky 20 mm bylo potřeba provést celkem 17 svarových housenek, což by bylo také značně neproduktivní, i pokud by byl svar dokonale provařen. [17]

### 4.3 Svařování vícevrstvého svaru laserem s přídavným studeným drátem do úzké mezery

V této studii **W. Guo, a kol.** [4] úspěšně svařoval laserem metodou Cold wire do ultra úzké mezery ocel S700 o tloušťce 13 mm. Svar byl proveden v pozici svařování PA. Příprava svarových ploch měla následující tvar, kdy byla obrobena drážka široká 1,4 mm, a příprava pro kořen byla bez mezery s otupením 2 mm (viz. obr. 36). [4]



Obrázek 36: Geometrie svaru Ultra-NGLW [4]

Laserový paprsek měl vlnovou délku 1070 nm. BPP parametr paprsku pro laser byl 10 mm.mrad. Paprsek byl opticky přiveden (s průměrem jádra vlákna 300  $\mu\text{m}$ ) k výstupním čočkám. Laserový paprsek emitovaný z konce optického vlákna byl kolimován čočkou s ohniskovou vzdáleností 150 mm a poté zaostřen na povrch vzorku pomocí čočky s ohniskovou vzdáleností 400 mm. [4]

Byl použit nízký výkon laseru (3 kW) což znamená, že tuto technologii lze použít s nižšími kapitálovými investicemi, než je požadováno u svařování čistě jen laserovým paprskem, kde by byl potřeba laser s vysokým výkonem (např. 16 kW) [4]

Kořenová vrstva s otupením 2 mm byla svařena čistě laserovým paprskem s výkonem laseru 2 kW, poloha ohniska ležela na horním povrchu otupení pro kořen svaru. Rychlost svařování kořene byla  $1,2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  Jak bylo uvedeno v kapitole 4. 2. [22]

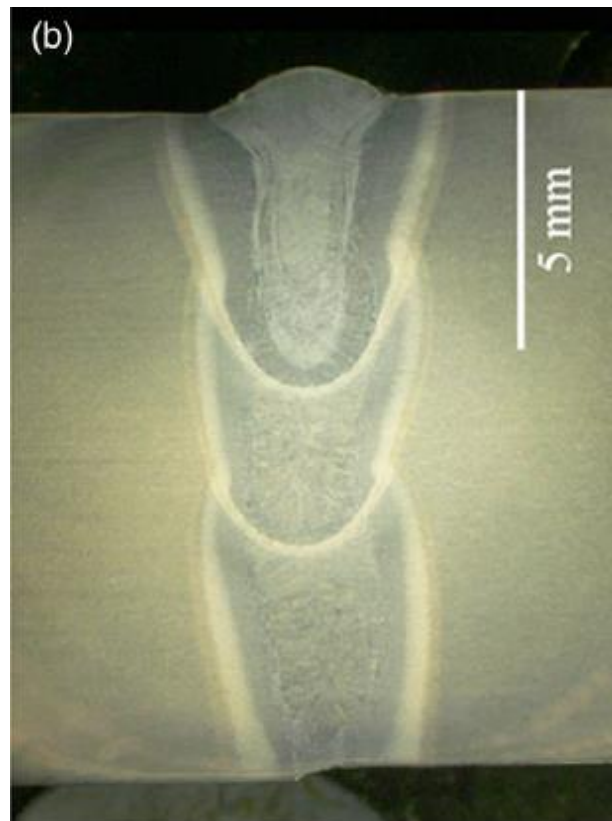
Výplňové vrstvy byly provedeny s přídavným materiálem. Parametry pro tyto vrstvy měli už vyšší výkon laseru 3 kW, rychlost svařování byla  $0,6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , rychlost podávání drátu byla  $3,3 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  a poloha ohniska už byla nastavena na povrch vzorku, aby bylo zajištěno natavování hran základního materiálu a zároveň tavení přídavného materiálu. S každou další vrstvou se poloha ohniska zvedala o 4 mm nad povrch svařovaného vzorku

Na obrázku 37 je makrořez výsledného pokusného svaru, který ukazuje výslednou kvalitu svaru. Svar je zřetelně bez viditelných vad. Byly provedeny 4 svarové vrstvy, první kořenová vrstva byla provedena pouze laserovým paprskem a další tři vrstvy byly už s přídavným materiálem. Svařovací parametry tohoto experimentu jsou shrnuty v tabulce 7. [4]

Svarová vrstva	Použitý výkon laseru [kW]	Rychlost svařování [m.min <sup>-1</sup> ]	Rychlost podávání drát [m.min <sup>-1</sup> ]	Průtok ochranného o plynu [l/min]	Průtok ochranného plynu na kořen [l/min]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Tepelný příkon [kj/mm]
kořenová vrstva	2	1,2	0	12	8	-11	0,08
1. krycí vrstva	3	0,6	3,3	12	8	0	0,17
2. krycí vrstva	3	0,6	3,3	12	8	+4	0,17
3. krycí vrstva	3	0,6	3,3	12	8	+8	0,17

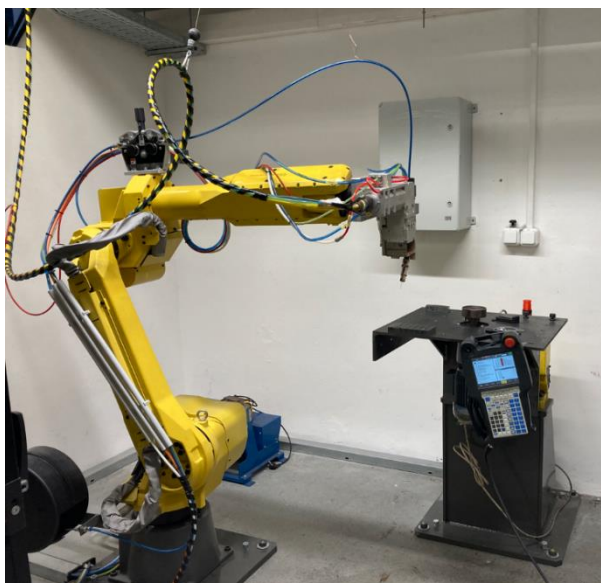
Tabulka 7: Svařovací parametry Ultra-NGLW pro ocel S700 o tloušťce 13 mm [4]

**Tento experiment může být jakým si návodem, jak připravit svarové plochy a jak svařit ještě silnější materiály vysokopevných ocelí metodou Cold wire.**



Obrázek 37: Makro experimentálního svaru, svařeného do úzké mezery, laserem s přidáváním studeným drátem [4]

## 5 Úprava a konfigurace pracoviště pro experimentální část



Obrázek 38: Robotické pracoviště s šestiosým robotem FANUC a dvousým polohovadlem

Robotické pracoviště v laboratoři KMM na ZČU pro provádění experiment je koncipováno následovně:

Laserová svařovací hlava, která má optiku s ohniskovou vzdáleností 300 mm je namontována na šestiosém robotu FANUC. Přídavný drát je přiváděn do roztavené lázně hořákem připevněným k hlavě pod úhlem  $35^\circ$  vzhledem k orientaci laserového paprsku. Čistý argon je vháněn na horní povrch svarové lázně přímo hubicí hořáku. Kompletní pracoviště pro svařování metodou Cold wire pro svařování do úzké mezery je znázorněno na obrázku 38.



Obrázek 39: Diskový laser TruDisk o výkonu 4 kW od společnosti TRUMF

K dispozici je laserový zdroj TruDisk 4006. Zdroj je znázorněn na obr. 39.

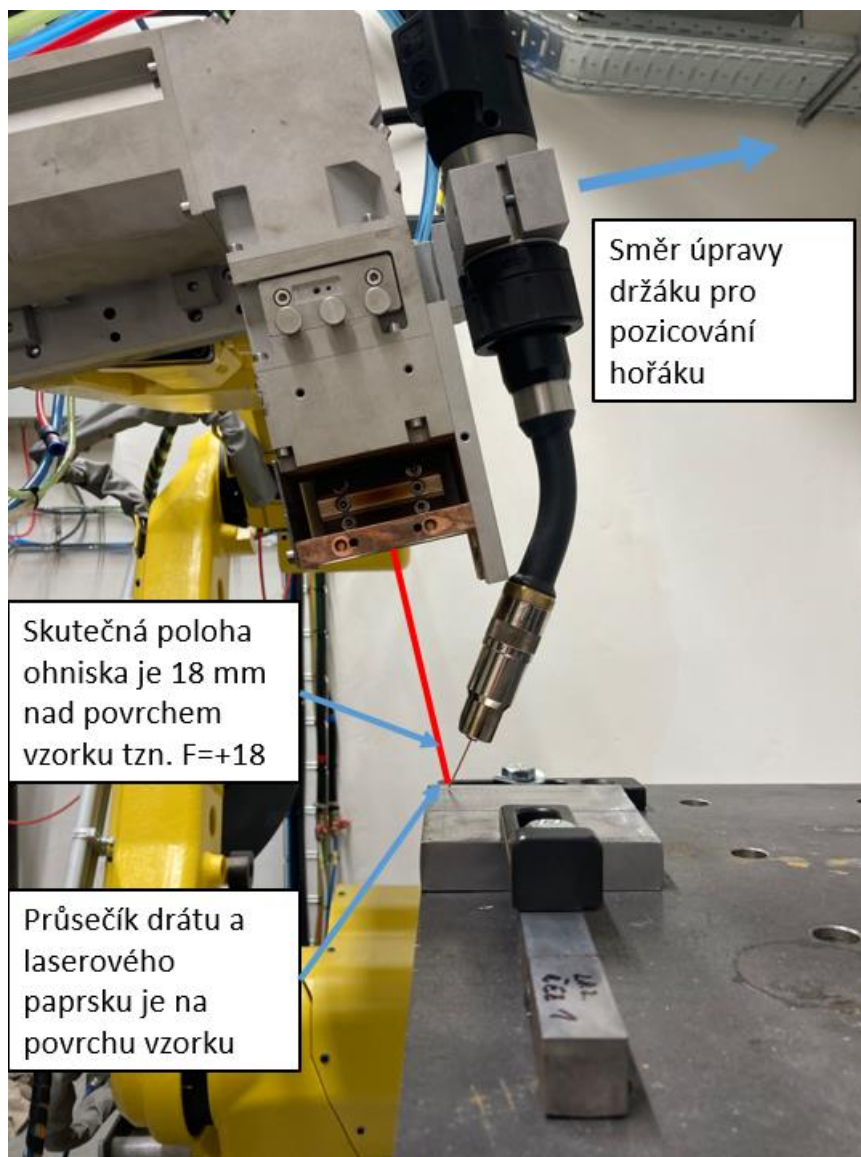
### Parametry laseru:

Výkon laseru	80 W–4000 W
Numerická apertura	0,1
Vlnová délka	1030 nm
Šířka vlákna paprsku	600 $\mu\text{m}$
BPP	25 mm.mrad



## Úprava držáku hořáku pro svařování tlustých plechů

Bylo nutné upravit držák hořáku, aby byla možnost seřizovat výšku ohniska, a zároveň se dostat s drátem až do hloubky drážky 20 mm (viz. obr. 40).



**Obrázek 40:** Úprava držáku hořáku pro přívod drátu a ochranného plynu až do hloubky drážky

Úprava spočívala v tom, že byly profrézovány v jedné ze součástí držáku hořáku drážky pro pera a dlouhá díra pro šroub (viz. obr. 41). Tím bylo docíleno hlubší polohy průsečíku drátu s laserovým paprskem. Prodloužil se tak výlet drátu na cca asi 30 mm. Tato úprava už byla dostačující pro svařování do drážky o hloubce 20 mm.



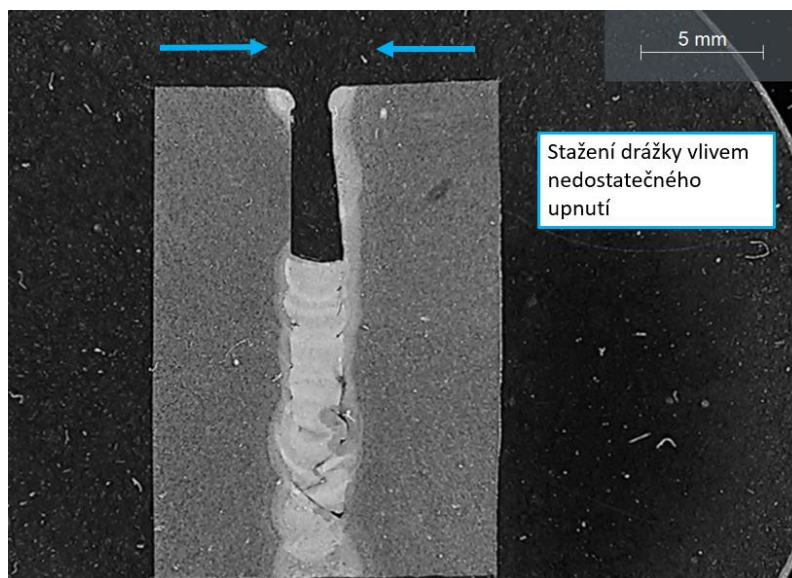
Obrázek 41: Úprava držáku hořáku

## Upnutí dílu

Velice důležité je mít zkušební díly řádně upnuté, protože při vícevrstvěm svařování dochází vlivem pnutí a následné deformaci k zavírání úzké drážky, které potom znemožňuje provedení další vrstvy svaru. Správné upnutí přes upínky a šrouby je na obrázku 42. Na obrázku 43 je možné vidět důsledek nedostatečného upnutí, kdy už nebylo možné provést další svarovou vrstvu.



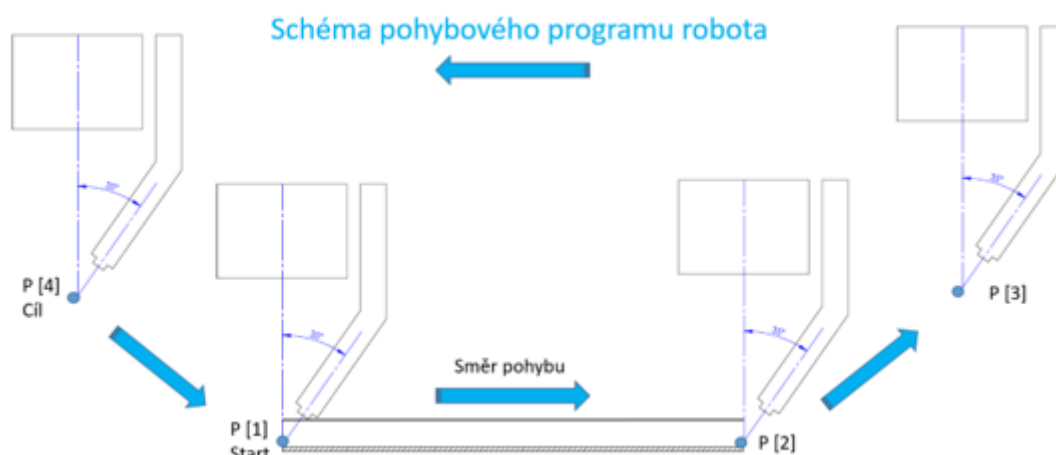
Obrázek 42: Upnutí zkušebních dílů



Obrázek 43: Důsledek špatné upnutí svařence znamená stažení drážky pro svar

## 5.1 Svařovací program

Pro experimentální část byl vytvořen svařovací program s pohybovým schématem, které je znázorněno na obrázku 42. Základem programu jsou pohyby, kdy se robot pohybuje z bodu P [1] až do bodu P [4] po lineárních drahách.



Obrázek 44: Schéma pohybového programu robota z bodu P [1] do bodu P[4]

Program je dále doplněn o příkazové instrukce, přes které je definován svařovací proces. Kompletní program je na obrázku 45.

Základní instrukce jsou:

1. rychlost pohybu robota (rychlost svařování v  $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ )
2. svařovací výkon laseru [W],
3. rychlost podávání drátu [ $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ],
4. posun ve vertikální ose Z pro další vrstvu svaru [mm],
5. počet opakování cyklů, to znamená, kolik vrstev bude svařováno
6. volání podprogramu pro aktivaci laseru a podávání laseru
7. volání podprogramu pro deaktivaci laseru a podávání drátu

Při průběhu experimentu bylo nutné podprogramy pro aktivaci a deaktivaci laserového paprsku a zároveň spuštění a vypnutí posuvu přídatného drátu stanovit prodlevy, kdy se má drát začít přidávat po spuštění laseru, a kdy má skončit přidávání drátu před vypnutím laserového paprsku.

Tyto prodlevy jsou velice důležité pro plynulý svařovací proces, protože při předčasném nebo současném přidávání drátu při zapnutí laseru nedochází ke kvalitnímu tavení drátu a vzniká defekt (např. přilepená kulička) hned na začátku svaru, který může způsobovat nemožnost kvalitního provedení startu další svarové housenky.

Pozdní vypnutí přidávání drátu před vypnutím laseru způsobuje přivaření drátu v tuhnoucí svarové lázni, což dostává robotické rameno v podstatě do „kolize a přetížení“. Důsledkem je ohýbání držáku hořáku a vychylování podávání drátu mimo laserový paprsek. To znamená, že by v důsledku přilepení drátu a následného násilného odtržení způsobí „ohyb“ držáku hořáku, který potom vede přídatný drát mimo drážku.

### Vytvořený svařovací program- zadávání svařovacích parametrů

1: OVERRIDE=30%	←	procenta ze zadané rychlosti svařování
2: PR[1]=LPOS-LPOS		
3:		
4: GO[5:prog num]=2		
5: GO[7:laser power]=4000	←	zadávání výkonu laseru [W]
6: GO[1:WireSpeedForward(cm/min)]=		
: 85	←	zadávání posuvu drátu [cm/min.]
7: R[5:posun x]=2	←	zadávání posuvu další vrstvy v ose Z [mm]
8: //R[6:posun y]=1.3		
9: //R[7:posun z]=1.3		
10:		
11: R[10:speed]=100	←	zadávání rychlosti svařování [cm/min]
12: WAIT .20(sec)		
13:		
14:		
15: FOR R[1:pocitani cyklu]=0 TO 7	←	zadávání počtu vrstev v ose Z
16: PR[GP1:1,3]=(R[1:pocitani cyklu]		
: *R[5:posun x])		
17:		
18:L P[1] 200mm/sec FINE	←	počáteční bod svaru P [1]
: Offset,PR[1]		
19:		
20: CALL LASER_START_DRAT	←	aktivace laseru a podávání drátu
21:		
22:L P[2] R[10:speed]cm/min CNT100	←	koncový bod svaru P [2]
: Offset,PR[1]		
23: CALL LASER_STOP_DRAT	←	deaktivace laseru a podávání drátu
24:L P[3] R[10:speed]cm/min CNT100	←	1. odjezdový bod svaru P [3]
:		
25:		
26:L P[4] R[10:speed]cm/min CNT100	←	2. odjezdový bod svaru P [4]

Obrázek 45: Svařovací program pro provedení experimentu

## 6 Experimentální část

Experiment byl proveden na plechu o síle 20 mm z oceli S355J2. S ohledem na zjištěné informace v teoretické části diplomové práce, a technologii, která byla k dispozici, byly experimentální svary provedeny do úzké mezery.

**Experiment má několik částí:**

1. Rozbor svařovaného materiálu, jeho složení, mechanické vlastnosti a svařitelnost
2. Provedení zkušebních návarových housenek s cílem zjistit orientační svařovací parametry a nakonfigurovat pozici laserového paprsku a hořáku vůči svařovanému materiálu.
3. Svařování do hlubší drážky o šířkách 1,6, 2 a 2,4 mm s cílem vyzkoušet proces svařování do hluboké drážky, vyloučit drážky s nevhodným rozměrem, ověřit správnost pozice laserového paprsku a hořáku vůči materiálu a optimalizovat svařovací parametry.
4. Svaření zkušebních vzorků s již optimálními svařovacími parametry
5. Hodnocení makro a mikro struktury, měření mikrotvrdosti
6. Provedení zkoušky tahem

### 6.1 Rozbor přídavného a základního materiálu

#### Přídavný materiál OK Autrod 12.51

V tomto experimentu byl použit drát OK Autrod 12.51 od firmy ESAB. Je poměděný drát pro svařování nelegovaných konstrukčních ocelí s pevností do 530 MPa a jemnozrnných ocelí s minimální mezí kluzu 420 MPa v ochranných atmosférách. Mechanické vlastnosti, které jsou zde uvedené, jsou získány při použití směsi Ar/20CO<sub>2</sub>. [24]

Chemické složení přídavného drátu [%]				
Essab OK Aurod 12.51	C	Mn	Si	
	0,078	1,46	0,85	
Typické chemické složení svarového kovu [%]				
C	Mn	Si	S	P
0.10	1,11	0,72	0,012	0,013
Typické vlastnosti v tahu				
Podmínky	Re [MPa]	Rm [MPa]	Tažnost A [%]	
Po svaření	460	560	26	
Po uvolnění napětí (15 hod. 620 °C)	370	495	28	
Vrubová houževnatost				
Teplota [°C]		Nárazová práce [J]		
20		130		
-20		120		
-30		100		
-40		90		

Tabulka 8: Chemického složení a mechanické vlastnosti přídavného drátu [24]

## Základní materiál konstrukční ocel S355J2



Obrázek 46: Označování ocelí dle ČSN EN 10027-2 [25]

Ocel S355J2 je nejběžněji používané konstrukční oceli s minimální mezí kluzu 355 MPa a zaručenou svařitelností, s použitím pro nenáročné ocelové konstrukce mostů, hal, části kolejových a motorových vozidel atd. Tato ocel je vhodná pro svařování. **Dle ISO TR 15608 je zařazena tato ocel do skupiny ocelí 1. 2.**

Označení	Obsah prvků - ve hmotnosti [% ]					
	C	Si	Mn	P	S	N
<b>S 355 J2</b>	0,2	0,55	1,6	0,025	0,025	-

Tabulka 9: Chemické složení S355J2 dle ČSN EN 10025-2 [26]

Označení	Minimální mez kluzu Re [MPa]	Pevnost v tahu Rm [MPa]	Tažnost A [%] t <3 mm min.	Tažnost A [%] t ≥3 mm min.
<b>S 355 J2</b>	355	470-630	19	21

Tabulka 10: Mechanické vlastnosti S355J2 dle ČSN EN 10025-2 [26]

Uhlíkový ekvivalent CEV pro S 355 J2 je 0,36.

Výpočet uhlíkového ekvivalentu CEV byl navržen mezinárodním svářečským institutem IIW/IIS a je uveden v normě EN 1011-2 jako metoda B. Je určen pro nelegované, jemnozrnné a nízkolegované oceli s obsahem uhlíku 0.05 až 0.025 hm. %. [20, 21]

$$CEV = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (\%) \quad [21]$$

Další výpočet uhlíkového ekvivalentu je podle japonských autorů Ito– Bessyo a je vhodný pro ocel s obsahem C <0,16 hm. %

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad [20]$$

Pro výpočet uhlíkového ekvivalentu existuje v jiných literaturách mnoho dalších vzorců od různých autorů. [20]

Zkušební svar bude proveden bez předehřevu, jak je uvedeno v kapitole 3.1 dle normy ČSN EN 1011-2, se materiály do tloušťky 25 mm a obsahem uhlíku do 0,25 % nepředehřívá, **Ale pozor to platí pro obloukové svařování feritických ocelí!!** Svary svařované laserem mají

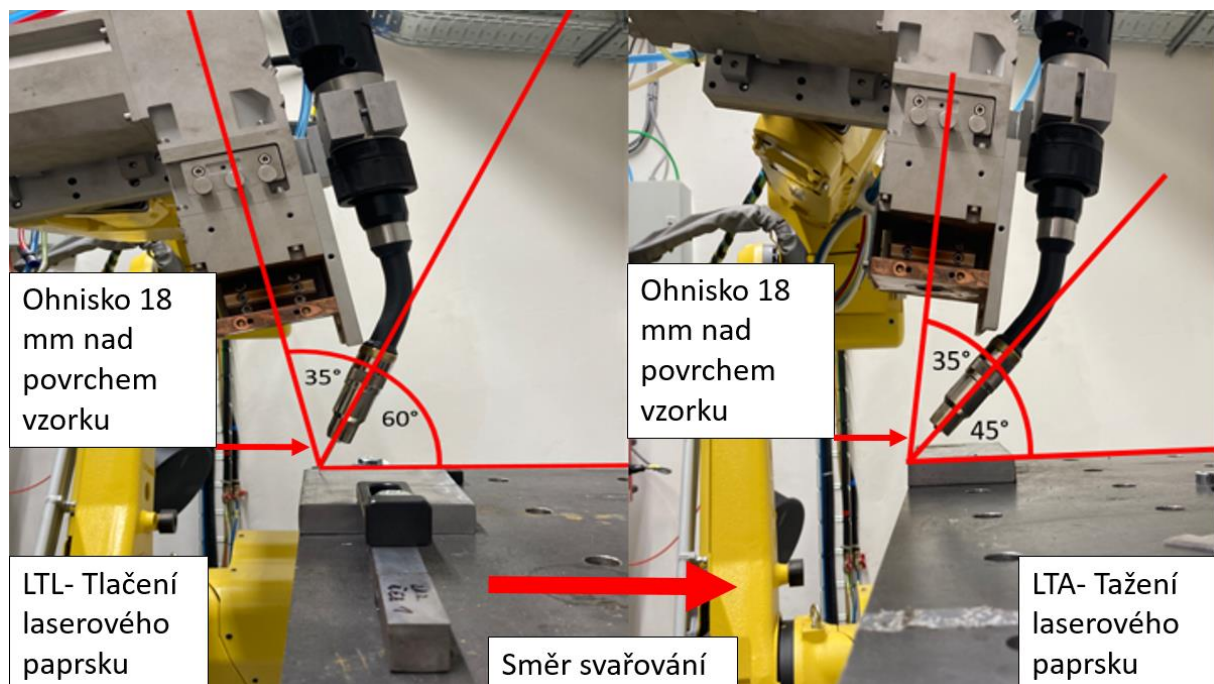
typicky vyšší tvrdost a vliv svařování bez předehřevu se projeví v hodnocení mechanických vlastností a výsledné struktury svarového spoje. Předehřev potom může být jako jedno z opatření na nežádoucí účinky laserového svařování.

## 6.2 Provedení zkušebních návarových housenek na volný povrch

Pro první část experimentu byly připraveny vzorky plechů o tloušťce 20 mm, které měly dokonale očištěný povrch lamelovým leštícím kotoučem. Hledány byly svařovací parametry s maximálním využitím výkonu laseru, ze kterých bylo možné vycházet pro další část experimentu.

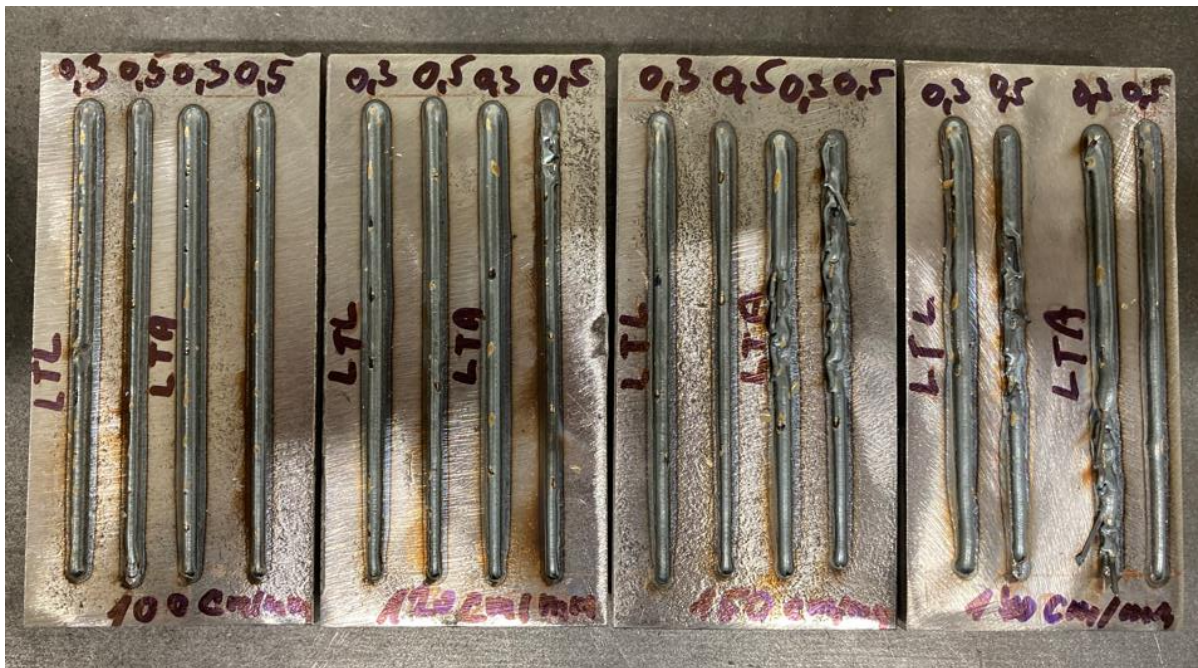
Pro svařování volný povrch byla navařena sada housenek, kde byly zvoleny následující základní parametry:

- výkon laseru 4 kW
- ochranná argonová atmosféra 15 l/min
- rychlost svařování byla zvolena  $V_L = 0,3 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  a  $0,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$
- **svařování s laserovým tlačáním LTL – hořák  $60^\circ$  vůči povrchu plechu a laserovým tažením LTA – hořák  $45^\circ$  vůči povrchu plechu (viz. obr. 47)**
- poloha ohniska nastavena 18 mm nad povrchem plechu → paprsek mírně rozostřen
- zkoušené rychlosti podávání drátu  $100 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $120 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $150 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $170 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$  a nakonec i  $200 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$

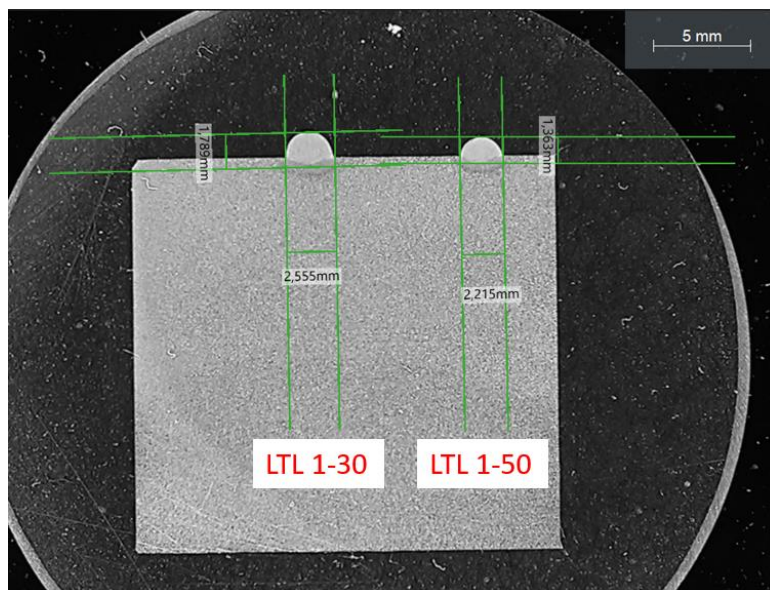


Obrázek 47: Dva základní režimy svařování LTL a LTA při svařování v poloze PA

Po provedení návarových housenek (obr. 48), byly provedeny makrořezy (obr. 49) a následně byla vyhodnocena vhodnost použití parametrů pro další část experimentu, které byly porovnávány dle hloubky průvaru v tabulce 11.



Obrázek 48: Zkušební návarové housenky



Obrázek 49: Makro řez návarových housenek vzorek 1. režim LTL



Označení vzorku	$V_L$ [cm.min <sup>-1</sup> ]	$V_{dr}$ [cm.min <sup>-1</sup> ]	šířka housenky [mm]	výška housenky [mm]	hloubka závaru [mm]
LTL 1–30	30	100	2,555	1,789	0,5
LTL 1–50	50	100	2,215	1,363	0,4
LTL 9–50	50	200	2,598	1,789	0,4
LTL 3–30	30	120	2,555	1,916	0,4
LTA 4–30	30	120	2,641	2,001	0,35
LTA 2–30	30	100	2,896	1,618	0,35
LTL 3–50	50	120	2,257	1,405	0,35
LTA 2–50	50	100	2,342	1,448	0,33
LTA 4–50	50	120	2,129	1,533	0,31
LTL 5–30	30	150	2,385	2,225	0,3
LTL 5–50	50	150	2,172	1,703	0,3
LTL 9–30	30	200	2,427	2,002	0,3
LTA 6–30	30	150	2,513	2,172	0,2
LTA 8–30	30	170	3,066	2,13	0,15
LTA 8–50	50	170	1,959	1,916	0,15
LTA 6–50	50	150	2,087	1,576	0,1
LTL 7–30	30	170	2,428	2,172	0,1
LTL 7–50	50	170	2,342	1,576	0,1

Tabulka 11: Porovnání návarových housenek dle hloubky průvaru při výkonu laseru 4 kW

**Z tohoto experimentu vyplynulo, že je výhodnější používat režim LTL, tedy laserového tlačení (obr. 48), kdy jsme schopni dosáhnout hlubšího průvaru.**

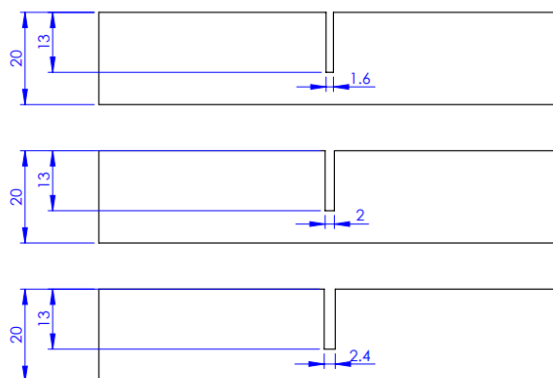
Svařovací parametry použité při svařování návarových housenek na volný povrch materiálu, budou muset být korigovány směrem dolů. To znamená, že pokud zachováme výkon laseru na maximálních 4 kW, a při zachování rychlosti svařování (0,3 nebo 0,5 m.min<sup>-1</sup>), bude muset následovat korekce rychlosti podávání drátu, protože energie laserového paprsku nebude spotřebována pouze pro tavení drátu, ale bude zároveň spotřebována na natavení stěn úzké mezery, jak je popsáno v kapitole 2.3.

### 6.3 Svařování do drážky

Pro svařování do drážky byl vyhodnocen jako vhodnější režim svařování při dané konfiguraci pracoviště režim svařování LTL, tedy mírného laserového tlačení, kdy je možné dosahovat lepšího průvaru (viz. tabulka 11).

Se svařovacími parametry, použitými pro návarové housenky, bylo nutné ještě pracovat, protože při svařování do drážky dochází k několika jevům. Hlavně dochází ke změně množství tepelné energie, která je potřebná k udržení stabilní tavné lázně, natavování stěn drážky a zároveň k tavení přídavného materiálu (viz kapitola 2.3). Tato tepelná energie se mění vlivem odrazů laserového paprsku uvnitř drážky od stěn, ale i od přídavného drátu. Stěny drážky absorbují a odvedou část tepla, zrovna tak je tepelná energie spotřebovávána na tavení drátu.

Zkušebními svary byly provedeny do drážek a měly šířku 2,4 mm, 2,0 mm a 1,6 mm (viz. obr. 50). Poté byly příčně rozříznuty a byla zkoumána makrostruktura a kvalita jednotlivých svarů svařených v různých drážkách s různými parametry svařování.



Obrázek 50: Příprava drážek pro zkušební svary

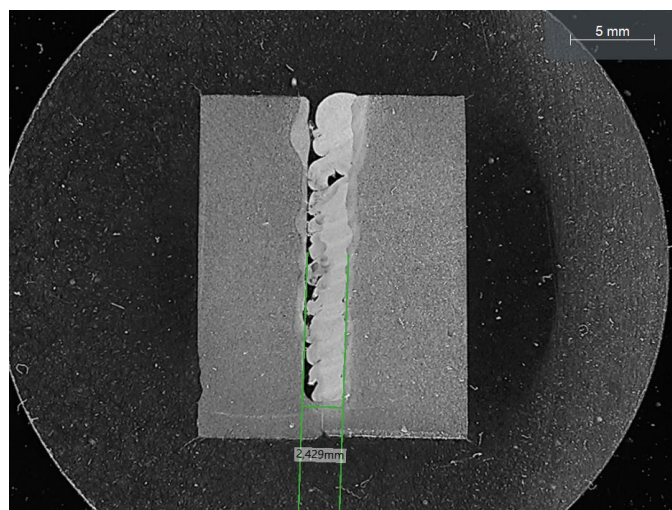
První pokus proběhl do drážek 2,4 mm, které byla postupně vyplněna. Na obrázku 51 je makrořez svaru, který byl svařen svařovacími parametry uvedenými v tabulce 12.

Tato drážka byla moc široká. Samozřejmě proběhlo více pokusů, kde byla nastavována rychlost podávání drátu od  $100 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$  do  $150 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ , ale problémem bylo, že výkon laseru 4 kW nebyl dostačující, aby stihl při rychlosti svařování  $0,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  tavit větší množství drátu než  $150 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Tento problém se projevoval tak, že netavený drát vibroval v podavači a zasekával se a v lázni tak poskakoval, a důsledek je i nestabilita vedení svarové lázně.

Na obrázku 51 je tedy nejrelevantnější pokus ze svařování do drážky o šířce 2,4 mm, kde je patrné nedostatečné vyplnění celé drážky.

Výkon Laseru P [kW]	4
Rychlost svařování $V_L$ [ $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	0,5
Rychlost podávání drátu $V_{DR}$ [ $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	150
Ohnisko F první svarové vrstvy (na povrchu vzorku) [mm]	0
Ohnisko F poslední svarové vrstvy (nad povrchem vzorku) [mm]	+18
Počet vrstev	13

Tabulka 12: Svařovací parametry pro drážku o šířce 2,4 mm



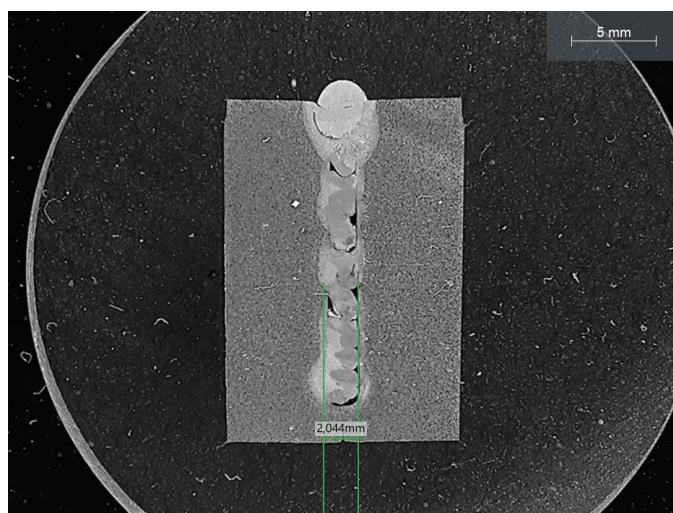
Obrázek 51: Svařování do drážky o šířce 2,4 mm

V druhé sérii pokusů proběhlo svařování do užší drážky o šířce 2 mm. V této sérii byla snaha docílit lepší vyplnění drážky než v předchozí sérii a zároveň byla snaha o lepší tavení drátu a natavování stěn drážky. Takže došlo ke zvýšení výkonu laseru na maximální hodnotu, kterou laser dovozoval na 4,2 kW a také byla zvýšena rychlost podávání drátu na 200 cm.min<sup>-1</sup> pro lepší vyplnění drážky.

Bohužel i přes použití maximálního výkonu laseru (4,2 kW) nebyl tepelný příkon dostatečný, aby dokázal stabilně tavit přídavný drát a stěny drážky. Při dalších pokusech byla snížena rychlost svařování na 0,3 m.min<sup>-1</sup>, aby se zvýšil tepelný příkon. A zároveň se postupně snižovala rychlost podávání drátu až na 100 cm.min<sup>-1</sup>, aby se teplo méně spotřebovávalo na tavení drátu. Tato opatření také nevedla ke zlepšení. Na obrázku 52 je makrořez, na kterém je vidět nedostatečně roztavený svarový kov a mnoho dutin. To svědčí o tom, že tepelný příkon je moc nízký. V tabulce 13 jsou svařovací parametry, se kterými byl svařen svár z obrázku 52.

Výkon Laseru P [kW]	4,2
Rychlost svařování V <sub>L</sub> [cm.min <sup>-1</sup> ]	0,5
Rychlost podávání drátu V <sub>DR</sub> [cm.min <sup>-1</sup> ]	200
Ohnisko F první svarové vrstvy (na povrchu vzorku) [mm]	0
Ohnisko F poslední svarové vrstvy (nad povrchem vzorku) [mm]	+18
Počet vrstev	13

Tabulka 13: Svařovací parametry pro drážku o šířce 2 mm

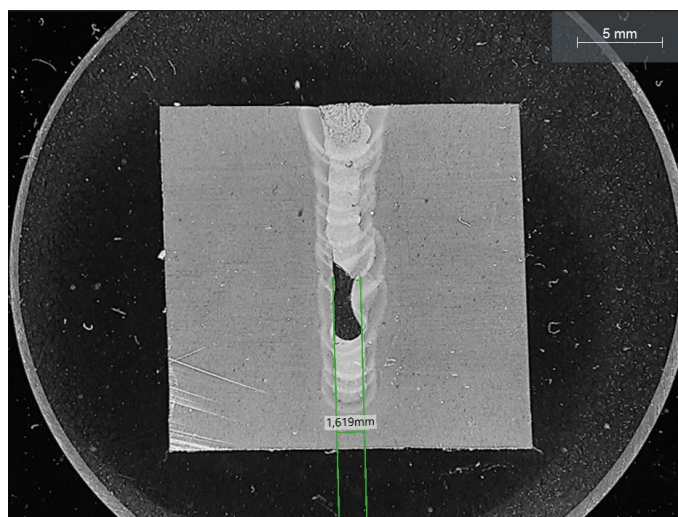


Obrázek 52: Svařování do drážky o šířce 2 mm

Ve třetí sérii pokusů bylo přistoupeno ke svařování do nejužší drážky o šířce 1,6 mm. Opět bylo cílem nalézt optimální parametry pro svaření kvalitního svaru. Vyšlo se ze zkušeností z předchozích sérií a zachovala se pomalejší rychlost svařování 0,3 m.min<sup>-1</sup>. Výkon laseru byl nastaven na 4 kW a u prvního pokusu jsme zachovali rychlost podávání drátu na 100 cm.min<sup>-1</sup>. Postupně se rychlost podávání drátu snižovala, protože docházelo k nedostatečnému tavení drátu a podavač vibroval. Rychlost podávání drátu se ustálila na 65 cm.min<sup>-1</sup>. Výsledný svár již vypadal lépe. Užší drážka lépe vede drát do tavné lázně, ale bohužel svařovací proces nebyl stále stabilní. Na obrázku 53 je makro z pokusu o svar do drážky o šířce 1,6 mm a v tabulce 14 jsou svařovací parametry, kterými byl tento svár svařen. Na makru je opět vidět značný defekt i náznaky neprůvaru. To vše pořád ukazuje na nedostatečný tepelný příkon, který by dokázal udržet stabilní svarovou lázeň.

Výkon Laseru P [kW]	4
Rychlost svařování $V_L$ [cm.min <sup>-1</sup> ]	0,3
Rychlost podávání drátu $V_{DR}$ [cm.min <sup>-1</sup> ]	65
Ohnisko F první svarové vrstvy (na povrchu vzorku) [mm]	0
Ohnisko F poslední svarové vrstvy (nad povrchem vzorku) [mm]	+18
Počet vrstev	13

Tabulka 14: Svařovací parametry pro drážku o šířce 1,6 mm



Obrázek 53: Svařování do drážky o šířce 1,6 mm

Po vyhodnocení svařování do úzkých drážek bylo zjištěno, že na laserové hlavě je defekt, který způsobil, že výkon laseru byl velice nízký, a tudíž docházelo k nestabilitě svařovacího procesu. Nemohly být natavovány stěny drážky a zároveň bylo taveno nedostatečné množství přídavného materiálu. V programu byl zadáván výkon 4 kW, ale v realitě se k tomuto výkonu ani zdaleka nepřiblížil. Je možné pouze hádat, s jakým výkonem se svařovalo.

Přesto bylo možné učinit závěr z tohoto pokusu, že konfigurace svařování LTL (laserové tlačení), kdy laser tlačí svarovou lázeň před sebou a před laserovým paprskem je přidáván drát, je výhodnější pro svařování do úzké mezery, a pokud bude svařováno výkonem 4 kW, je drážka o šířce 1,6 mm nejvhodnější pro přesnější přivádění drátu přímo do svarové lázně.

## 6.4 Zopakování první a druhé fáze experimentu

Po opravě defektu laserové hlavy byl experiment zopakován znovu. Byly provedeny návarové housenky na volný povrch v režimu LTL (laserové tlačení) a svařování do zkušebních drážek, ale nyní už pouze do drážky široké 1,6 mm, která se v předešlém experimentu vyplňovala nejstabilněji, protože úzká drážka lépe vede svařovací drát do místa tavné lázně.

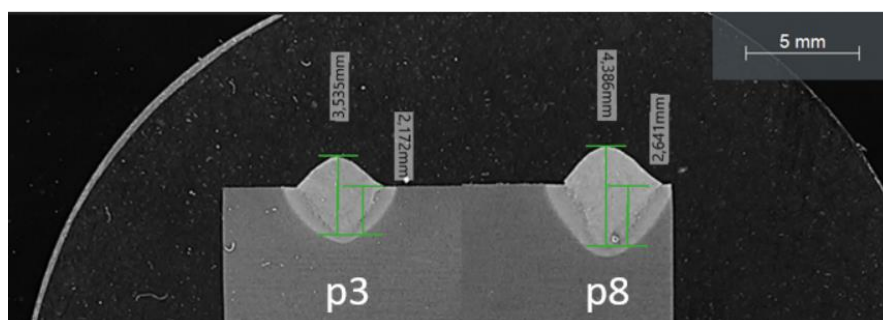
### Svařování na volný povrch plechu různými svařovacími parametry

Na volný povrch, bylo navařeno celkem 10 housenek, kdy při použitím maximálním výkonu laseru 4 kW a poloze ohniska 18 mm nad navařovaným povrchem, byl počáteční posuv drátu 3,3 m.min<sup>-1</sup> postupně zvyšován, až na posuv drátu 5 m.min<sup>-1</sup>. Rychlost posuvu drátu byla

testována ve dvou rychlostech svařování a to  $0,6 \text{ m.min}^{-1}$  a  $0,8 \text{ m.min}^{-1}$ . Argonová ochranná atmosféra byla nastavena na průtok  $15 \text{ l/min}$ . **Při nejrychlejším zkoušeném posuvu drátu  $5 \text{ m.min}^{-1}$  a při obou rychlostech svařování  $0,6$  a  $0,8 \text{ m.min}^{-1}$  se už projevovala nestabilita svarové lázně nadměrným rozstříkem!** Zkušební svařovací parametry jsou shrnuty v tabulce 15. Z tabulky 15 a obrázku 54 patrné, že při vyšší rychlosti svařování se při stejné rychlosti podávání drátu snižuje hloubka průvaru i výška housenky.

Návar	Použitý výkon laseru [kW]	Rychlost svařování [ $\text{m.min}^{-1}$ ]	Rychlost podávání drátu [ $\text{m.min}^{-1}$ ]	Ohnisková vzdálenost nad povrchem vzorku [mm]	Výška housenky nad povrchem [mm]	Hloubka průvaru [mm]	Celková výška svarového kovu [mm]
p-1	3	0,6	3,3	+18	1,708	1,235	2,943
p-2	4	0,8	3,5	+18	1,484	2,053	3,537
p-3	4	0,8	4	+18	1,363	2,172	3,535
p-4	4	0,8	4,5	+18	1,429	1,917	3,346
p-5	4	0,8	5	+18	1,532	2,216	3,748
p-6	4	0,6	3,3	+18	1,66	3,323	4,983
p-7	4	0,6	3,5	+18	1,576	3,194	4,770
p-8	4	0,6	4	+18	1,745	2,641	4,386
p-9	4	0,6	4,5	+18	1,83	1,918	3,748
p-10	4	0,6	5	+18	2,087	1,618	3,705

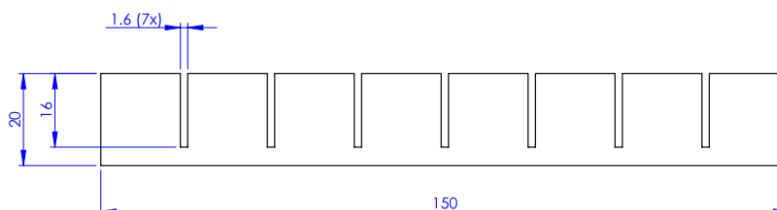
Tabulka 15: Svařovací parametry použité na volném povrchu plechu



Obrázek 54: Příklad provedení návarových housenek

### Svařování různými svařovacími parametry do drážek 1,6 mm

Svařování do drážek bylo zaměřeno na optimalizaci svařovacích parametrů. Zjišťováno bylo jaké množství drátu je schopný laser při výkonu 4 kW v drážce stabilně tavit, tak aby byl svar kvalitní a svařování bylo produktivní. Svařování probíhalo opět ve dvou svařovacích rychlostech  $0,6 \text{ m.min}^{-1}$  a  $0,8 \text{ m.min}^{-1}$ . Bylo provedeno celkem 7 vzorků do sedmi drážek (viz. obr. 55). Svařovací parametry jsou shrnuty v tabulce 16.

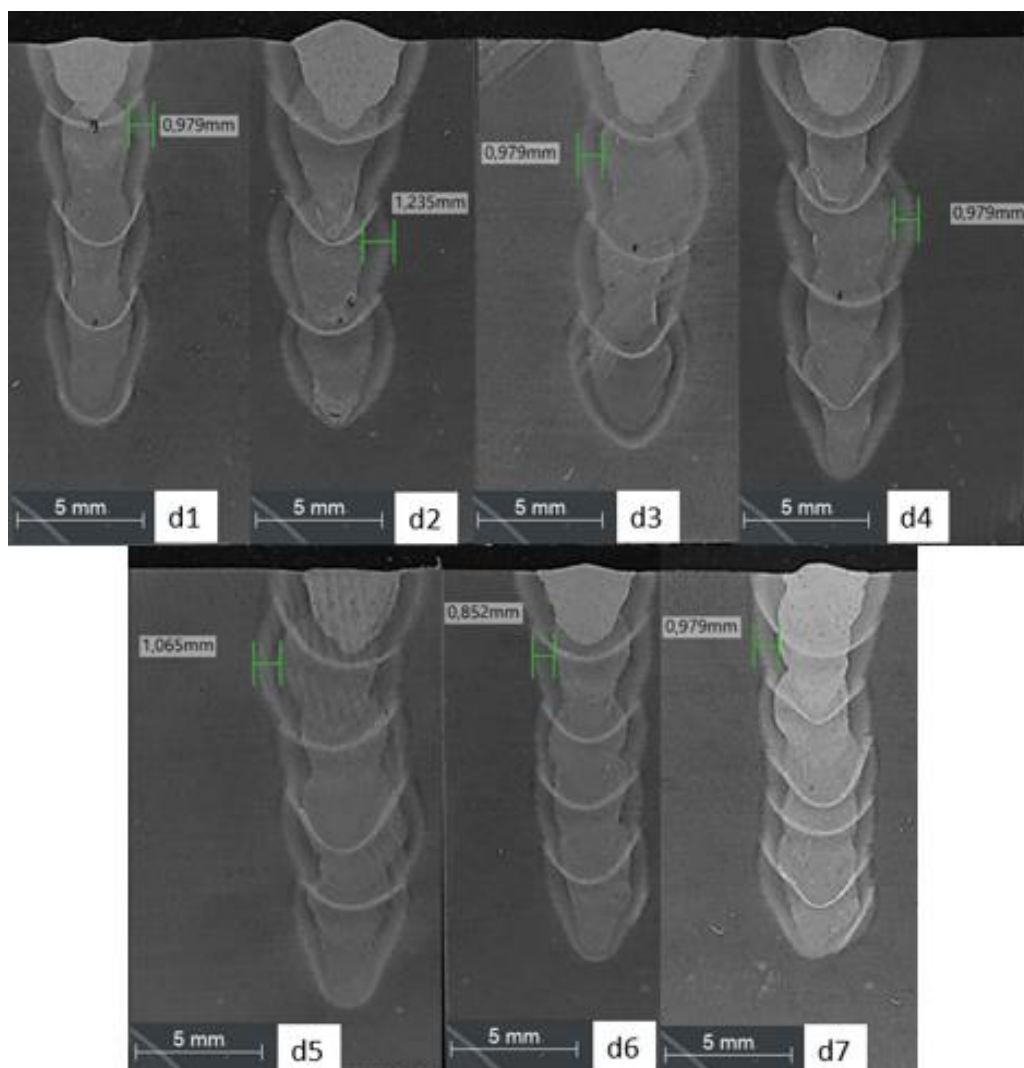


Obrázek 55: Příprava pro svařování do drážek

Drážka	Použitý výkon laseru [kW]	Rychlost svařování [m.min <sup>-1</sup> ]	Rychlost podávání drátu [m.min <sup>-1</sup> ]	Průtok plynu [l/min]	Ohnisko první housenky nad povrchem [mm]	Ohnisko poslední housenky nad povrchem [mm]	Počet vrstev svarových vrstev	Šířka TOO [mm]	Tepelný příkon na jednu vrstvu [kJ/mm]
d 1	4	0,8	4,5	15	+2	+18	4	0,979	0,17
d 2	4	0,6	4,5	15	+2	+18	4	1,235	0,22
d 3	4	0,6	4	15	+2	+18	4	0,979	0,22
d 4	4	0,6	3,5	15	+2	+18	5	0,979	0,22
d 5	4	0,6	3,3	15	+2	+18	5	1,065	0,22
d 6	4	0,8	4	15	+2	+18	5	0,852	0,17
d 7	4	0,8	3,5	15	+2	+18	6	0,979	0,17

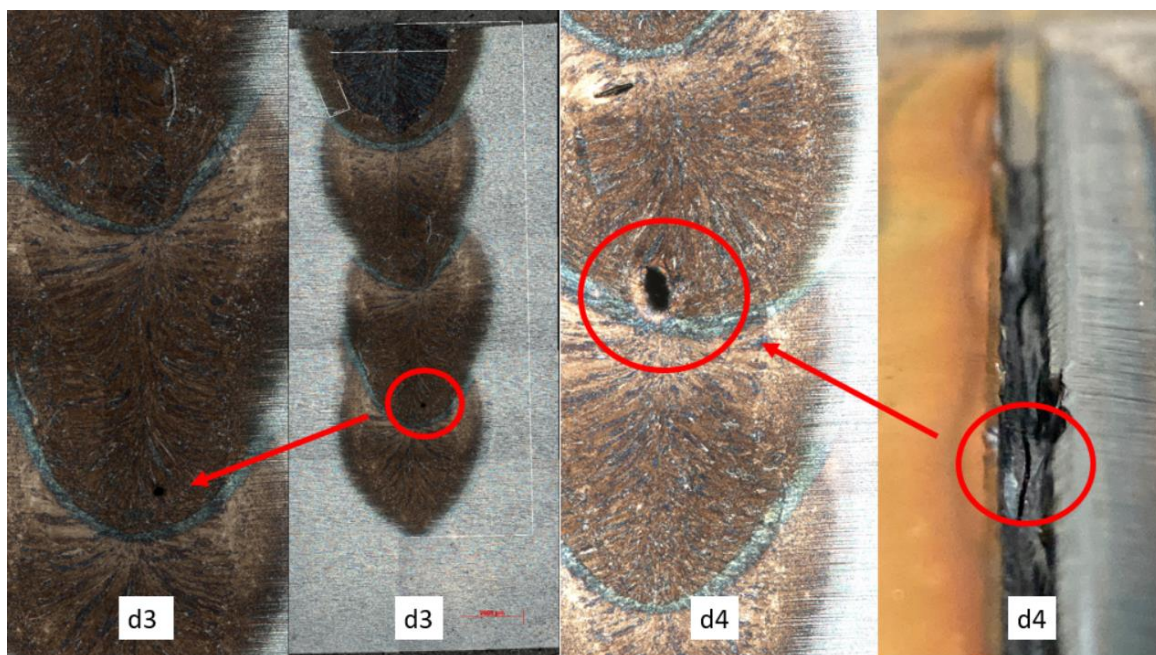
**Tabulka 16: svařovací parametry do zkušební drážky**

Vzorky byly rozřezány a byly provedeny makrořezy. Všechny drážky byly dokonale vyplněny. Byla změřena šířka tepelně ovlivněné oblasti, která se pohybovala od 0,85 mm do 1,24 mm (viz. obr. 56).



**Obrázek 56: Makrořezy svarů provedených do drážky**

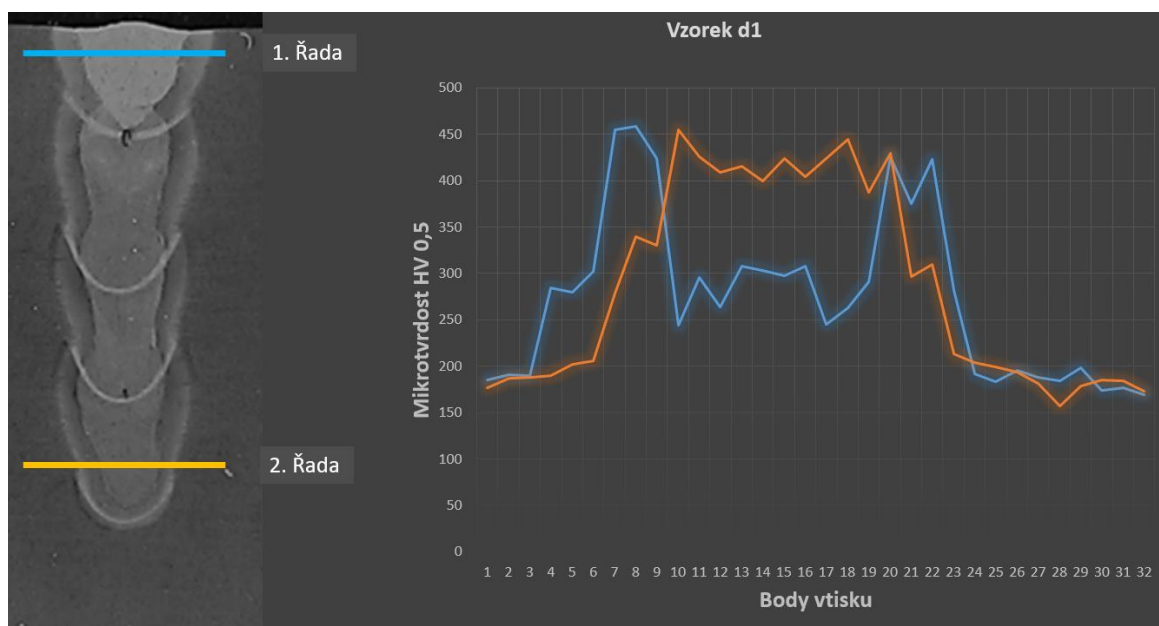
Na některých vzorcích byly indikovány póry mezi jednotlivými housenkami, jak je vidět na obrázku 57. Tyto póry byly typicky mezi jednotlivými housenkami.



Obrázek 57: Makro výbrus vzorku d3 a d4 indikace pórů v souvislosti se staženinou na povrchu housenky

Při kontrole procesu svařování byly zaznamenány povrchu staženiny, jak je vidět na obrázku 57 úplně vpravo. Tyto staženiny byly zaznamenány především na prvních svarových vrstvách provedených do drážky. Právě indikované póry mohou být důsledkem těchto staženin, kdy nahromaděný plyn ve staženině, která byla následně převařena další svarovou vrstvou, nestačil uniknout ven ze svarové lázně a zůstal v ní jako indikovaný pór.

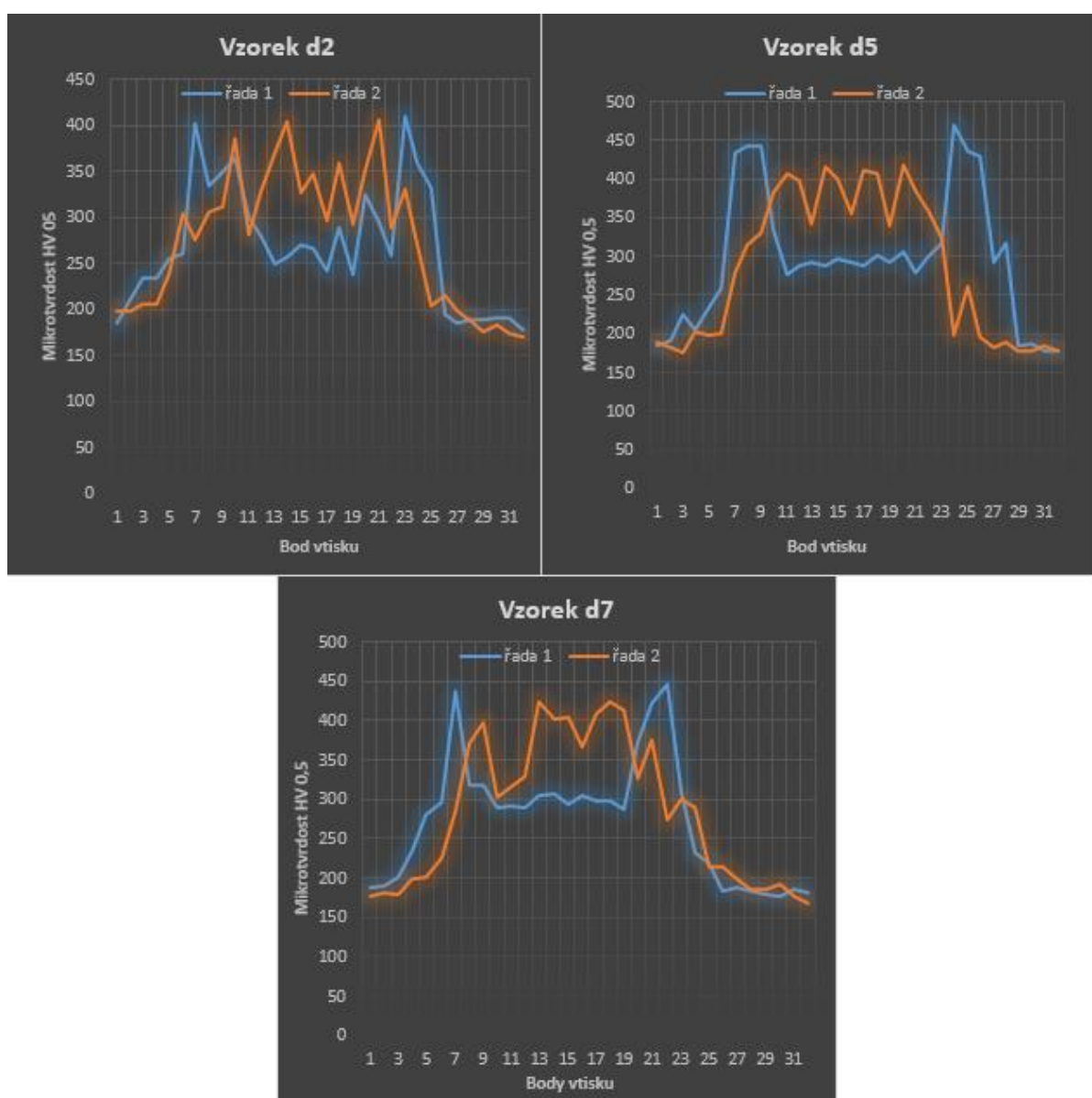
Dále byla na vzorcích zkušebních svarů provedených do drážky změřena mikrotvrdost, kdy byly vytvořeny dvě řady vtisků přibližně 2 mm od povrchu vzorku a přibližně 2 mm od počátku kořenné housenky (viz. obr. 58).



Obrázek 58: Zkušební svar d 1 do drážky 1,6 mm se změřeným průběhem mikrotvrdosti HV 0,5

Mikrotvrdot byla takto změřena u 4 vzorků d1, d2, d5 a d7. Z grafů je patrné, že v kořenové housence je vysoká tvrdost přesně ve středu kořenové housenky, kdežto na povrchové svarové vrstvě dochází k poklesu tvrdosti právě ve středu housenky, přičemž na hranici ztavení je tvrdost nejvyšší. Tento jev je možné připsat rychlosti ochlazování a vzniku základných struktur, kdy při svařování kořenové housenky je svařováno do studenějšího materiálu a došlo k velkému odvodu tepla ze tří stran a pak dále u každé další svarové vrstvy chladne ve středu housenky tavná lázeň pomaleji, protože spodní housenka ze spodního směru působí jako předeřev a horní svarová housenka chladne pomaleji. U dalších svarových vrstev dochází k nejrychlejšímu ochlazování při stěnách drážky, proto jsou nejvyšší hodnoty tvrdosti právě u horních svarových vrstev na hranici ztavení.

Maximální mikrotvrdot zkušebních svarů se pohybuje okolo HV 450 u všech měřených vzorků. Základní materiál má naměřenou mikrotvrdot okolo HV 180, což podle převodníku Bolzano odpovídá pevnosti 575 MPa, kterou má mít ocel S355J2.

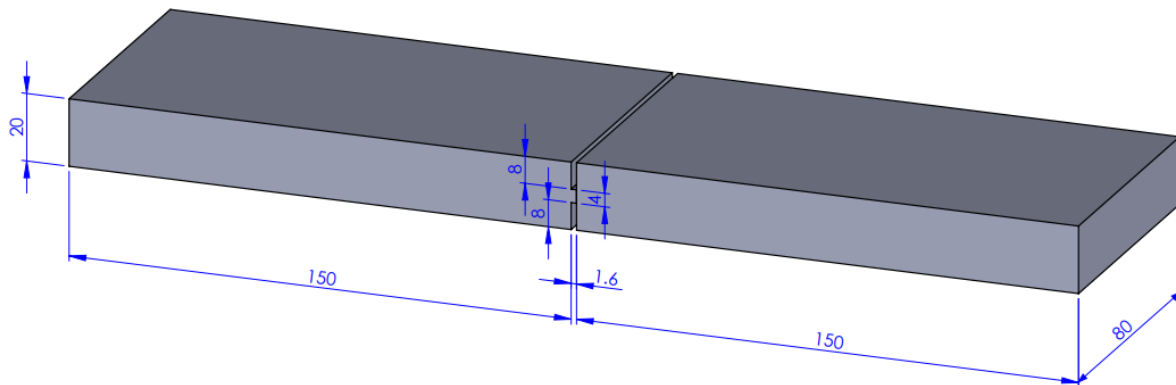


Obrázek 59: Porovnání mikrotvrdoti u vzorků d2, d5 a d7



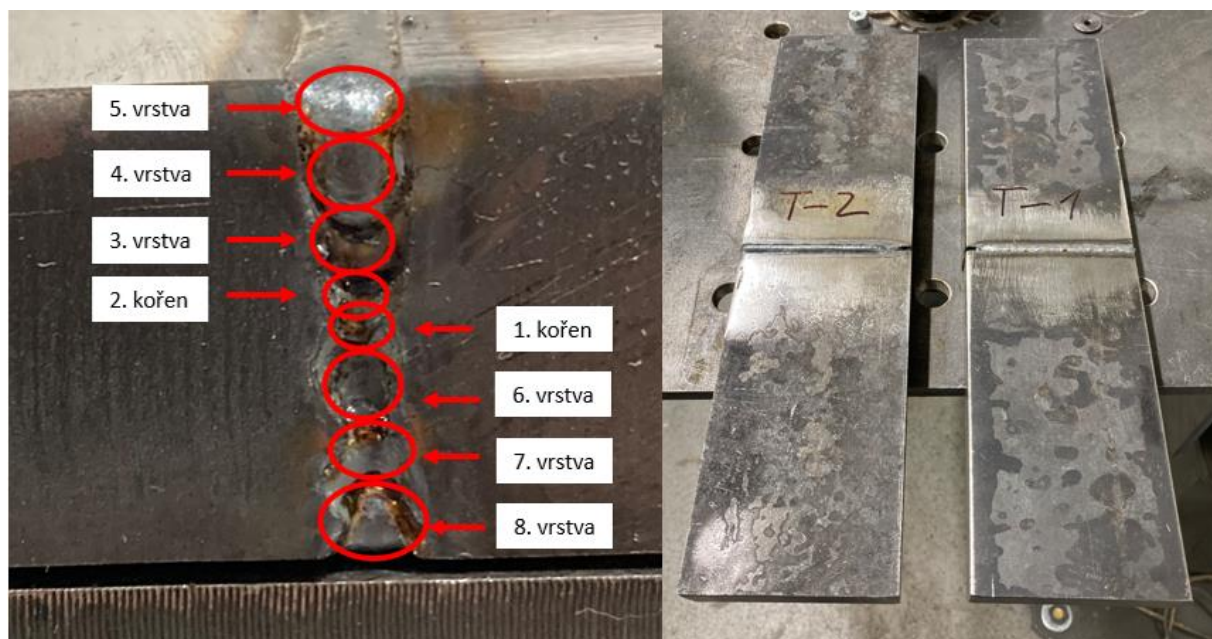
## 6.5 Provedení kompletních zkušebních svarů

Pro svaření plechů o síle 20 mm šířce 80 mm a délce 150 mm byla zvolena příprava svarových ploch do úzké mezery o šířce 1,6 mm s osazením 4 mm širokým, které je ve středu tloušťky plechu (viz obr. 60). Povrch plechu byl očištěn leštícím kotoučem.



Obrázek 60: Finální geometrie přípravy svarových ploch

Po odzkoušení svařovacích parametrů do úzké drážky byla jako nejoptimálnější vyhodnocena drážka o šířce 1,6 mm. Kořen by svařen čistě laserovým paprskem bez přídavného materiálu z obou stran. Výplňové vrstvy byly svařeny s přídavným drátem s rychlostí podávání drátu  $4,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , a se dvěma rychlostmi svařování  $0,8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  a  $0,6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Tyto parametry byly vybrány proto, aby se drážka vyplnila na co nejméně vrstev a předešlo se tak možným vadám. **S rostoucím počtem svarových vrstev může narůstat počet vad.** Kompletní svařovací parametry pro vzorek T1 a vzorek T2 jsou shrnuty v tabulkách 17 a 18. Oba vzorky T1 a T2 jsou na obrázku 61, kde je také znázorněno pořadí provedení svarových vrstev.



Obrázek 61: Pořadí svarových vrstev a kompletně svařené vzorky T1 a T2

<b>Vzorek – T1</b>						
Svarová vrstva	Použitý výkon laseru [kW]	Rychlost svařování [m.min <sup>-1</sup> ]	Rychlost podávání drát [m.min <sup>-1</sup> ]	Průtok ochranného plynu [l/min]	Ohnisková vzdálenost nad povrchem vzorku [mm]	Tepelný příkon [kJ/mm]
1. kořen	3	1	0	15	+10	0,10
2. kořen	4	0,8	0	15	+10	0,17
3. vrstva	4	0,8	4,5	15	+12,7	0,17
4. vrstva	4	0,8	4,5	15	+15,3	0,17
5. vrstva	4	0,8	4,5	15	+18	0,17
6. vrstva	4	0,8	4,5	15	+12,7	0,17
7. vrstva	4	0,8	4,5	15	+15,3	0,17
8. vrstva	4	0,8	4,5	15	+18	0,17

**Tabulka 17: Svařovací parametry pro vzorek T1**

<b>Vzorek – T2</b>						
Svarová vrstva	Použitý výkon laseru [kW]	Rychlost svařování [m.min <sup>-1</sup> ]	Rychlost podávání drát [m.min <sup>-1</sup> ]	Průtok ochranného plynu [l/min]	Ohnisková vzdálenost nad povrchem vzorku [mm]	Tepelný příkon [kJ/mm]
1. kořen	4	0,6	0	15	+10	0,22
2. kořen	4	0,6	0	15	+10	0,22
3. vrstva	4	0,6	4,5	15	+12,7	0,22
4. vrstva	4	0,6	4,5	15	+15,3	0,22
5. vrstva	4	0,6	4,5	15	+18	0,22
6. vrstva	4	0,6	4,5	15	+12,7	0,22
7. vrstva	4	0,6	4,5	15	+15,3	0,22
8. vrstva	4	0,6	4,5	15	+18	0,22

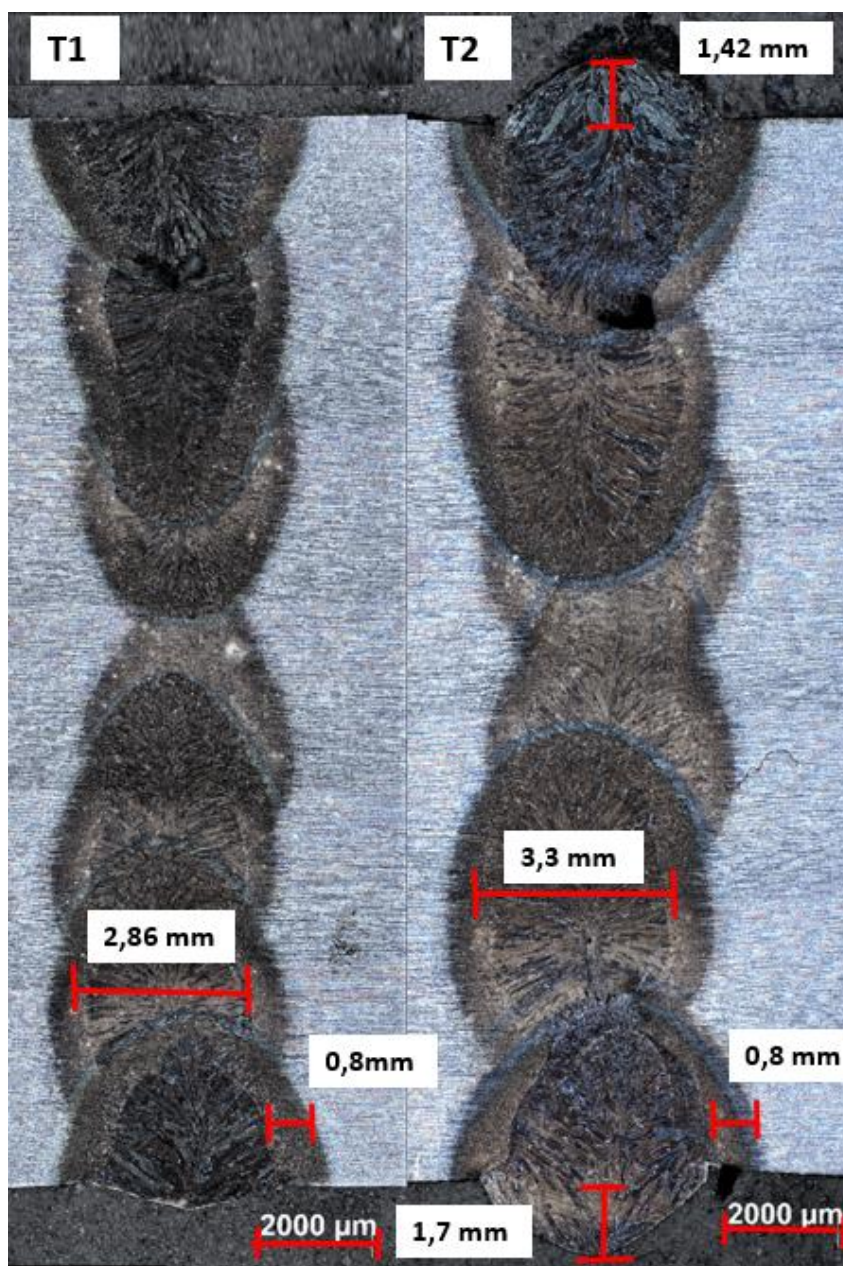
**Tabulka 18: Svařovací parametry pro vzorek T2**

## 6.6 Vyhodnocení výsledků experimentálních svarových spojů

Vzorky T1 a T2 byly rozřezány, kdy byly pořízeny vzorky pro tahovou zkoušku svarových spojů a zároveň byly odebrány vzorky pro výbrus a zkoumání makrostruktury a mikrostruktury.

### 6.6.1 Popis výsledné makrostruktury

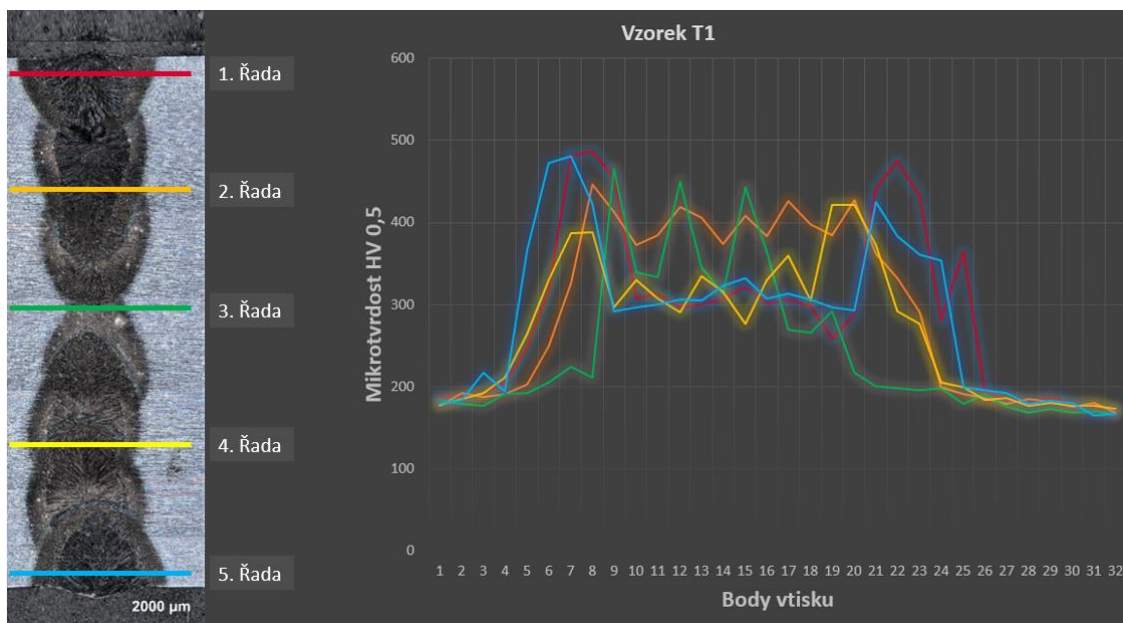
Vzorky byly naleptány leptadlem Nital 5 %. Na makrořezu (viz. obr. 62) nejsou zřetelné žádné větší vady nebo neprůvazy. Je zřejmé, že oba svary jsou širší než 1,6 mm a bylo by možné je ještě optimalizovat zvýšenou rychlostí svařování. Tím by se zúžila i TOO, která dosahuje šířek od 0,8 mm do 1 mm. Svar T2, který byl svařený nižší rychlostí je převýšený až 1,71 mm. Zde u svaru T2 by opět bylo možné optimalizovat tvar svaru a snížit převýšení svaru snížením rychlosti podávání drátu při zachování rychlosti svařování.



Obrázek 62: Porovnání maker vzorku T1 (vlevo) a T2 (vpravo)

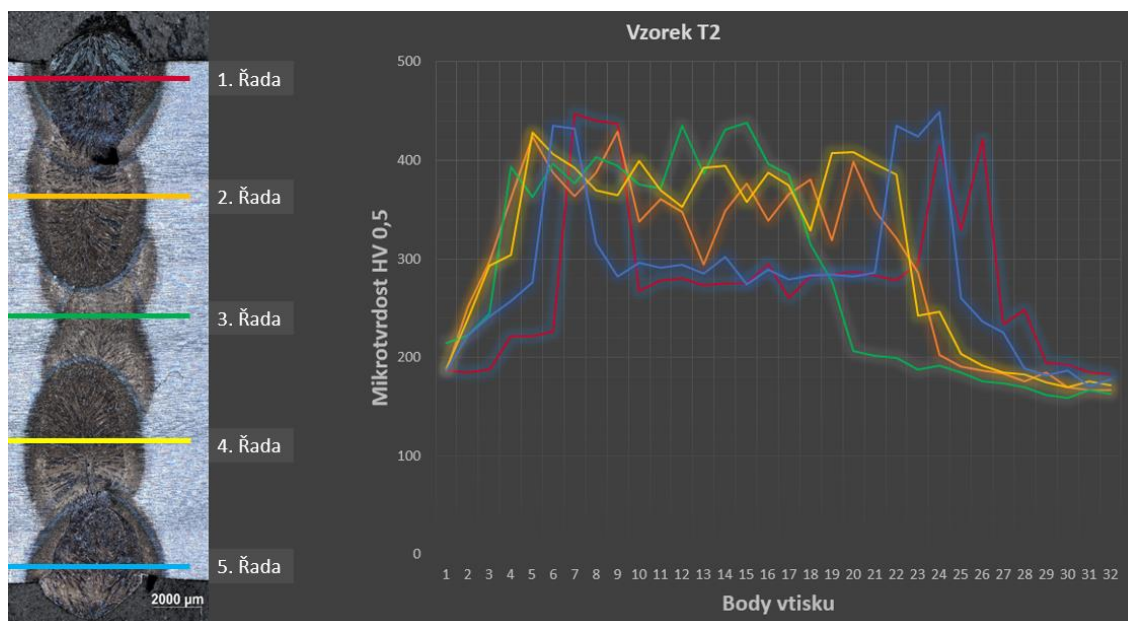
### 6.6.2 Měření mikrotvrdomosti finálních vzorků T1 a T2

U vzorků T1 a T2 byla změřena mikrotvrdomost HV 0,5 v pěti řadách, kdy body vtisku byly od sebe vzdáleny 0,25 mm a bylo jich provedeno 32, tzn., že linie vtisku byla dlouhá 8 mm. Výsledky byly zaznamenány do grafu (viz. obr. 63 a 64).



Obrázek 63: Měření mikrotvrdomosti vzorek T1

Trendy u obou vzorků jsou obdobné. Je patrný nárůst tvrdosti v „kořenové vrstvě“ (zelená linie), kdy kořen byl svařen pouze laserem bez přídavného materiálu z obou stran, kde mikrotvrdomost ve středu svaru vystoupala až k 450 HV<sub>0,5</sub> (místy docházelo také k propadům tvrdosti) a po té plynule klesala až na úroveň tvrdosti základního materiálu okolo 180 HV<sub>0,5</sub>. Vysoká tvrdost při svařování kořene bude způsobena vysokým odvodem tepla přes přípravu svarových ploch a rychlým ochlazováním, protože na začátku svařování měl vzorek pokojovou teplotu.



Obrázek 64: Měření mikrotvrdomosti vzorku T2

U dalších housenek, tak jak byly postupně svařovány s přídavným materiálem, se už projevovalo vnesené teplo, kdy je možné pozorovat snížení mikrotvrdosti ve střední části svaru (každá další housenka měla ve středu svaru tvrdost nižší), kdežto na hranicích ztavení je tvrdost maximální. Opět je to možné zdůvodnit maximální tvrdost na hranicích ztavení, nejvyšším odvodem tepla přes stěny drážky. A naopak pokles tvrdosti ve středu svarových housenek lze vysvětlit postupnou kumulací vneseného tepla, to znamená, že s každou další housenkou chladne středová část tavné lázně pomaleji, a tudíž se netvoří základné tvrdé struktury v takovém množství, a zároveň může docházet k popouštění základných struktur v housenkách ve spodních vrstvách, u kterých ještě nebylo při jejich svaření nakumulováno vnesené teplo.

Za povšimnutí ještě stojí maximální dosažená tvrdost u vzorku T1, která se blížila k 500 HV<sub>0,5</sub>. Kdežto u vzorku T2 byla maximální tvrdost naměřena něco okolo 450 HV<sub>0,5</sub>. Opět zde hrálo roli vnesené teplo, protože vzorek T2 byl svařen se stejným použitým výkonem 4kW, se stejným množstvím přídavného drátu 4,5 m.min<sup>-1</sup>, ale s nižší svařovací rychlostí 0,6 m.min<sup>-1</sup>, a tudíž zase chladl pomaleji a měl tak nižší tvrdost než vzorek T1.

### **Opatření ke snížení tvrdosti svaru na standardní hodnoty**

Norma ČSN EN ISO 15614-1 [30] uvádí, že maximální tvrdost této oceli S355J2, která je dle ISO TR 15608 zařazena do skupiny ocelí 1 (podskupiny 1.2), a má mít maximálně tvrdost 380 HV v tepelně nezpracovaném stavu, anebo 320 HV v tepelně zpracovaném stavu.

Aby bylo možné docílit tvrdosti 380 HV v tepelně nezpracovaném stavu, bude nutné aplikovat předehřev. Teplotu předehřevu je možné určit opět dle normy ČSN EN 1011-2, kde se určuje teplota předehřevu ze vzorce podle uhlíkového ekvivalentu CET. [21]

$$CET = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40} = 0,36(\%) \rightarrow Tp_{CET} = 750xCET - 150 = 120 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ [21]}$$

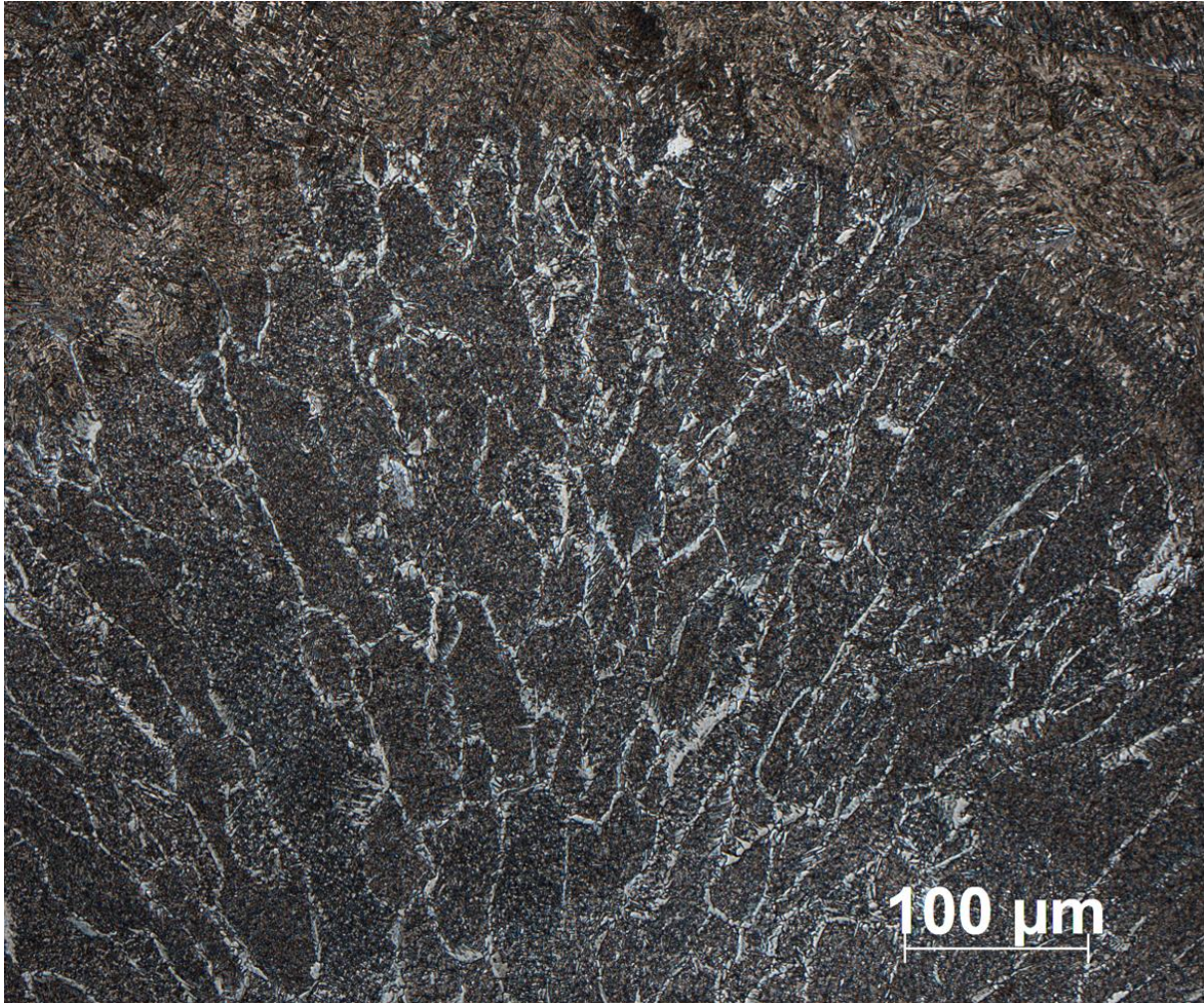
Podle vzorce by byla stanovena teplota předehřevu na 120-150 °C

Pokud by nebylo možné aplikovat předehřev, mohl by se svarový spoj ještě tepelně zpracovat. Přímo ocel S355J2 by bylo možné žíhání ke snížení vnitřního pnutí a popouštění základných struktur 650°C po dobu 2 hod. v peci. Anebo pokud by to technologie umožňovala, rovnou zkombinovat předehřev a tepelným zpracováním, tento experiment již provedl pan Ochodek, při obloukové metodě svařování. Tento postup by musel být ověřen. [29]

### 6.6.3 Popis výsledné mikrostruktury

#### Mikrostruktura vzorku T1

Na obrázku 65 je struktura vzorku T1 v ose svaru. Zde je patrná hrubozrnná struktura původních austenitických zrn s feritickými útvary po hranicích. Je zde také patrný i přechod do TOO ve které je možné pozorovat martenzitickou strukturu, která vzniká vlivem velkého odvodu tepla a rychlého ochlazování, tuto martenzitickou strukturu potvrdilo i měření mikrotvrdosti u vzorku T1, kdy na hranicích ztavení bylo naměřena mikrotvrdost až 490 HV<sub>05</sub>.

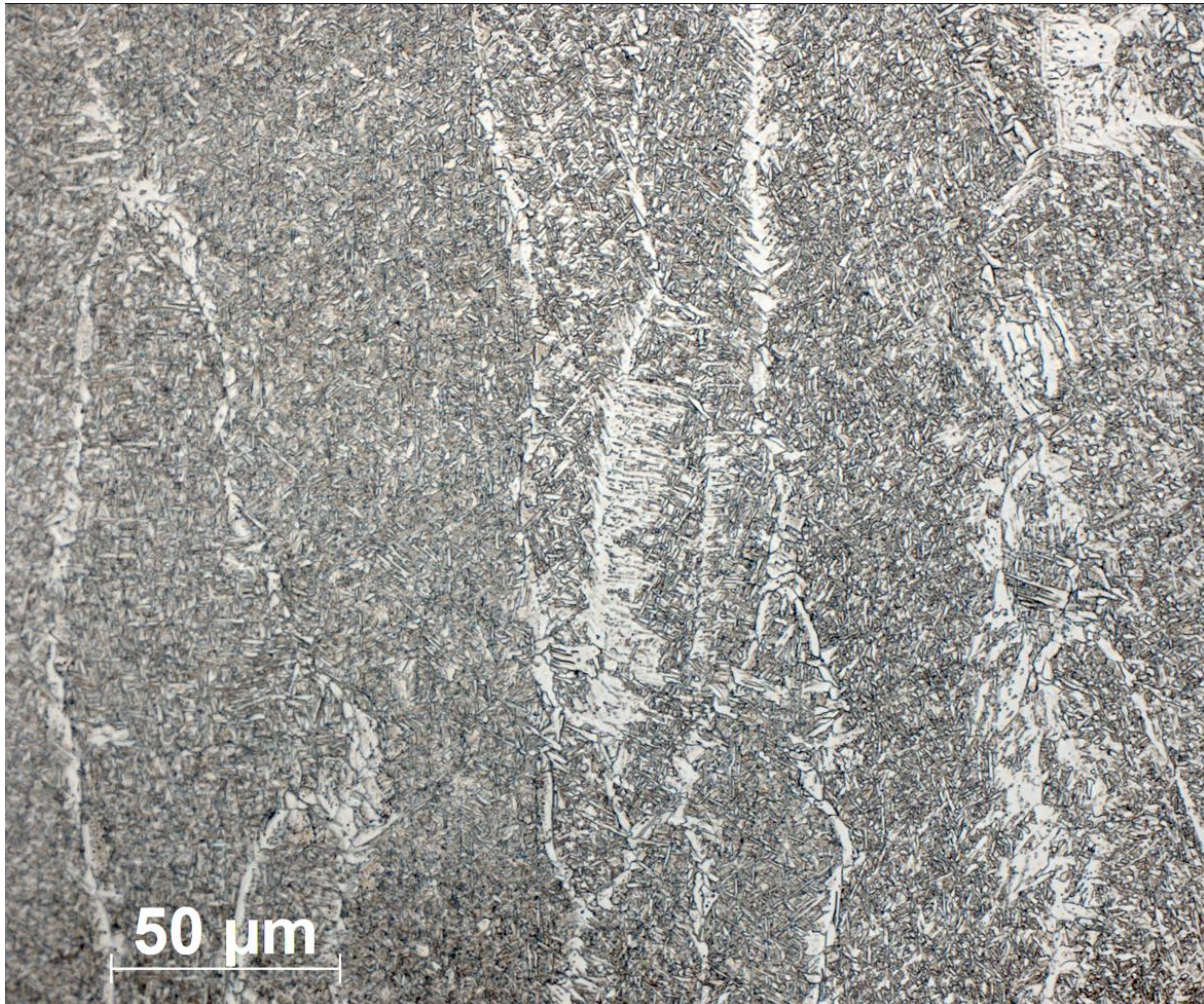


Obrázek 65: T1-Oblast osy svaru zvětšeno 200x

Obrázek 66 je struktura svarového kovu v ose svaru při pětisetnásobném zvětšení. Zde je možné zpozorovat jehlice feritu Widmannstättenovi struktury, po hranicích původních austenitických zrn. Uvnitř zrn se vyskytuje bainitická struktura a místy struktura popuštěného martenzitu, kdy k popuštění dochází při svaření další svarové housenky. Takováto struktura by odpovídala naměřené tvrdosti svarového kovu, která byla měřena na vzorcích T1 a T2, kdy se ve svarovém kovu pohybovala okolo 280–300 HV<sub>0,5</sub> v horních svarových housenkách

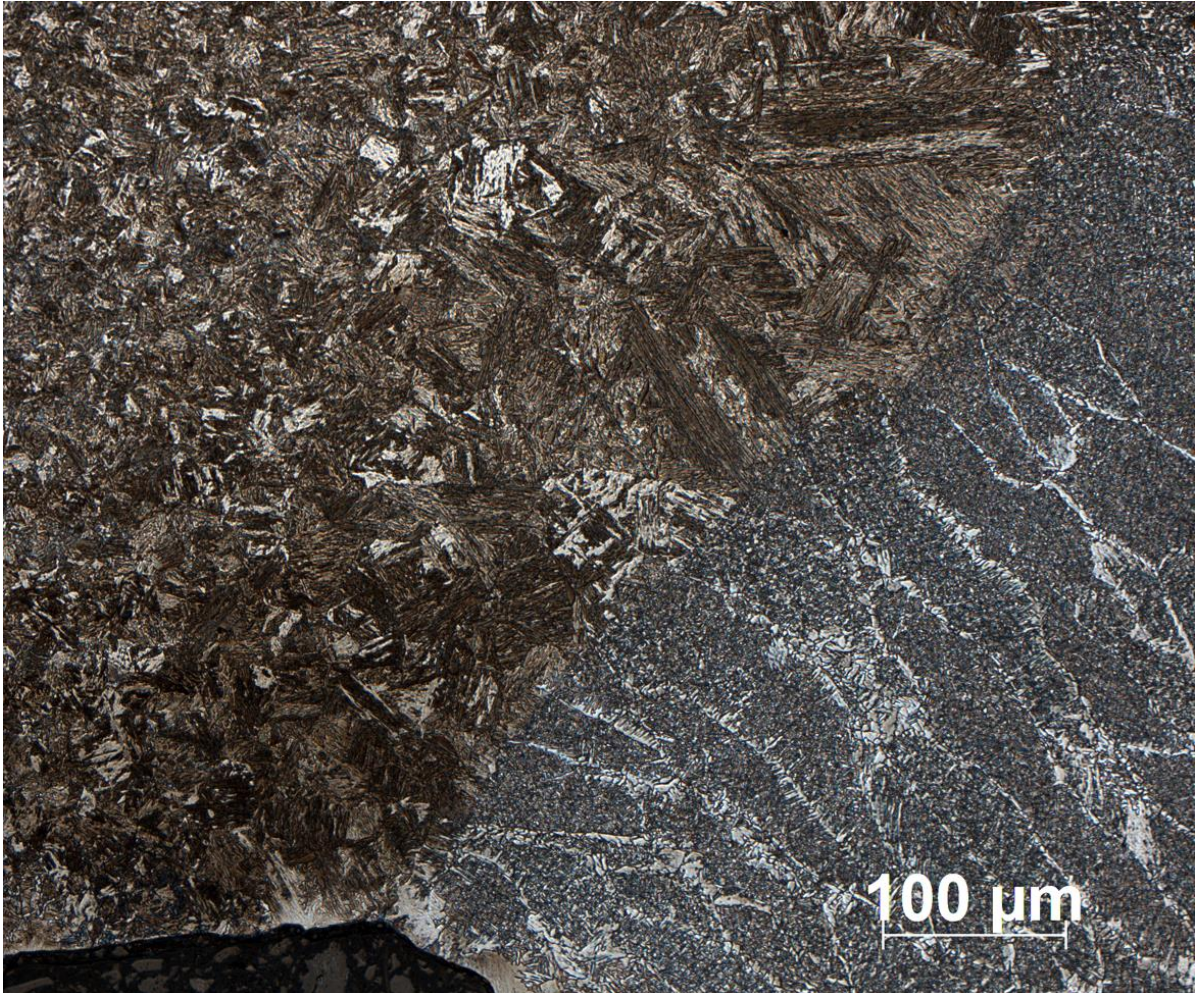
Widmannstättenova struktura vzniká při vyšší rychlosti ochlazování, ale pokud je pořád možná difúze uhlíku. Jednou z podmínek je dostatečně hrubé zrnno, aby mohl uhlík snadno difundovat. Pokud jsou tyto podmínky splněny, tak dochází k vylučování feritu po hranicích původních austenitických zrn ve formě takzvaných „Widmannstättenových jehlic“. [27]

Tato struktura je ve svarech nežádoucí, protože většinou vede ke zkřehnutí oceli (pokles vrubové houževnatosti). Widmannstättenovu strukturu lze eliminovat následným normalizačním žiháním. Nelze ji odstranit žiháním bez překrytalizace, tzn., že mezifázové rozhraní zrn má malou energii a je stabilní. [27]



Obrázek 66: Vzorek T1 – Oblast osy svaru zvětšeno 500x

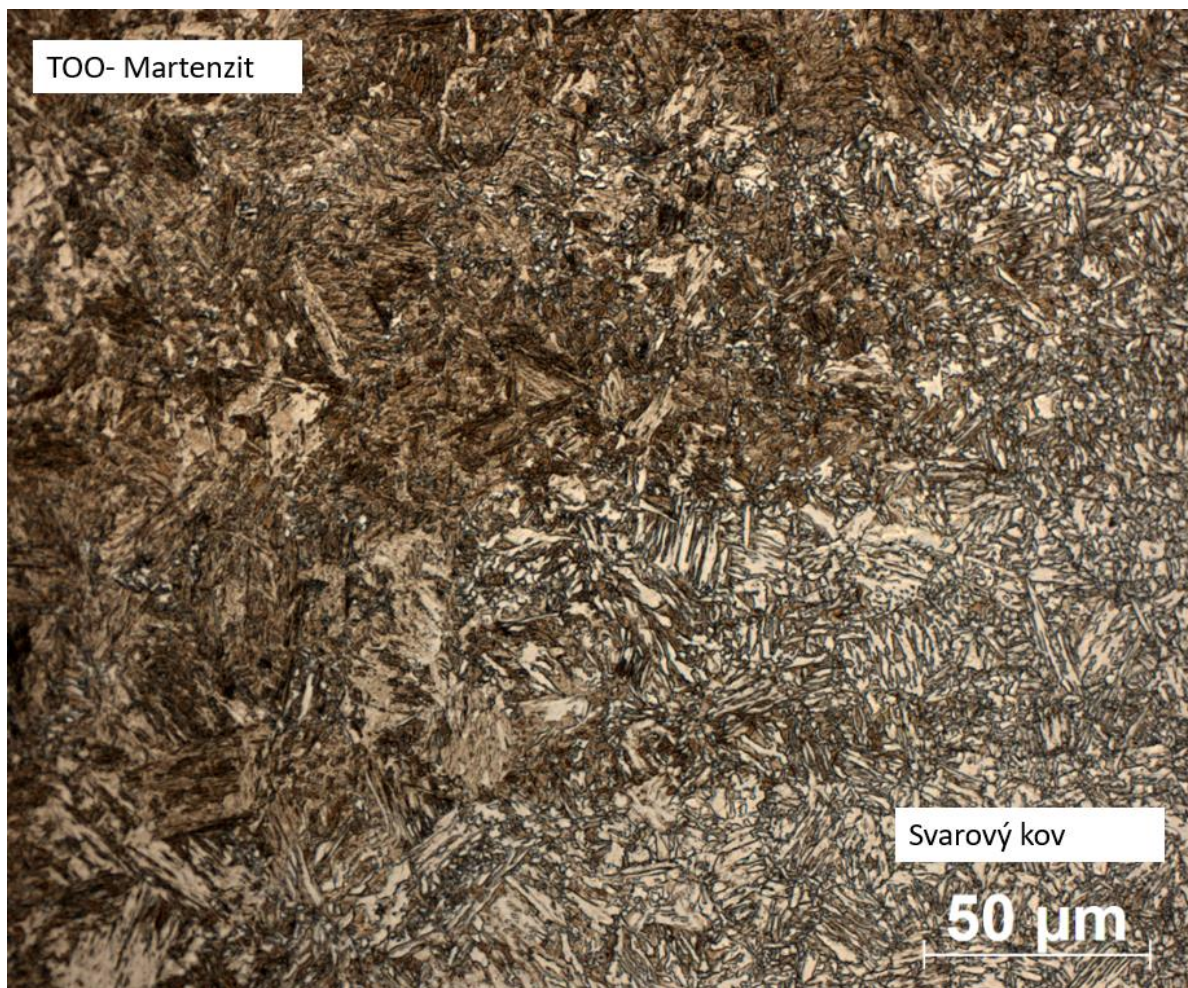
Na obrázku 67 je zachycen přechod mezi svarovým kovem a TOO, kdy svarový kov se strukturou popsanou výše u obrázku 65, přechází do TOO, která má čistě martenzitickou strukturu. Což by opět odpovídalo průběhu naměřených mikrotvrdostí, které byl provedeno na zkušebním vzorku T1, kdy v TOO byla nejvyšší tvrdost na hranici ztavení okolo 490 HV<sub>0,5</sub>, což také odpovídá maximální tvrdosti při obsahu uhlíku okolo 0,2 %. (viz. obr. 28 v kapitole 3.1)



Obrázek 67: Vzorek T1 zvětšeno 200x – Oblast přechodu mezi TOO a svarovým kovem



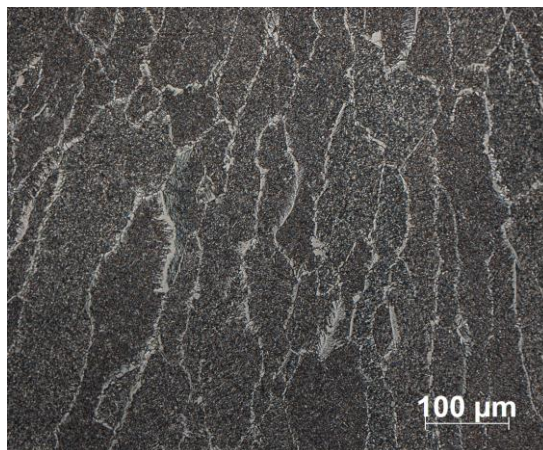
Na obrázku 68 je vyobrazen tento přechod mezi TOO a svarovým kovem při pětisetnásobném zvětšení, kde jsou dosti patrné opět Widmannstättenovi jehlice ve svarovém kovu a martenzitická struktura v TOO.



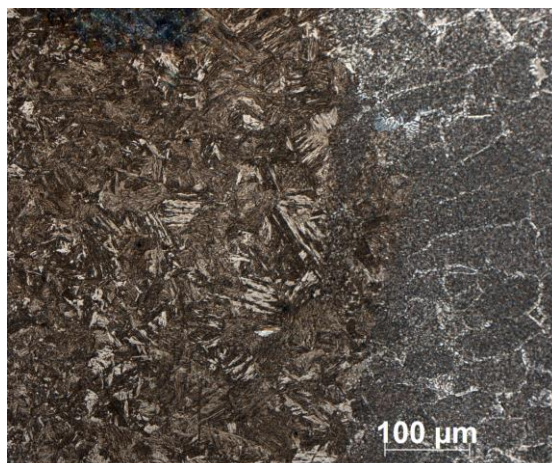
Obrázek 68: Vzorek T1 zvětšeno 500x – Oblast přechodu mezi TOO a svarovým kovem

### Mikrostruktura vzorku T2

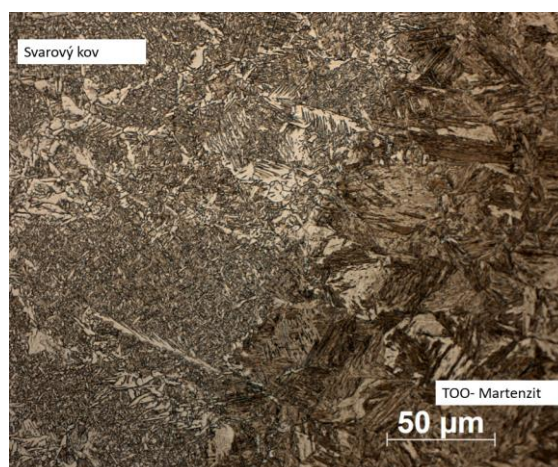
Mikrostruktura u vzorku T2 je prakticky totožná jako u vzorku T1, kdy jednotlivé oblasti jsou vyobrazeny na obrázcích 69 až 72. Kdy ve svarovém kovu je opět Widmannstättenova struktura po hranicích původních austenitických zrn, spolu se strukturami bainitického typu a popuštěným martenzitem. Na přechodu ze svarového kovu do TOO je oblast čistě martenzitická.



Obrázek 69: Vzorek T2 zvětšeno 200x – oblast osy svaru

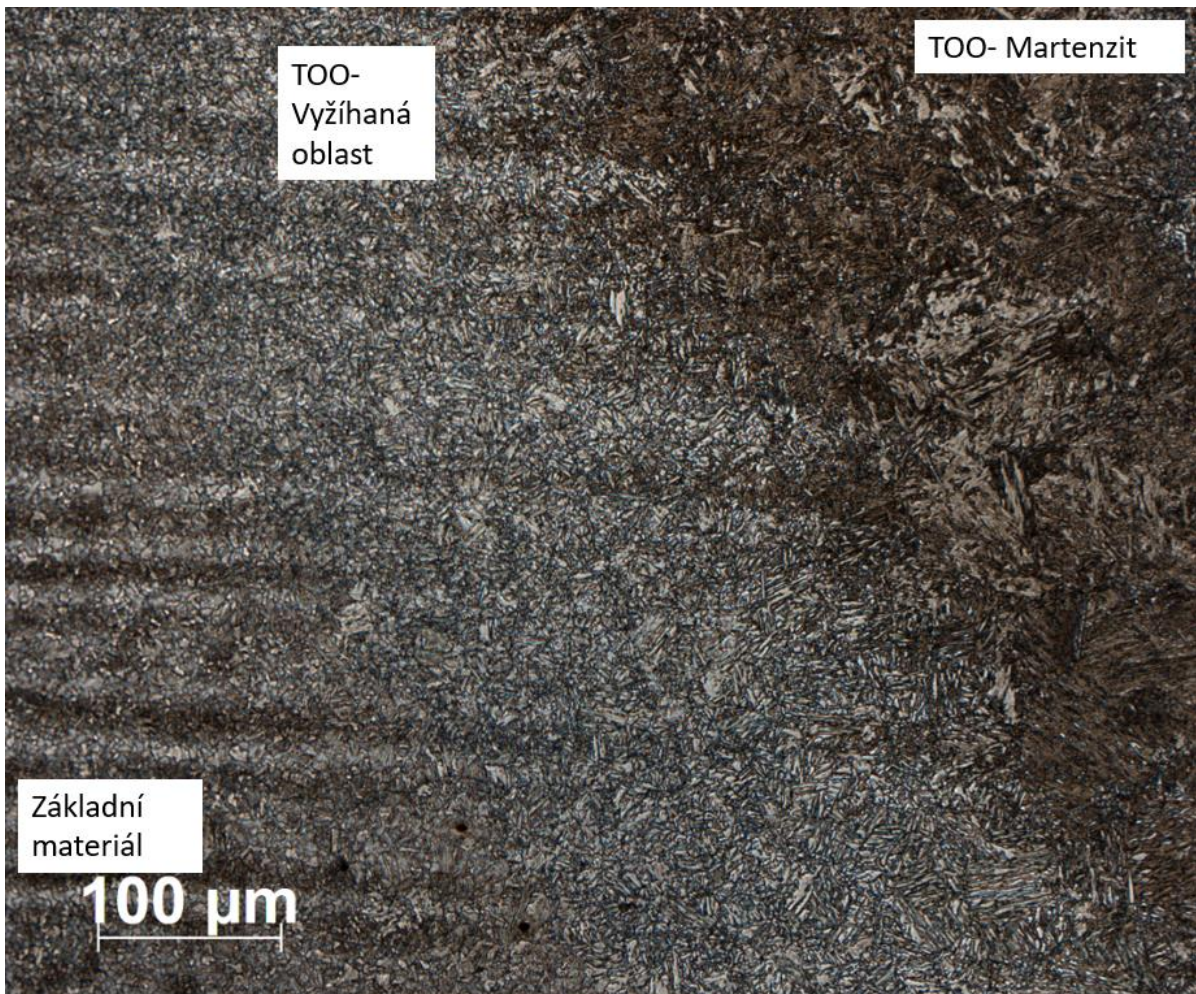


Obrázek 70: Vzorek T2 zvětšeno 200x – oblast přechodu mezi TOO a svarovým kovem



Obrázek 71: Vzorek T2 zvětšeno 500x – oblast přechodu mezi TOO a svarovým kovem

Na obrázku 72 je zobrazena mikrostruktura přechodu TOO do základního materiálu, kdy vpravo je martenzitická struktura, uprostřed je jemnozrnější vyžíhaná oblast, která přechází do základního materiálu, který je feriticko – perlitický.



Obrázek 72: Vzorek T2 zvětšeno 200x – oblast přechodu mezi TOO a základním materiálem

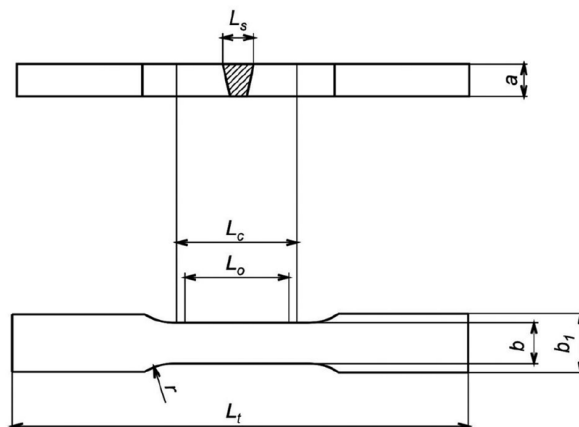
#### 6.6.4 Provedení tahové zkoušky

Zkouška tahem pro svarový spoj i pro čistý svarový kov byla provedena podle metodiky stanovené ČSN EN ISO 6892-1 (420310) Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1 - Zkušební metoda za pokojové teploty). Pokud není uvedeno jinak, provádějí se dále uvedené zkoušky tahem za pokojové teploty, tj.  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . [28]

#### Příčná zkouška tahem

Specifické požadavky a postup při přípravě a vlastním provádění příčných zkoušek tahem, jimiž je zjišťována pevnost v tahu svarového spoje a poloha lomu u tupých svarů a rozměrů zkušebních tyčí, jsou uvedeny v normě ČSN EN ISO 4136 (051121) - Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – příčná zkouška tahem. Zkušební vzorky, ze kterých se opracovávají zkušební tyče, se odebírají příčně tak, aby po opracování zůstala osa svaru ve středu zkušební délky. Tloušťka zkušební tyče musí být stejná jako tloušťka základního materiálu. V případě, že základní materiál je silnější než 30 mm, lze odebírat více zkušebních tyčí tak, aby byla dosažena požadovaná tloušťka zkušební tyče. Zatěžování musí být plynulé do přetržení. [28]

Vzhled zkušebních tyčí je znázorněn na obr. 73, jejich rozměry pak stanovuje citovaná norma. [28]



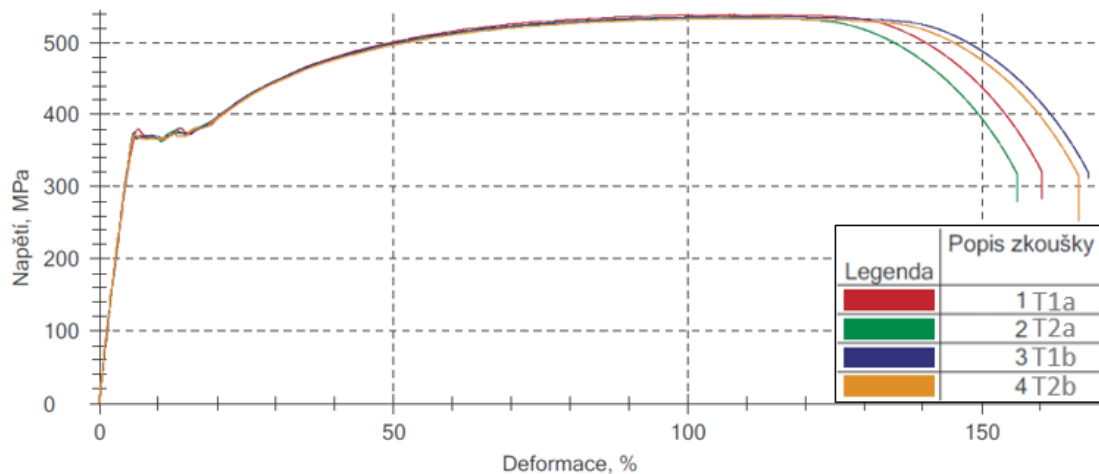
Obrázek 73: Schéma rozměrů vzorku pro tahovou zkoušku dle normy ČSN EN ISO 4136 [28]

#### Výsledky zkoušky tahem

Z každého ze vzorků T1 a T2 byly odebrány dva vzorky pro zkoušku tahem T1a, T1b, T2a a T2b. Následně byla provedena zkouška tahem na zkušebním systému Zwick Roell Z250. Výsledky ze zkoušky tahem jsou uvedeny v tabulce 19 a zobrazeny v grafu na obrázku 74. Kompletní protokol z tahové zkoušky je součástí přílohy.

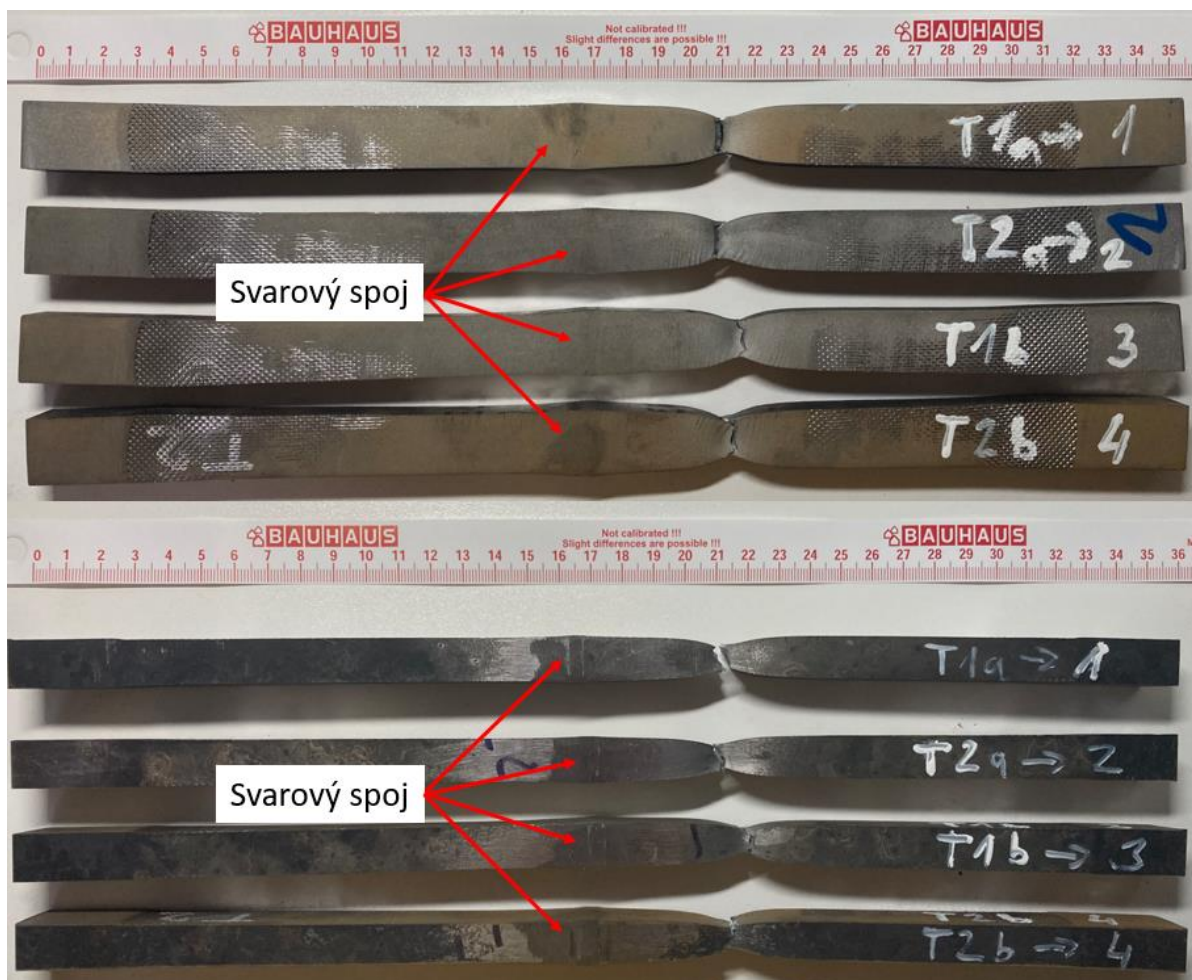
Označení	$R_m$ [MPa]	$R_{eL}$ [MPa]	$R_{eH}$ [MPa]	$A_{5,65}$ [%]	$Z$ [%]
1- T1a	538,64	364,70	380,11	107,27	70,44
2- T2a	534,11	362,20	375,03	111,12	71,42
3- T1b	535,74	366,59	376,13	114,54	68,94
4- T2b	533,01	366,17	373,07	113,33	73,20

Tabulka 19: Výsledky tahové zkoušky



Obrázek 74: Graf z tahové zkoušky ze zkušebních vzorků svarů T1 a T2

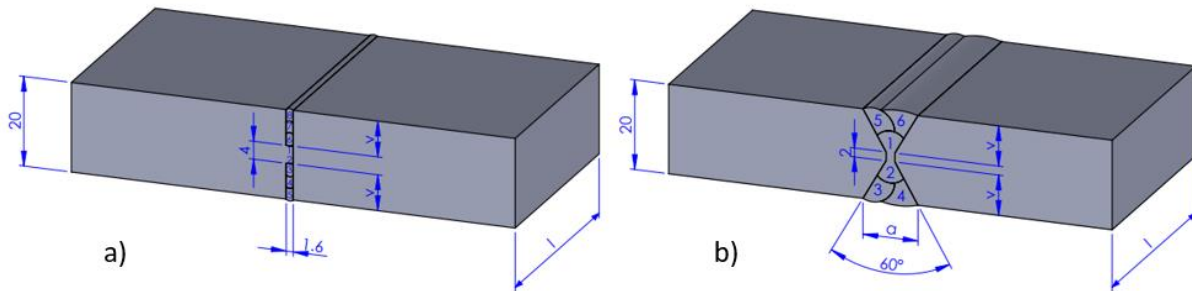
Nejdůležitější poznatek z této zkoušky tahem je, že u všech vzorků došlo k lomům v základním materiálu zcela mimo TOO (viz. obr. 75), což bývá pro svary provedené laserovou technologií typické, protože mají velmi úzkou TOO. Z měření mikrotvrdomosti byl také patrné, že svarový kov měl vždy vyšší tvrdost než základní materiál, a nebyla u žádného ze svařených vzorků zřetelná odpevněná zóna, která je typická pro konvenční obloukové metody svařování.



Obrázek 75: Lom vzorků T1 a T2 po zkoušce tahem – k lomu došlo vždy v základním materiálu

### 6.6.5 Porovnání spotřeby přídavného materiálu a rychlosti svařování s obloukovou metodou MAG na jeden metr svaru

Je možné také porovnat spotřebu přídavného materiálu na 1 metr délky svaru, při použití laserové metody svařování s přidaným studeným drátem, při přípravě svarových ploch jako u finálního vzorku T1 do úzké mezery s konvenční metodou svařování MAG, kdy je uvažováno, že příprava svarových ploch bude ve tvaru X s úhlem rozevření 60° a ve středu s otupením pro kořenovou vrstvu 2 mm (viz. obr. 72).



Sem zadejte rovnici.

**Obrázek 76: Příprava svarových ploch – a) pro laser s přídavným drátem, b) pro metodu MAG**

Objem X drážky pro svařování metodou MAG a drážky 1,6 mm široké pro svařování laserem se studeným přídavným drátem je spočítán níže:

$$v_a = 8 \text{ mm}; v_b = 9 \text{ mm}; a = \text{tg}30 * v_b * 2; l = 1000 \text{ mm}$$

$$V_{X \text{ drážka}} = \frac{v_b * a}{2} * l * 2 = \frac{v_b * \text{tg}30 * v_b * 2}{2} * l * 2 = \frac{9 * 0,57 * 9 * 2}{2} * 1000 * 2 = 93530,7 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{drážka } 1,6 \text{ mm}} = v_a * 2 * 1,6 * l = 8 * 2 * 1,6 * 1000 = 25600 \text{ mm}^3$$

#### Skutečná spotřeba drátu při svařování laserem do drážky 1,6 mm:

Suma délky svaru  $s = 6$  průchodů =  $1000 \times 6 = 6000$  mm (pozn. kořen byl svařován bez přídavného drátu)

$$\text{Rychlost svařování } V_L = 0,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} = 800 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$\text{Čas svařování s přídavným drátem } t = \frac{s}{V_L} = \frac{6000}{800} = 7,5 \text{ min.}$$

$$\text{Rychlost podávání drátu } V_{dr} = 4,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$\text{Skutečná spotřeba drátu} = V_{dr} * t = 4,5 * 7,5 = 33,75 \text{ m}$$

$$\text{Skutečný objem spotřebovaného drátu } \phi 1 \text{ mm} = \frac{\pi * d^2}{4} * L = \frac{3,14 * 1}{4} * 33750 = 26494 \text{ mm}^3$$

#### Výsledné porovnání spotřeby přídavného drátu $\phi 1$ mm

Pokud budeme počítat s pětiprocentním převýšením svaru v X drážce obdobně jako u drážky pro laserové svařování, tak skutečná spotřeba přídavného drátu do X drážky by byla **98207,2 mm<sup>3</sup>** a to znamená, že při svařování metodou MAG bylo spotřebováno 3,7- krát více přídavného drátu, což je hodně velký rozdíl.

#### Srovnání rychlostí svařování laserového svařování s konvenční metodou MAG

Je možné také porovnat celkový čas robotického svařování laserem s přídavným drátem, se kterým byl svařen vzorek T1, s robotickým svařováním metodou MAG, kdy se při robotickém svařování tlustých plechů s vyšší pevností shodou okolností z podobného materiálu

S355MC a při použití stejného přídatného drátu o  $\varnothing$  1 mm, pohyboval rychlostí  $0,4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  s ohledem na to, aby bylo vneseno do svaru co nejmenší teplo. [20]

Z toho vyplývá, že při laserovém svařování s přidaným studeným drátem, 20 mm tlustý plech o délce svaru 1 metr svařeným na 8 průchodů (6 vrstev s přidaným s drátem + 2 kořenové vrstvy svařené čistě laserem) a při rychlosti svařování  $0,8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , by trvalo kompletní provedení svaru 10 minut.

Při svaření toho samého plechu, při stejné délce svaru 1 metr se svarovou přípravou do X drážky na 6 průchodů, by při rychlosti svařování  $0,4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  trvalo 15 minut. Což je ve výsledku cca o 33 procent pomalejší, a tudíž méně produktivní.

## 7 Závěr a diskuze

Cílem této diplomové práce bylo provést rešerši a experiment na laserové svařování se studeným drátem, kdy hlavním úkolem bylo svařit plech z oceli o vyšší pevnosti a s větší tloušťkou stěny.

1. Byl popsán princip fungování laseru a laserového svařování, které bylo porovnáno s konvenčními metodami svařování.
2. Podrobně byla rozebrána metoda svařování laserem metodou Cold wire.
3. Bylo popsáno chování vysokopevných ocelí při svařování.
4. Dále byly z dostupných zdrojů prostudované experimentální svary provedené metodou Cold wire a vlivy geometrie přípravy svarových ploch a dalších svařovacích parametrů
5. Řešena byla konfigurace laserového pracoviště pro svařování laser s přidaným studeným drátem

Po provedení rešerše byla s ohledem na zjištěné aspekty navržena experimentální část této diplomové práce, která měla několik částí.

1. Nakonfigurovat a upravit pracoviště, tak aby mohl být svařen plech o tloušťce 20 mm
2. Vytvořit svařovací program
3. Připravit vzorky pro finální svaření
4. Nalézt vhodné svařovací parametry
5. Svařit finální vzorky
6. Provést jejich vyhodnocení

Při řešení konfigurace pracoviště byla nutná úprava držáku svařovacího hořáku, což spočívalo v prodloužení drážek součásti pro upnutí hořáku. Důležité při laserovém svařování s přidaným studeným drátem je, dokázat správně rozostřit paprsek tak, aby natavoval stěny základního materiálu a dokázal zároveň tavit i přídatný drát. A z tohoto důvodu byl držák hořáku upravován, aby průsečík laserového paprsku a přídatného drátu byl v takové vzdálenosti od průvlastku hořáku, aby bylo možné přivést drát na povrch dna drážky, který je potřeba svařovat. V tomto případě šlo o to dostat se s drátem do hloubky cca 20 mm a ohnisko laserového paprsku fokusovat na povrch svařovaného plechu nebo mírně nad něj, čehož bylo dosaženo provedenou úpravou. Další důležitým bodem při řešení pracoviště bylo řešení upínání vzorků, z důvodu velké deformace při svařování do úzké mezery, která se při nedostatečném upnutí vzorku zavírala a znemožňovala tak přístupu drátu do svarové lázně.

Po vyřešení pracoviště byl další úkol vytvořit svařovací program, tak aby bylo možné jednoduše zadávat a měnit svařovací parametry. Při tvoření svařovacího programu byl řešen problém s nastavováním časových prodlev pro spuštění a vypnutí podávání drátu. Důležité bylo zadávat časovou prodlevu na začátku podávání drátu, aby se po spuštění laserového paprsku

spustilo o 0,2 sekundy později podávání drátu a na konci svařování, aby se o 0,2 sekundy vypo podávání drátu dřív, než se vypne laserový paprsek. Tyto prodlevy jsou velice důležité, aby se drát nepřivářil do svarové lázně, a aby byl začátek a konec svaru kvalitně vyplněn, a také aby se předešlo neprovařeným počátkům svarů.

Pro experiment byla zvolena příprava svarových ploch do úzké mezery. Tato volba vyplynula z provedené rešerše, kdy při svařování do úzké drážky bylo dosahováno nejslibnějších výsledků a není složité tyto drážky připravit.

Při hledání svařovacích parametrů bylo nejprve svařováno na volný povrch plechu, aby se zjistilo, kolik přídavného drátu, při zvolené svařovací rychlosti, maximálním využitelném výkonu a při daném rozostření, je schopen laserový paprsek stabilně tavit. Při 4 kW výkonu a rychlosti 0,8 m.min<sup>-1</sup> byla maximální rychlost podávání drátu 5 m.min<sup>-1</sup> při vyšší rychlosti podávání drátu se potom už projevovala nestabilita svarové lázně a byl nadměrný rozstřík.

Dále byl řešen směr svařování a poloha drátu, jestli má být před paprskem nebo tažen za paprskem. Jestli má být drát tlačěn nebo tzv. tažen. Z experimentu tvorby návarových housenek vyšlo, nejvýhodnější mít drát před laserovým paprskem a aby byl mírně tlačěn. Tímto způsobem bylo dosaženo hlubších průvarů, stability tavné lázně a celého procesu.

Po provedení návarových housenek se přistoupilo ke svařování do úzkých drážek, aby byla nalezena správná šířka drážky. Svařováno bylo do drážek 2,4 mm, 2 mm a 1,6 mm. Drážka 1,6 mm byla vyhodnocena jako neoptimálnější, protože úzká drážka funguje i jako částečné vedení drátu do tavné lázně a snáze se vyplňuje. Při tomto procesu nastal problém se svařovací hlavou, kdy byla zjištěna závada, a laserový paprsek nesvařoval takovým výkonem, který byl v programu zadáván. Z tohoto důvodu musela být tato část experimentu zopakována.

Byl proveden test svařování do sedmi drážek o rychlostech svařování 0,6 m.min<sup>-1</sup> a 0,8 m.min<sup>-1</sup>, kdy byla opět řešena rychlost podávání drátu, tak aby byla svarová lázeň v drážce opět stabilní. Při rychlosti podávání drátu 5 m.min<sup>-1</sup> se už drát při svařovacích rychlostech 0,6 a 0,8 m.min<sup>-1</sup> zasekával a v drážce se špatně taval.

U všech těchto svařených sedmi vzorku označených jako d1 až d7 byly provedeny makrořezy, kdy byly detekovány i nějaké svarové vady v podobě pórů, byla změřena šířka TOO, kdy se pohybovala od 0,8 do 1,2 mm. U čtyř těchto vzorků (d1, d2, d5, a d7) byla měřena mikrotvrdość HV<sub>0,5</sub>, kdy trend průběhů mikrotvrdośćí byl obdobný u všech čtyř vzorků. Spodní housenka byla vždy nejtvrďší ve středu svarového kovu, její tvrdost se pohybovala okolo 400 HV<sub>0,5</sub>. U horních svarových vrstev nastával pokles měřené mikrotvrdośći ve středu svarové housenky na úroveň okolo 280 HV<sub>0,5</sub>, zatím co při krajích na hranici natavení byla tvrdost nejvyšší a to okolo 450 HV<sub>0,5</sub>. U spodních housenek je vysoká tvrdost způsobena velkým odvodem ze tří stran, kdežto u horních housenek je největší odvod tepla přes stěny drážky. Horní housenky jsou zahřívány zbytkovým teplem od spodní housenky, které slouží jako dohřev, a tudíž zůstává u horních svarových vrstev vysoká tvrdost už jen na hranicích ztavení a ve středu sváru dochází k poklesu tvrdosti. Z měření mikrotvrdośći je patrné, že je vždy vyšší než v základním materiálu, kde hodnota tvrdosti HV<sub>0,5</sub> byla okolo 180.

Finální svary byly provedeny na plechu o tloušťce 20 mm z materiálu S355J2, kdy byly připraveny svarové plochy s drážkou 1,6 mm a s odsazením ve středu tloušťky plechu o šířce 4 mm. Ze zkušebních svarů T1 a T2 byly odebrány vzorky pro tahovou zkoušku a pro zhodnocení makro a mikrostruktury. Svařovací parametry byly zvoleny tak, aby byl počet svarových vrstev co nejmenší, protože čím víc svarových vrstev je provedeno, tím víc defektů může vznikat. A také je to ekonomičtější.



Z makrořezů bylo patrné, že oba vzorky byly dokonale provařené, drážky byly kompletně vyplněné. Vzorek T2 měl mírné převýšení, protože se svařoval s nižší svařovací rychlostí  $0,6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , ale se stejnou rychlostí podávání drátu a na stejný počet svarových vrstev, tudíž bylo použito do stejné široké drážky více přídavného materiálu. Z makra je také patrné, že svar svařovaný do drážky 1,6 mm, je široký přes 3 mm, a právě zde je prostor pro optimalizaci. Bylo by možné ještě svařování zrychlit. Mohlo by se docílit snížení celkového vneseného tepla a tím pádem i zúžení TOO, ale za cenu, že výsledná tvrdost svarového kovu by mohla být vyšší vlivem rychlejšího ochlazování, protože by se základní materiál nestihl při rychlejší svařování prohrát a odváděl by teplo rychleji.

Mikrostruktura svařovaných vzorků T1 a T2 byla prakticky stejná. Základní materiál měl odpovídající feriticko-perlitickou strukturu, která odpovídá jeho chemickému složení. Ve středu svarového kovu byla patrná Widmannstättenova struktura, která byla na hranicích původních hrubých austenitických zrn, austenit se transformoval ve struktury bainitického typu s výskytem popuštěného martenzitu, který byl popuštěn vlivem nakumulovaného vneseného tepla, které se kumulovalo při svařování dalších svarových housenek, což by i dokládaly naměřené hodnoty mikrotvrdosti ve středové části svarového kovu okolo  $280 \text{ HV}_{0,5}$ , kdežto na hranicích ztavení byl čistý martenzit, což také koresponduje s hodnotami naměřené mikrotvrdosti okolo  $450 \text{ HV}_{0,5}$ . Důležitý je také poznatek, že žádné místo v oblasti svaru a TOO nemělo nižší tvrdost než základní materiál, tudíž nebyla znatelná žádná odpevněná oblast jako se vyskytuje u svarů provedených obloukovými metodami. Přesto je naměřená mikrotvrdost příliš vysoko nad standardem, který pro ocel S355J2 stanovuje norma ČSN EN ISO 15614-1 na  $380 \text{ HV}$  v tepelně nezpracovaném stavu a na  $320 \text{ HV}$  po tepelném zpracování. Snížit tvrdost, jak už bylo zmíněno na straně 69, by bylo možné aplikací předehřevu  $120\text{-}150 \text{ }^\circ\text{C}$ , vyžiháním v peci při  $650^\circ\text{C}$  po dobu dvou hodin, anebo kombinací předehřevu a žihání. Tyto postupy by se museli ověřit a zjistit jejich účinky na výslednou strukturu svaru, případně celý proces dle zjištěných výsledků optimalizovat, tak aby byl funkčně a ekonomicky přijatelný.

Při provedení tahových zkoušek došlo k lomu u každého ze čtyř odebraných vzorků v základním materiálu ve vzdálenosti cca 35 mm od svaru. To jen potvrzuje absenci odpevněné oblasti, která je právě typická pro konvenční metody svařování, které vnáší do základního materiálu podstatně více tepla a v TOO kde potom dochází k poklesu pevnosti a tvorbě právě již zmíněné odpevněné oblasti.

Ze srovnání spotřeby přídavného drátu, a rychlosti svařování se svařováním metodou MAG a přípravou pro svar ve tvaru X drážky vyplynulo, že spotřeba přídavného drátu je 3,7krát vyšší a že u tlustších plechů je laserové svařování s přidaným studeným drátem cca o 33% rychlejší. Tento aspekt může potom sehrát roli při ekonomických výpočtech pro pořízení laserového pracoviště.

K závěrečnému hodnocení diplomové práce lze napsat, že cíle práce byly splněny, byl svařen plech z materiálu S355J2 s pevností nad  $500 \text{ MPa}$  do úzké drážky 1,6 mm. Bylo upraveno laserové pracoviště, tak aby se dalo ve svařování laserem se studeným přídavným drátem na katedře KMM pokračovat a dále zkoumat vlivy jednotlivých parametrů svařování, optimalizovat parametry svařování, tak aby struktury svarového kovu byly co nejpříznivější vzhledem k mechanickým vlastnostem svarového spoje.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] MINAŘÍK, Václav a kolektiv autorů; *Technologie svařování a zařízení*. Ostrava, Zeross, svářečské nakladatelství 2001, ISBN 80-85771-81-0
- [2] NĚMEČEK, Stanislav; *Laserové svařování s přídavným drátem*; MM průmyslové spektrum; [online] [citace 18. 10. 2022];  
Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-svarovani-s-pridavnym-dratem>
- [3] ELMESALAMY, Ahmed, J.A. Francis, L. Li; *A comparison of residual stresses in multi pass narrow gap laser welds and gas-tungsten arc welds in AISI 316L stainless steel*, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2014, ISSN 0308-0161, [Online] [Citace: 20. 10. 2022];  
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308016113001683>
- [4] GUO, Wei, Francis John, Li Lin, Vasileiou Anastasia, Crowther D., Thompson A.; *Residual stress distributions in laser and gas-metal-arc welded high-strength steel plates*. Materials Science and Technology 2016, [online] [citace 18. 10. 2022];  
Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/304529828\\_Residual\\_stress\\_distributions\\_in\\_laser\\_and\\_gas-metal-arc\\_welded\\_high-strength\\_steel\\_plates](https://www.researchgate.net/publication/304529828_Residual_stress_distributions_in_laser_and_gas-metal-arc_welded_high-strength_steel_plates)
- [5] LAPŠANSKÁ, Hana; *Laserové technologie v praxi*, Moravská vysoká škola Olomouc, 2010. [online] [citace 18. 10. 2022];  
Dostupné z: <https://adoc.pub/laserove-technologie-v-praxi.html>
- [6] NOVÁK, Miroslav; *Seriál na téma lasery – základní princip laseru a jejich dělení*, Lao lasery a optika; [online] [citace 18. 10. 2022];  
Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [7] MEGABLOG; *Hlavní typy laserů používaných v průmyslu*; [online] [citace 18. 10. 2022];  
Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
- [8] NĚMEČEK, Stanislav, Tomáš Mužík, Michal Míšek; *Differences between Laser and Arc Welding of HSS Steels*, Physics Procedia, 2012, ISSN 1875-3892; [online] [citace 18. 10. 2022];  
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389212025424>
- [9] NAJMAN, Martin; *Bakalářské práce – Možnosti využití přístroje Gleeble pro simulace dějů v tepelně ovlivněné oblasti svarů*; [online]. [cit. 2022-11-27]; Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/149855>
- [10] MRŇA, Libor; *Technologie využívající laser*; Vysoké učení technické v Brně [online] [citace 18. 10. 2022];  
Dostupné z: [https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_s\\_varovani\\_laserem\\_2013\\_mrna.pdf](https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_s_varovani_laserem_2013_mrna.pdf)
- [11] ŠPÍCHAL, Jan; *Dělení materiálů laserovým paprskem je stále na vzestupu zájmu*; www.konstrukce.cz; [online] [citace 18. 10. 2022];  
Dostupné z: <https://konstrukce.cz/materialy-a-technologie/deleni-materialu-laserovym-paprskem-je-stale-na-vzestupu-zajmu-591>
- [12] KOŘÁN, Pavel, *Seriál na téma lasery – laserové svařování*, Lao lasery a optika, [online] [citace 18. 10. 2022];  
Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
- [13] MRŇA, Libor; *Aktuální možnosti v laserovém svařování*; MM průmyslové spektrum [online] [citace 18. 10. 2022];  
Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aktualni-moznosti-v-laserovem-svarovani>

- [14] WWW.FRONIUS.COM; *Laserhybrid welding*; [online] [citace 18. 10. 2022];  
Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs cz/czech republic/perfect welding/vyrobky/robotizovan%C3%A9 sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD/vysokov%C3%BDkonn%C3%A9 sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD migmag/laserhybrid/laserhybrid>
- [15] KARHU M., Kujanpää, V., Eskelinen, H., & Salminen, A., *Filler metal mixing behaviour of 10 mm thick stainless steel butt-joint welds produced with laser-arc hybrid and laser cold-wire processes*. Applied Sciences, 9(8) (2019); [online] [citace 18. 10. 2022];  
Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app9081685>
- [16] FOLDYNA, Václav a kolektiv: *Materiály a jejich svařitelnost*. Vyd. 1. Ostrava, Zeross 2001, ISNB 80-85771-85-3
- [17] KARHU M., Veli Kujanpää, *Defocusing Techniques for Multi-pass Laser Welding of Austenitic Stainless Steel*, Physics Procedia, 2015, ISSN 1875-3892,  
[Online] [Citace: 20. 10. 2022];  
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389215015072>
- [18] AHN, Joseph, Enguang He, Li Chen, John Dear, Catrin Davies, *The effect of Ar and He shielding gas on fibre laser weld shape and microstructure in AA 2024-T3*, Journal of Manufacturing Processes, ISSN 1526-6125, [online] [citace 26. 10. 2022];  
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612517301755>
- [19] ROUBÍČEK, Martin; *Laserové svařování – ekonomika a kvalita*; Konstrukce.cz [online] [citace 26. 10. 2022];  
Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/laserove-svarovani-ekonomika-a-kvalita/>
- [20] HUČEK, František, „Bakalářská práce – Volba vhodných svařovacích parametrů při robotickém svařování konstrukčních ocelí“ Plzeň 2021, Vedoucí práce, Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž IWE, [Online] [Citace: 20. 10. 2022];  
Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/44145/1/BP%202021%20Frantisek%20Hucek.pdf>
- [21] ČSN EN 1011-2. *Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů- Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí*. Vydal Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha 2013
- [22] GUO, W., Crowther, D., Francis, J. A., Thompson, A., & Li, L. (2016). *Process-parameter interactions in ultra-narrow gap laser welding of high strength steels*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 84(9-12), 2547-2566, [online] [citace 26. 10. 2022];  
Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7881-9>
- [23] ZHAO, Y., Ma, S., Huang, J., *Narrow-gap laser welding using filler wire of thick steel plates*. Int J Adv Manuf Technol 93, 2955–2962 (2017).  
[online] [citace 26. 10. 2022];  
Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0470-3>
- [24] WWW.ESAB.COM; *OK Autrod 12.51*;  
[online] [citace 19. 3. 2023];  
Dostupné z: [https://esab.com/cz/eur\\_cs/products-solutions/product/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/mild-steel-wires/ok-autrod-12-51/](https://esab.com/cz/eur_cs/products-solutions/product/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/mild-steel-wires/ok-autrod-12-51/)
- [25] ČSN EN 10027-2. *Systémy označování ocelí – Část 2: Systém číselného označování*, Vydal Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha 2016
- [26] ČSN EN 10025-2. *Výroby válcované za tepla z konstrukční oceli-Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli*. Vydal Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha 2020

[27] MAZANCOVÁ, E.; *Technické materiály I. Kovové*, Vysoká škola báňská; Technická univerzita Ostrava; Ostrava 2012, [online] [citace 19. 3. 2023];

Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/TM1/Technicke%20materialy%20I.pdf>

[28] WWW.TECHPORTAL.CZ; *Destruktivní zkoušky svarových spojů*, [online] [citace 19. 3. 2023];

Dostupné z: [https://www.techportal.cz/33/destruktivnizkousky-svarovych-spoju-uniqueidmRRWSbk196FNf8jVUh4Eoqedn9IqOoGWh5CTKyYaSk/?uri\\_view\\_type=5](https://www.techportal.cz/33/destruktivnizkousky-svarovych-spoju-uniqueidmRRWSbk196FNf8jVUh4Eoqedn9IqOoGWh5CTKyYaSk/?uri_view_type=5)

[29] OCHODEK, V.; *Příklady experimentálního měření teplotních cyklů ve svařování*, [online] [citace 19. 5. 2023];

Dostupné z: <https://www.domzo13.cz/dokumenty/vyuka/seminare/vliv-tepl-rezimu-a2.pdf>

[30] ČSN EN ISO 15614-1. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část: 1 obloukové a plamenné svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. Vydal Český normalizační institut, Praha 2005

## Příloha č. 1

